



PROJETO DE GRADUAÇÃO

MONTAGEM DE BANCADA DINAMOMÉTRICA PARA AVALIAÇÃO DE COMPORTAMENTOS DE *POWERTRAINS* DE TURBINAS EÓLICAS OU HIDROCINÉTICAS

Por,
Sérgio Caetano Alves de Araújo

Brasília, 22 de Novembro de 2016.

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE GRADUAÇÃO

MONTAGEM DE BANCADA DINAMOMÉTRICA PARA AVALIAÇÃO DE COMPORTAMENTOS DE *POWERTRAINS* DE TURBINAS EÓLICAS OU HIDROCINÉTICAS

POR,

Sérgio Caetano Alves de Araújo

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro Mecânico.

Banca Examinadora

Prof. Marcus Vinicius Girão de Moraes, UnB/ ENM
(Orientador)

Prof. Alberto C. G. C. Diniz, UnB/ ENM

Prof. Adriano Todorovic Fabro, UnB/ ENM

Brasília, 23 de Novembro de 2016.

Dedicatória(s)

Dedico à minha família, aos colegas e às famílias dos mesmos que não puderam acabar o curso por terem partido para o Oriente Eterno.

Sérgio Caetano Alves de Araújo

Agradecimentos

Primeiro gostaria de agradecer a Deus por ter tido saúde ao longo do curso. Depois gostaria de agradecer a minha família, na qual incluo também minha namorada Dailany Siqueira, por ter me apoiado e me aguentado durante os momentos difíceis do curso. Agradecer também aos professores, colegas e técnicos da Universidade de Brasília que me ajudaram das mais diversas formas possíveis para minha conclusão de curso.

Sérgio Caetano Alves de Araújo

RESUMO

O presente texto tem como objetivo apresentar a montagem e calibração de uma bancada dinamométrica para turbinas eólicas e hidro geradores. Mostra-se como foram selecionados os instrumentos presentes na mesma e o seu *layout*. É apresentado o modo de calibração dos instrumentos e também como foram realizados os experimentos. Por fim, faz-se a análise dos dados colhidos e propõem-se novos estudos e melhorias que podem ser realizados no futuro.

ABSTRACT

This paper aims to present the assembly and calibration of a dynamometer bench for wind turbines and hydro generators. It shows how we select the instruments present in it and its layout. It is displaced the calibration mode of the instruments as well as the experiments were conducted. Finally, it is the analysis of the collected data and proposes new studies and improvements that can be realized in the future.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 CONTEXTO	11
1.2 TURBINAS EÓLICAS E HIDRO GERADORES	14
1.2.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DAS TURBINAS EÓLICAS E HIDRO GERADORES	14
1.2.2 COMPONENTES DE UMA TURBINA EÓLICA E HIDRO CINÉTICA	14
1.3 BANCADA DINAMOMÉTRICA	16
1.4 OBJETIVO	17
1.5 PLANO DE ESTUDO E METODOLOGIA	17
2 BANCADA DINAMOMÉTRICA	18
2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.2 MONTAGEM DA BANCADA DINAMOMÉTRICA	19
2.3 MODELO DINÂMICO	21
2.4 ELEMENTOS DA BANCADA DINAMOMÉTRICA	24
2.4.1 CONVERSOR DE FREQUÊNCIA E MOTOR ELÉTRICO	24
2.4.2 <i>DRIVETRAIN</i>	25
2.4.3 GERADOR ELÉTRICO	27
3 INSTRUMENTAÇÃO DA BANCADA DINAMOMÉTRICA	28
3.0 INSTRUMENTAÇÃO	28
3.1 SELEÇÃO E DESCRIÇÃO DOS INSTRUMENTOS	29
3.1.1 CONVERSOR OU INVERSOR DE FREQUÊNCIA	30
3.1.2 CÉLULA DE CARGA	31
3.1.3 CONDICIONADOR E AMPLIFICADOR DE SINAL	31
3.1.4 SENSOR INDUTIVO E SENSOR HALL	31
3.1.5 SENSOR DE CORRENTE NÃO INVASIVO	32
3.1.6 VOLTÍMETRO E ALICATE AMPERÍMETRO	33
3.1.7 OSCILOSCÓPIO E CALIBRADOR	33
3.1.8 DIVISOR DE TENSÃO	34
3.1.9 CONTRAPESO DO MOTOR ELÉTRICO	35
3.2 MONTAGEM DA BANCADA DINAMOMÉTRICA E LOCALIZAÇÃO DOS INSTRUMENTOS	35
3.3 CALIBRAÇÃO	38
3.3.1 CÉLULAS DE CARGA	38
3.3.2 SENSORES DE CORRENTE NÃO INVASIVOS	42
3.3.3 SENSORES DE ROTAÇÃO	44
3.4 AQUISIÇÃO DE DADOS	46
3.4.1 PLACA DE CIRCUITO ELÉTRICO PARA AQUISIÇÃO DE DADOS E ALIMENTAÇÃO DOS SENSORES	46
4 RESULTADOS	49
4.1 CÉLULAS DE CARGA	49
4.2 SENSORES DE ROTAÇÃO	49
4.3 SENSORES DE CORRENTE NÃO INVASIVOS	49
4.4 EXPERIMENTOS FINAIS	50
5 CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS	53
5.1 CONCLUSÃO	53
5.2 PERSPECTIVAS	54
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	55
ANEXOS	57

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Matriz Energética Brasileira (ABEEólica/ANEEL - 05/01/2016).	12
Figura 2 - Mapa Temático de Velocidade Média Anual de Vento a 50m de Altura (CRESESB - Atlas do Potencial Eólico Brasileiro - 2001).	13
Figura 3 - Evolução da Capacidade Instalada (ABEEólica- Janeiro de 2016).....	14
Figura 4 - Partes da Turbina Eólica (Centro Brasileiro de Energia Eólica - CBEE/UFPE - 2000).....	15
Figura 5 - Desenho Esquemático de uma Turbina Eólica.	16
Figura 6 - Motor-Redutor-Caixa Multiplicadora-Gerador (Aparecida, 2014).....	20
Figura 7 - Motor-Caixa Multiplicadora-Gerador (Aparecida, 2014).	20
Figura 8 - Modelo Dinâmico da Bancada Dinamométrica.	21
Figura 9 - Circuito Elétrico Básico do Inversor de Frequência (Sousa, Silva & Pires, 2012). 24	
Figura 10 - Desenho esquemático da caixa multiplicadora.....	25
Figura 11- Gerador Elétrico <i>Brushless</i> (www.scorpionsystem.com, 2016).....	27
Figura 12 - Circuito completo de instrumentação.	29
Figura 13 – Sensor de corrente não invasivo.	33
Figura 14 - Divisor de tensão.	34
Figura 15 - Contrapeso instalado no motor elétrico.	35
Figura 16 - Vista superior da bancada dinamométrica.....	36
Figura 17 - Vista superior da bancada dinamométrica.....	37
Figura 18 – Vista isométrica da bancada dinamométrica.	37
Figura 19 - Relação da massa com a DDP gerada na célula de carga 1 da GL-30kg.	40
Figura 20 - Relação da massa com a DDP gerada na célula de carga 2 da GL-30kg.	41
Figura 21 - Relação da massa com a DDP gerada na célula de carga 1 da Tomate-10kg.	41
Figura 22 - Relação da massa com a DDP gerada na célula de carga 2 da Tomate-10kg.	42
Figura 23 – Relação da massa com a DDP gerada na célula de carga 2 da Tomate-10kg no segundo experimento.....	42
Figura 24 - Calibragem do Sensor de Corrente Não Invasivo 1.	43
Figura 25 - Calibragem do Sensor de Corrente Não Invasivo 2.	44
Figura 26 - Calibragem do Sensor de Corrente Não Invasivo 3.	44
Figura 27 - Aquisição de dados dos sensores de rotação (Azul: sensor indutivo; Amarelo: sensor Hall).	46
Figura 28 – Esquema do circuito elétrico do sensor Hall.	47
Figura 29 - Circuito elétrico das células de carga e do sensor indutivo.....	48
Figura 30 - Circuito elétrico completo de aquisição de dados e alimentação dos sensores.	57
Figura 31- Placa do circuito elétrico de alimentação dos sensores e aquisição de dados.	57
Figura 32 - Sistema de aquisição de dados e alimentação do circuito elétrico.	58
Figura 33 – Vista superior do sistema de aquisição de dados e alimentação do circuito elétrico.	58
Figura 34 - Desenho técnico da bancada.....	59
Figura 35 - Desenho técnico da base da bancada dinamométrica (escala em cm).....	59
Figura 36 - Desenho técnico do suporte do sensor indutivo.	60
Figura 37 - Desenho técnico do suporte do motor elétrico.	61
Figura 38 - Desenho técnico do suporte do motor no eixo de saída.	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados obtidos da calibração das células de carga modelo GL - 30 kg.....	39
Tabela 2 - Dados obtidos da calibração das células de carga modelo Tomate - 10 kg.....	39
Tabela 3 - Segunda calibração da célula de carga 2 (Tomate 10 kg).....	40
Tabela 4 – Cálculo do escorregamento no EBR com carga no gerador.....	50
Tabela 5 – Cálculo do escorregamento no EBR sem carga no gerador.	50
Tabela 6 - Torque mecânico nos eixos EBR e EAR.	51
Tabela 7 - Dados do experimento final com resistor.	52
Tabela 8 - Dados do experimento final com o resistor tendendo a zero.	52

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

B	Número de dentes da engrenagem	
C	Coefficiente de Amortecimento	[N.s/m]
d	Diâmetro	[mm]
e	Escorregamento do motor elétrico	
f	Frequência	[Hz]
g	Aceleração gravitacional	[m/s ²]
H	Potência	[kW]
I	Corrente elétrica	[A]
J	Momento de Inércia	[kg.m ²]
K	Constante Elástica	[N/m]
n	Velocidade de rotação	[rpm]
n_s	Velocidade síncrona	[rpm]
P	Passo circular	[mm]
p	Número de polos do motor elétrico	
Q	Período	[s]
R	Resistor	[Ohm]
r	Raio	[mm]
T	Torque	[N.m]
U	Diferença de potencial	[V]

Símbolos Gregos

θ	Deslocamento	[rad]
ω	Velocidade angular	[rad/s]
π	Constante matemática	
Ω	Unidade de Resistência	[Ohm]

Subscritos

<i>c</i>	mecânico
<i>d</i>	dissipativo
<i>em</i>	eletromecânico
<i>eng</i>	engrenagem
<i>ex</i>	saída
<i>in</i>	entrada do motor
<i>m</i>	mecânica
<i>mo</i>	motor
<i>ro</i>	rotor
<i>s</i>	síncrono
<i>t</i>	transmitida

Sobrescritos

- Variação temporal
- Segunda variação temporal

Siglas

ABEEólica	Associação Brasileira de Energia Eólica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CBEE	Centro Brasileiro de Energia Eólica
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica
DDP	Diferença de Potencial
EAR	Eixo de Alta Rotação
EBR	Eixo de Baixa Rotação
IAE	Instituto de Aeronáutica e Espaço
PIBIC	Programa Institucional de Bolsa de Iniciação Científica
Pro Infra	Projeto de Infraestrutura do Governo Federal em parceria com prefeituras
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
UnB	Universidade de Brasília

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresentam-se aspectos gerais sobre a produção de energia renovável no Brasil e no mundo, focando principalmente em hidro geradores e turbinas eólicas. Além disso, faz-se um breve resumo sobre os tipos de turbinas eólicas e como é feita a conversão eletromecânica na mesma.

1.1 CONTEXTO

A busca por fontes alternativas de geração de energia tem aumentado nas últimas décadas devido às crises energéticas mundiais e a preocupação com a preservação do meio ambiente. Crises mundiais como a do petróleo em 1973 e nacionais como a energética do início do século XXI (Apagão em 2001) e hídrica no ano de 2015 em São Paulo reforçam a necessidade de diversificar a matriz energética mundial.

No primeiro caso nacional, a crise do Apagão foi gerada devido à falta de planejamento e investimento na área de geração de energia elétrica. Com o crescimento do país a demanda por energia aumentou e a oferta não conseguiu suprir a necessidade.

No segundo caso nacional, a crise hídrica de 2015 foi gerada devido às alterações climáticas mundiais. Estados do sul e sudeste do Brasil tiveram redução na geração de energia hidroelétrica, sendo o estado de São Paulo o mais prejudicado. Em alguns estados a redução na geração de energia ocorreu para manter o nível dos reservatórios de água utilizados para o consumo humano. Essa competição existente entre a geração de energia e o consumo evidencia a necessidade de buscar fontes alternativas para a geração de energia elétrica.

As mudanças climáticas são responsáveis por alterações nas previsões hidrológicas nacionais das agências. Como mais de 61% da energia produzida são de hidroelétricas (Figura 1), a escassez de chuva por um longo período pode ser catastrófica para uma determinada região principalmente em termos econômicos já que as maiores consumidoras de energia elétrica são as indústrias.

■ Hidrelétrica ■ Biomassa ■ Eólica ■ PCH ■ Gás Natural ■ Óleo ■ Carvão ■ Nuclear

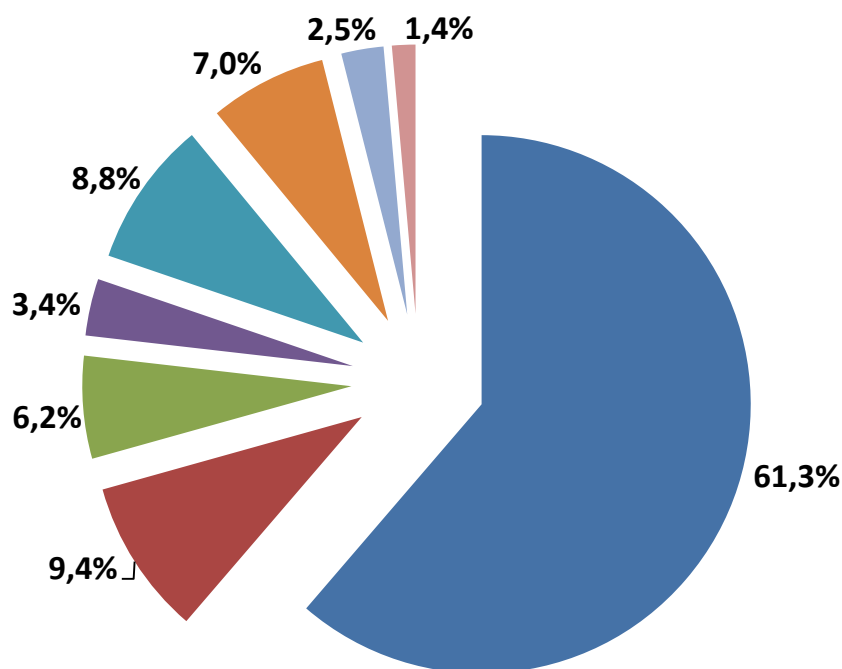


Figura 1 - Matriz Energética Brasileira (ABEEólica/ANEEL - 05/01/2016).

As alterações climáticas também geram a preocupação com o meio ambiente. A substituição de matrizes como as termoeletricas e as usinas nucleares por energia renováveis também vem sendo realizadas. Entre as energias renováveis mais utilizadas são a eólica e hidro cinética, a solar e as ondas.

O nordeste e o sul do país são os locais mais propícios para a implantação de fazendas eólicas devido à velocidade média do vento, como mostra a Figura 2. No entanto, ao longo do Rio São Francisco no estado de Minas Gerais também há a possibilidade dessa implantação já que a velocidade média do vento passa de 7 m/s em algumas regiões.

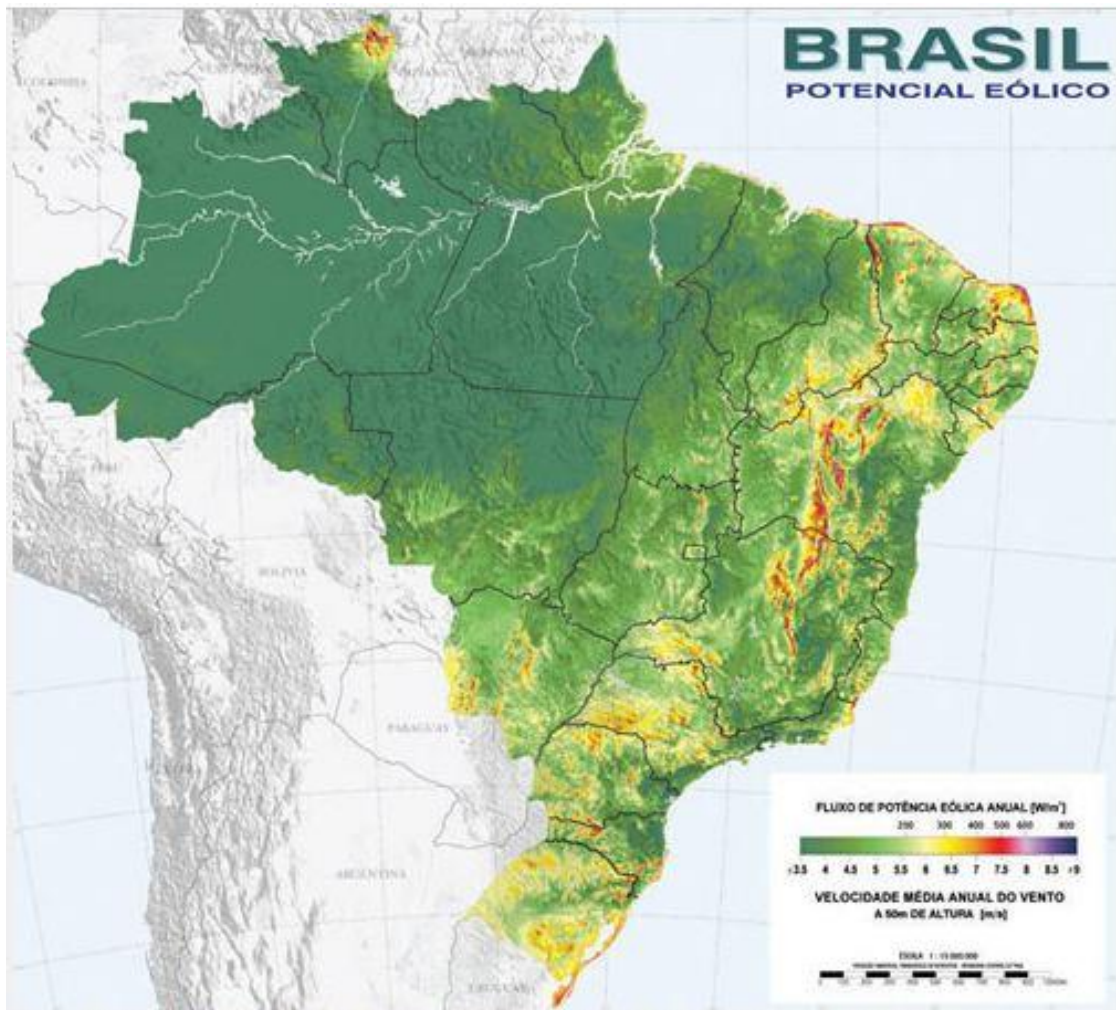


Figura 2 - Mapa Temático de Velocidade Média Anual de Vento a 50m de Altura (CRESESB - Atlas do Potencial Eólico Brasileiro - 2001).

A despeito da atual crise econômica há um acelerado crescimento na implantação e produção de energia eólica devido aos altos investimentos na área por meio de programas nacionais de incentivo à geração de infraestrutura como o Pro Infra. Ao observar a Figura 3 nota-se um crescimento acentuado na capacidade de produção e observa-se que a mesma quase dobrou no ano de 2015 em relação a 2014, chegando a 8.715,4 MW.

No entanto, é possível prever uma desaceleração na implantação e produção da energia eólica nos próximos anos, e isso ocorrerá porque a capacidade máxima de produção está quase sendo atingida.

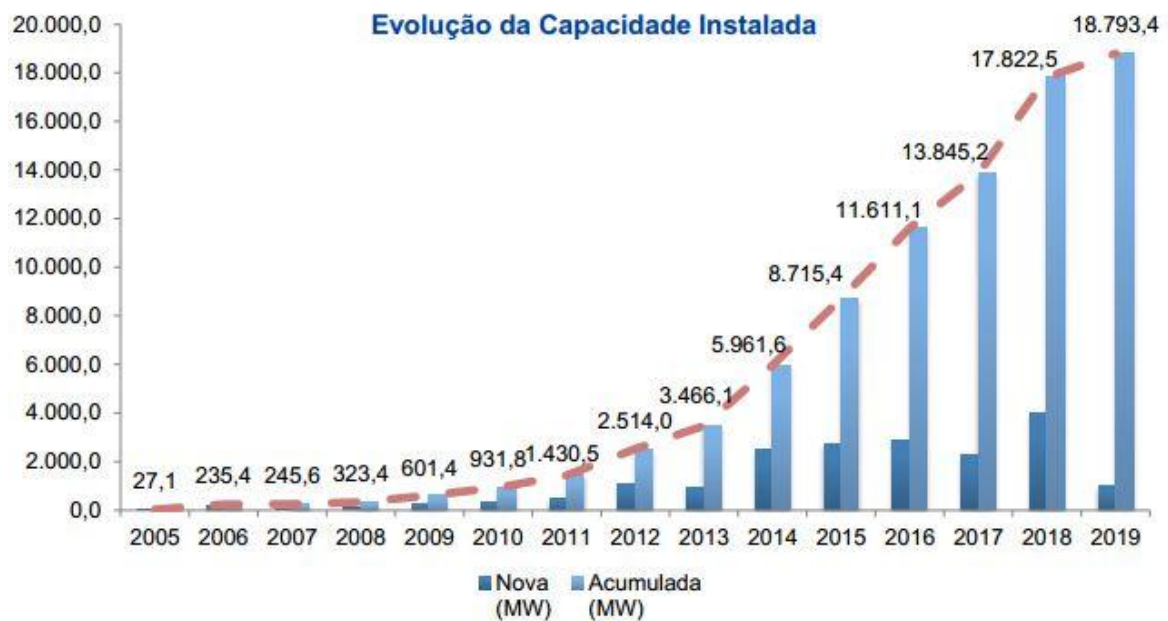


Figura 3 - Evolução da Capacidade Instalada (ABEEólica- Janeiro de 2016).

1.2 TURBINAS EÓLICAS E HIDRO GERADORES

1.2.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DAS TURBINAS EÓLICAS E HIDRO GERADORES

O princípio de funcionamento de uma turbina eólica ou de um hidro gerador é a conversão da energia cinética de um fluido em energia elétrica, passando por sistemas mecânicos.

O fluido em movimento passa por um conjunto de pás e rotor que está preso a um eixo denominado eixo de baixa rotação (EBR). A energia cinética é convertida em energia mecânica no eixo. Essa energia passa por uma caixa multiplicadora e chega ao gerador elétrico por meio de um eixo de alta rotação (EAR). No gerador elétrico a energia mecânica é convertida em energia elétrica.

1.2.2 COMPONENTES DE UMA TURBINA EÓLICA E HIDRO CINÉTICA

A Figura 4 mostra os componentes de uma turbina eólica: torre, nacelle e rotor (cubo e pás).

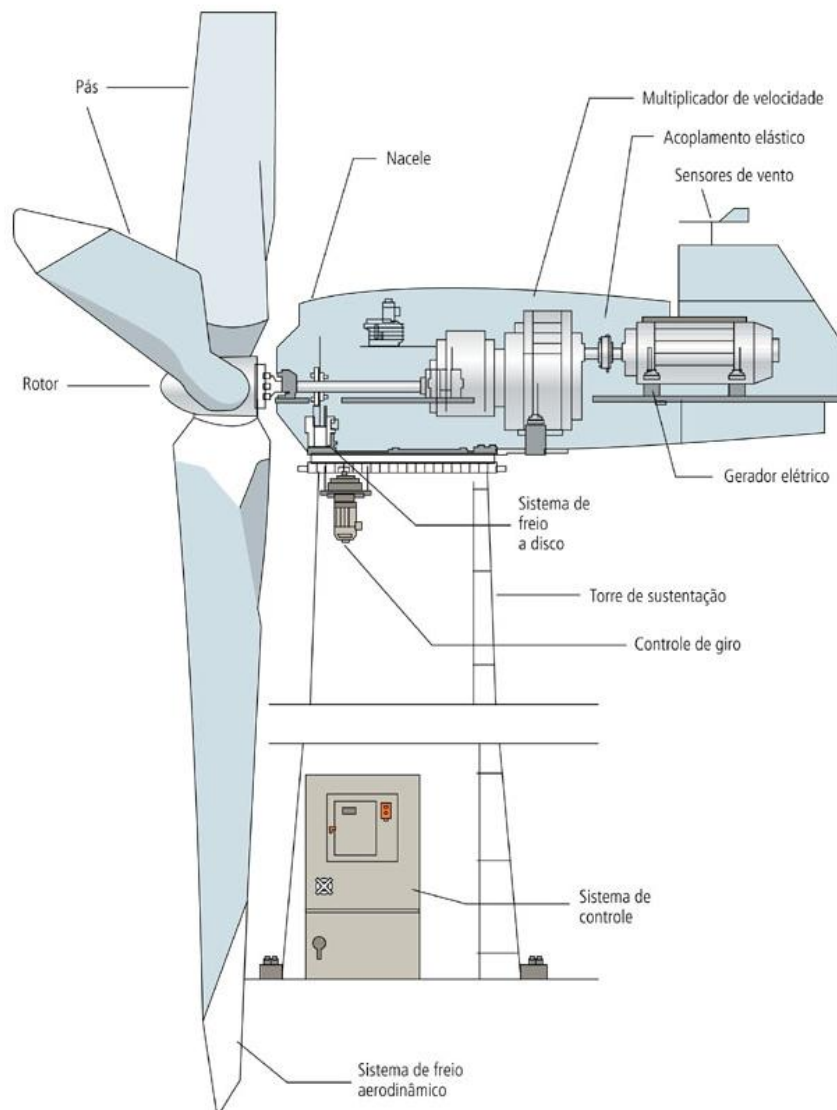


Figura 4 - Partes da Turbina Eólica (Centro Brasileiro de Energia Eólica - CBEE/UFPE - 2000)

A principal função da torre ou do suporte é estrutural, suporta o conjunto formado por nacela e rotor. Outra função desse suporte é a passagem de cabos de tensão para levar a corrente elétrica do gerador para a rede de distribuição.

Na nacela encontram-se os sistemas eletromecânicos da turbina, os sistemas de segurança e os sistemas de controle de funcionamento da turbina eólica.

O sistema eletromecânico (Figura 5) tem a função de converter energia cinética do fluido em energia elétrica. O início da conversão é no rotor. O mesmo recebe energia cinética do fluido e converte em energia mecânica no eixo de baixa rotação (EBR). O EBR está acoplado a uma caixa multiplicadora, dentro da nacela, que aumenta a rotação do sistema e a transfere para o gerador por

meio do eixo de alta rotação (EAR). A energia elétrica sai do gerador, é sincronizada e distribuída na rede elétrica.

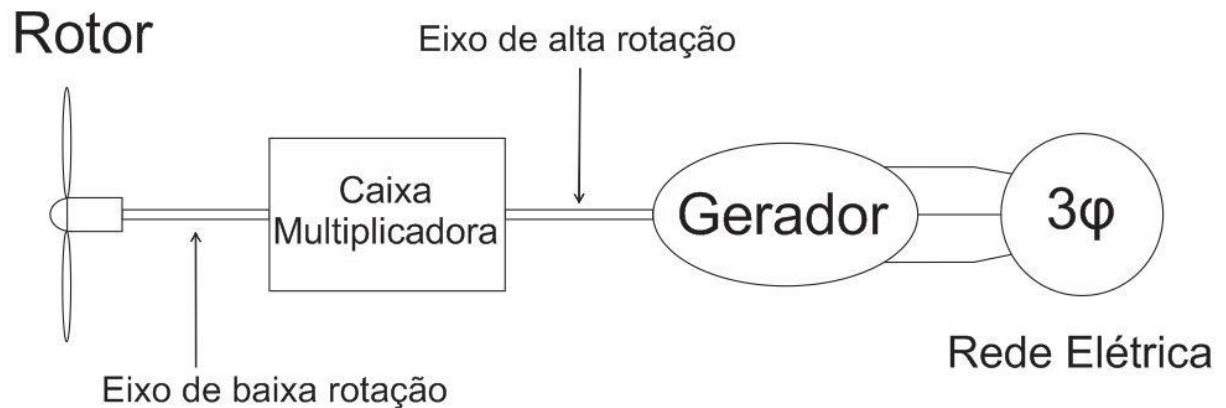


Figura 5 - Desenho Esquemático de uma Turbina Eólica.

Para garantir a segurança durante o funcionamento da turbina eólica é necessário uma série de componentes. Entre eles, sensores de rotação nos eixos, freio no eixo de alta rotação e placa aquisitiva, controlador, anemômetros e atuadores.

Os sinais captados pelos sensores de rotação e anemômetro são colhidos pela placa de aquisição. Os dados colhidos servem para que o controlador, por meio de atuadores, melhore o rendimento do sistema e garanta a segurança durante o funcionamento.

1.3 BANCADA DINAMOMÉTRICA

Com o objetivo de melhorar o rendimento das turbinas eólicas e dos hidro geradores, fazem-se estudos sobre seus componentes. Esses estudos podem ser por meio de simulações computacionais ou por meio de experimentos em bancadas dinamométricas.

Na Universidade de Brasília existem dois projetos que buscam estudar as turbinas eólicas e os hidro geradores, sendo eles: Eólica e Tucunaré. Por meio desses projetos, Kalkmann (2014) fez simulações computacionais de bancadas dinamométricas buscando resultados parecidos com os reais para que pudessem validar os experimentos realizados. Aparecida (2014) desenvolveu um modelo de bancada dinamométrica para a realização de experimentos.

1.4 OBJETIVO

O presente trabalho apresenta a montagem de um protótipo de uma bancada dinamométrica para turbinas eólicas. Sendo o principal objetivo descrever a montagem e a instrumentação dessa bancada. Posteriormente foram analisados o rendimento e o comportamento de um sistema que simula uma turbina eólica.

1.5 PLANO DE ESTUDO E METODOLOGIA

Os próximos capítulos servirão para apresentação da bancada dinamométrica para teste de turbinas eólicas e hidro geradores. Além disso, mostrarão também como a bancada foi projetada e montada. Por fim, os dados experimentais serão apresentados e discutidos.

Capítulo 2 – Bancada dinamométrica: Nesse capítulo serão apresentados os trabalhos já desenvolvidos por outros alunos da UnB e por pesquisadores da área. Será apresentado como se definiu o *layout* e a modelagem dinâmica da bancada. Por fim, serão apresentados os elementos da bancada dinamométrica com suas respectivas funções e posições.

Capítulo 3 – Instrumentação da Bancada dinamométrica: Nesse capítulo serão apresentadas as seleções, descrições das características, calibrações, montagens e localizações dos instrumentos utilizados para a medição dos dados da bancada. Além disso, serão discutidas as formas de aquisição de dados.

Capítulo 4 – Resultados experimentais: Nesse capítulo serão apresentados os dados obtidos. Eles serão comparados com os resultados esperados. Ocorrerá a explicação das alterações feitas no projeto inicial para melhorar a obtenção dos dados. Por fim, serão feitas análises para melhorar os dados obtidos e os erros experimentais.

Capítulo 5 – Conclusão e perspectiva: Nesse capítulo os resultados obtidos serão discutidos e as conclusões que poderão ser tomadas a partir dos mesmos. Por fim, serão definidos os próximos estudos a serem feitos e aperfeiçoamentos nos instrumentos para melhorar os resultados obtidos.

2 BANCADA DINAMOMÉTRICA

Neste capítulo serão apresentados os estudos que vêm sendo realizados com bancadas dinâmométricas na área de hidro geradores e turbinas eólicas. Além disso, serão apresentados os tipos de montagem e simulações computacionais para simulação desses sistemas eletromecânicos.

2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A história das turbinas eólicas e dos hidro geradores inicia-se com a vontade do homem converter a energia cinética do vento ou a energia potencial da água dos rios em algo útil para a sociedade. No início foram criados moinhos de ventos e rodas d'água para moer grãos, mover engenhos, bombear água e até como propulsão de pequenos barcos, substituindo assim, a força gerada por animais.

Em 1887, o escocês James Blyth criou uma turbina eólica com pás de tecido e conseguiu gerar e armazenar energia elétrica para iluminar sua casa. (Pinto, 2014)

No Brasil, a primeira turbina eólica foi desenvolvida pelo Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE) entre os anos de 1973 e 1983. A primeira instalação foi feita em Fernando de Noronha em uma parceria entre o Grupo de Energia Eólica da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e o instituto de pesquisa dinamarquês *Folkecenter*.

Os estudos dos componentes de uma turbina eólica ou de um hidro gerador são importantes para verificar se eles estão trabalhando conforme projetados e para análises de rendimentos. Essas análises podem ser feitas de forma experimental com o uso de bancadas dinâmométricas ou por simulações computacionais.

Marrant, Vanhollebeke & Peeters (2010) usam simulações computacionais, métodos numéricos e experimentais para simular caixas de transmissão de turbinas eólicas *off-shore* com potência de 13MW. O estudo baseia-se em desenvolver programas computacionais e experimentos para comparação e validação. O desenvolvimento dessas ferramentas computacionais é necessário, pois na maioria das vezes não é possível realizar testes nas turbinas em campo.

O método baseia-se no domínio da frequência e no domínio do tempo. O domínio do tempo inclui medições de torque, forças de reação e deformações dos componentes internos. Já o domínio da frequência analisam rotações e translações. O estudo busca repetir situações reais às quais as turbinas eólicas são submetidas: esforços de carregamento na turbina parada e iniciação da rotação. A obtenção dos dados desses experimentos é feita por diversos sensores na bancada de teste. Sensores para medição de rotação, torque e aceleração são colocados em vários pontos da turbina e da caixa de engrenagem.

A Universidade de Brasília (UnB) por meio do Projeto Tucunaré vem estudando sistemas eletromecânicos aplicados a turbinas eólicas e hidro cinéticas. Aparecida (2014) desenvolveu os primeiros conceitos de um modelo de bancada dinamométrica. Com os métodos computacionais e de modelagem matemática, Kalkmann (2014) desenvolveu no SIMULINK/MATLAB um modelo de bancada dinamométrica.

2.2 MONTAGEM DA BANCADA DINAMOMÉTRICA

A bancada dinamométrica pode ser dividida em três partes: motor elétrico, *drivetrain* e gerador elétrico. O motor elétrico da bancada dinamométrica será análogo ao rotor da turbina eólica. Ele será responsável por fornecer energia mecânica ao EBR. O *drivetrain* da turbina eólica está localizado entre o EBR e o EAR e é o responsável pelo aumento da rotação do sistema, já que o gerador elétrico precisa de uma velocidade de rotação superior à do rotor ou do motor elétrico. O gerador elétrico tem a função de converter os giros do EAR em energia elétrica.

Para montar uma bancada dinamométrica algumas observações devem ser feitas. A primeira observação feita foi o tipo de simulação a ser realizada. Segundo Rocha (2008) há três tipos de simulações, podendo ser classificadas da seguinte forma:

- a) Mesma inércia: Esse tipo de simulação utiliza no sistema simulado a mesma inércia do sistema real vista do eixo do gerador. Para isso, utiliza-se um volante de inércia. Nesse tipo de simulação é necessário um novo volante de inércia para cada turbina testada.
- b) Mesmo torque: Esse tipo de montagem fornece ao eixo torque igual ao da turbina real dada certa velocidade do vento. Nesse tipo de montagem é possível determinar somente o torque da turbina em regime permanente, não sendo possível o estudo de aspectos importantes na geração de energia que ocorrem no regime transiente.
- c) Mesma variação de velocidade: Esse tipo de montagem simula as variações de velocidades presentes no sistema real e é possível o estudo da geração de energia no regime permanente e no transiente. Nesse tipo de montagem é possível a utilização de várias turbinas distintas na mesma bancada.

Aparecida (2014) propôs diversos *layouts* de bancada dinamométrica, entre eles a montagem do tipo “Motor-Redutor-Caixa Multiplicadora-Gerador” que é utilizada quando os torques do motor e do gerador se igualam a uma baixa rotação. Esse fato limita um estudo mais amplo e com rotações maiores. Assim, o uso do redutor na saída do motor ajuda a ampliar as rotações que podem ser estudadas. Caso contrário, seria necessária a troca do motor toda vez que os torques se iguallassem. Também se pode fazer a montagem do tipo “Motor-Caixa Multiplicadora-Gerador”. Nessa montagem estuda-se o comportamento da caixa multiplicadora e dos demais componente. Obtêm-se as perdas e

os rendimentos presentes no sistema. É possível realizar experimentos em uma larga faixa de rotação e em várias turbinas distintas.

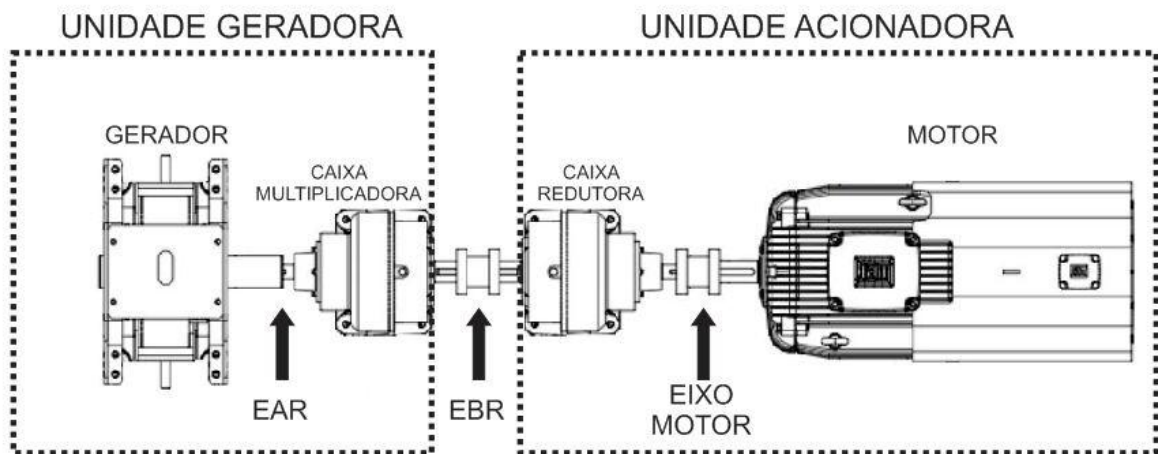


Figura 6 - Motor-Redutor-Caixa Multiplicadora-Gerador (Aparecida, 2014).

A Figura 6 apresenta a seguinte configuração: motor elétrico, redutor de velocidade, multiplicador de velocidade e gerador elétrico. Como o objetivo é simular a rotação do rotor real, Aparecida (2014) define a configuração desta figura como a ideal, pois a rotação do eixo EBR seria próxima à do rotor real devido à presença da caixa redutora.

A Figura 7 é o esboço do tipo de bancada que foi selecionada para o presente projeto.

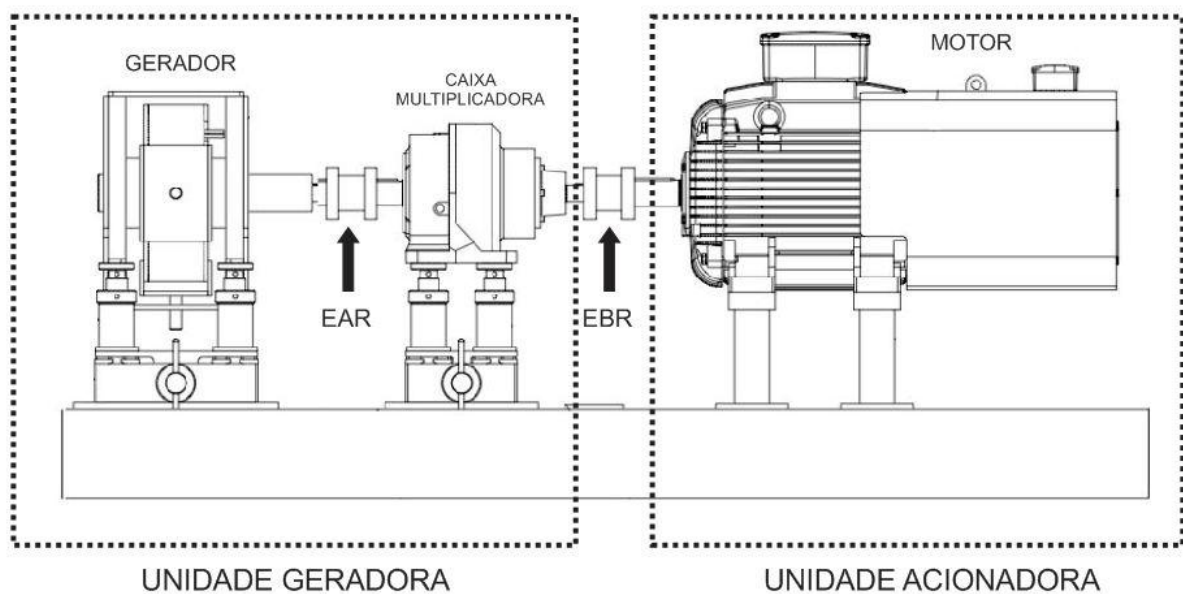


Figura 7 - Motor-Caixa Multiplicadora-Gerador (Aparecida, 2014).

2.3 MODELO DINÂMICO

A Figura 8 apresenta um esquema do modelo dinâmico da bancada dinamométrica escolhida, ou seja, a configuração da Figura 7. O motor elétrico trifásico é alimentado por uma tensão de 380 Volts e pode-se medir a corrente de entrada do mesmo com um amperímetro. Como há o valor da corrente elétrica e da diferença de potencial (DDP) é possível medir a potência de entrada do motor que é a mesma potência de entrada do sistema.

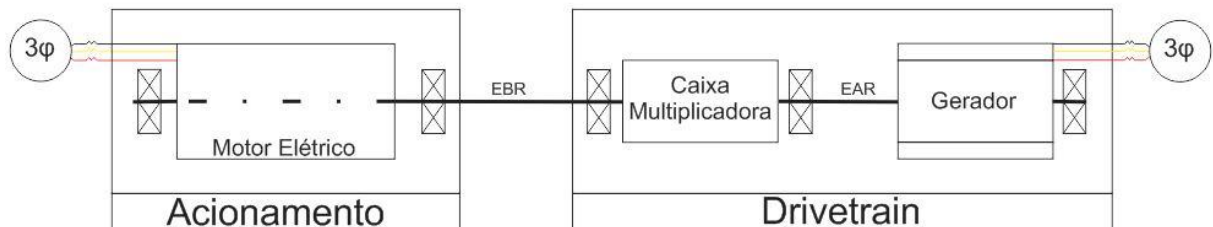


Figura 8 - Modelo Dinâmico da Bancada Dinamométrica.

Com o auxílio de uma célula de carga e de um braço de alavanca com o comprimento conhecido é possível determinar o torque de reação presente no motor elétrico.

O eixo de saída do motor está acoplado com o eixo EBR garantindo a mesma rotação. Com isso determina-se a rotação de entrada da caixa multiplicadora. Uma forma de se determinar a rotação do motor elétrico é com base na frequência de entrada desse motor, da seguinte forma:

$$n_s = \frac{120 f_{in}}{p} \quad (1)$$

onde:

n_s é a velocidade síncrona, [rpm];

f_{in} é a frequência de entrada do motor, [Hz];

p é o número de polos do motor;

A velocidade síncrona é a velocidade de rotação do campo magnético girante. (Barreto, Castro Júnior, Murari, & Sato, 2011). “O campo magnético girante surge quando um sistema de correntes alternadas trifásicas é aplicado em polos defasados fisicamente em 120°”. (Moraes, 2016)

Essa fórmula pode ser usada apenas quando o motor não está sofrendo esforços no eixo de entrada ou quando o esforço é pequeno.

Quando o motor passa a exercer um grande esforço ocorre o escorregamento da escova sobre o rotor. Esse escorregamento é dado por:

$$e_{mo} = \frac{n_s - n_{ro}}{n_s} \quad (2)$$

onde:

n_{ro} é a velocidade do rotor, [rpm];

e_{mo} é o escorregamento;

Segundo Barreto, Castro Júnior, Murari & Sato (2011) o escorregamento é o quanto o rotor está girando abaixo da velocidade síncrona. Este fator é dado em porcentagem e possui valor entre 1% e 5% da condição de plena carga.

Na bancada em estudo, a verificação da rotação do EBR e a verificação da presença ou não de escorregamento no motor é feita conhecendo a frequência de entrada do motor, a relação de multiplicação da caixa multiplicadora e medindo a rotação do EAR, pois a caixa multiplicadora tem sua transmissão feita por meio de correntes de rodas dentadas garantindo o não deslizamento da corrente.

A velocidade de rotação do EAR é a mesma do gerador elétrico, pois o eixo de entrada do gerador é o próprio EAR. A medição da rotação desse eixo é feita por meio de um sensor indutivo.

Por meio de outra célula de carga e de outro braço de alavanca com comprimento conhecido calcula-se o torque presente no gerador elétrico. Também no gerador elétrico é possível medir a corrente e a DDP gerada e, assim, determinar a potência de saída do gerador e por consequência a potência de saída do sistema. Essa corrente é medida com base em um circuito que contém um sensor de Efeito Hall. Já a DDP é medida por meio de um voltímetro conectado a um divisor de tensão presente em uma placa *protoboard* (testes) ou na placa de alimentação e aquisição de dados (experimento final).

Outra forma para determinar a potência presente na entrada e na saída do sistema é relacionando o torque, a rotação e a potência da seguinte forma (13-36, p. 713, Shigley, Mischke & Budynas, 2005):

$$W_t = \frac{60000 \cdot H_t}{\pi \cdot n_m \cdot d_{eng}} \quad (3)$$

onde:

W_t é a carga transmitida, [kN];

H_t é a potência transmitida, [kW];

n_m é a rotação, [rpm];

d_{eng} é o diâmetro da engrenagem em estudo, [mm].

Adaptando a fórmula para a situação em estudo, tem-se:

$$W_t \cdot \frac{d_{eng}}{2} = \frac{60000 \cdot H_t}{2 \cdot \pi \cdot n_m} \quad (4)$$

O diâmetro d_{eng} foi dividido por 2 para se obter a distância do centro para o local da força aplicada. Com isso, a primeira parte da equação resulta em um torque.

$$T = \frac{60000 \cdot H_t}{2 \cdot \pi \cdot n_m} \quad (5)$$

ou seja,

$$T = \frac{9549,3 \cdot H_t}{n_m} \quad (6)$$

onde:

T é o torque, [N.m].

Por fim, tem-se:

$$H_t = \frac{T \cdot n_m}{9549,3} \quad (7)$$

Conhecendo todos esses dados, pode-se criar um modelo dinâmico da seguinte forma:

$$J\ddot{\theta} + C\dot{\theta} + K\theta = T(t) \quad (8)$$

onde:

J é o momento de inércia do conjunto;

$\ddot{\theta}$ é a aceleração presente do conjunto;

C é o amortecimento do conjunto;

$\dot{\theta}$ é a velocidade desenvolvida no conjunto;

K é a constante elástica do conjunto;

θ é o deslocamento presente no conjunto;

$T(t)$ é o torque presente no conjunto.

Considerando o problema quasi-estático, a equação (8) resume-se a:

$$C\dot{\theta} + K\theta = T(t) \quad (9)$$

O torque é dado por

$$T_c = T_{em} - T_d \quad (10)$$

onde:

T_c é o torque mecânico, [N.m];

T_{em} é o torque eletromecânico do sistema, [N.m];

T_d é o torque dissipativo do sistema, [N.m].

Para medir o torque dissipativo, coloca-se o sistema para rodar com o gerador sem carga. Já a medição do torque eletromecânico é feita adicionando-se uma carga na saída do gerador. Após as duas aferições obtém-se o torque mecânico.

2.4 ELEMENTOS DA BANCADA DINAMOMÉTRICA

A bancada dinamométrica foi montada sobre uma estrutura de madeira compensada para redução de peso e também evitar vibrações. Sobre essa base foram colocados os equipamentos necessários para o desenvolvimento do projeto. Dividem-se esses equipamentos em três partes principais: acionamento (motor elétrico), *drivetrain* (caixa multiplicadora e gerador elétrico) e instrumentação.

2.4.1 CONVERSOR DE FREQUÊNCIA E MOTOR ELÉTRICO

Para a variação da rotação de trabalho do motor elétrico trifásico de corrente alternada, necessita-se de um conversor de frequência. Antes da criação dos conversores, o controle preciso da velocidade dos motores elétricos só era possível com o uso da tensão contínua, gerando custo na fabricação do motor e a necessidade de retificação da tensão de alimentação dos motores [(Sousa, Silva & Pires, 2012) apud (Franchi, 2008)]. Para variar a rotação do motor elétrico, o conversor ou inversor de frequência converte a tensão alternada senoidal da rede elétrica na entrada do dispositivo em tensão contínua. Depois a tensão contínua é convertida em tensão não senoidal de amplitude e frequência variáveis [(Sousa, Silva & Pires, 2012) apud (Karavasilis, 2008)].

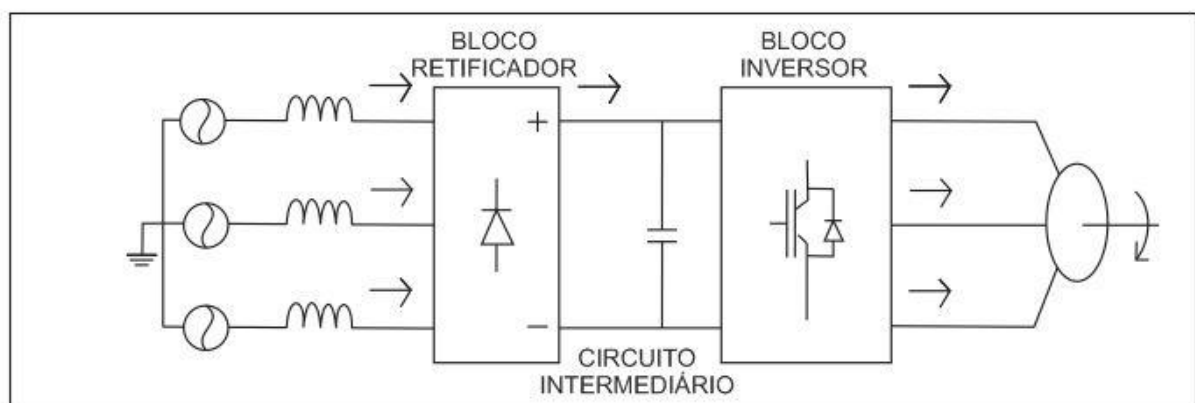


Figura 9 - Circuito Elétrico Básico do Inversor de Frequência (Sousa, Silva & Pires, 2012).

O chaveamento dos módulos IGBTs (em português, Transistor Bipolar de Porta Solada) e as diversas frequências harmônicas geradas no inversor são responsáveis por alguns fenômenos (pulsos eletromagnéticos) que geram interferências e danos a demais componentes do sistema [(Sousa, Silva & Pires, 2012) apud (Franchi, 2008)].

Motores elétricos são equipamentos rotativos que convertem energia elétrica em energia mecânica. Há vários tipos de motores elétricos. O mais usado na indústria é o motor de indução. Esse tipo de motor, quando trifásico, possui enrolamentos em ranhuras existentes no interior da carcaça com núcleo de ferro laminado e recebe correntes do tipo senoidais com ângulo de defasagem igual a 120° .

O motor elétrico utilizado foi fabricado pela WEG em 2005 com carcaça 90S e com seis polos. É um motor de indução trifásico do tipo gaiola e pode ser montado em uma tensão de 220 V com a corrente elétrica de 5,50 A ou em uma tensão de 380 V com a corrente elétrica de 3,18 A. A potência máxima é de 1,1 kW (1,5hp) a 1130 rpm e rendimento de 75%.

2.4.2 DRIVETRAIN

A caixa multiplicadora está localizada entre o motor e o gerador. Ela recebe rotação do eixo de baixa rotação (EBR) e a multiplica para o eixo de alta rotação (EAR) ligado ao gerador. A caixa multiplicadora do presente trabalho é composta por mancais, eixos, rodas dentadas e correntes.

A Figura 10 mostra o esquema da caixa multiplicadora. Ela é composta por três eixos (eixo “a” ou EBR, eixo “b” e eixo “c” ou EAR) e por quatro engrenagens (engrenagem 2, engrenagem 3, engrenagem 4 e engrenagem 5).

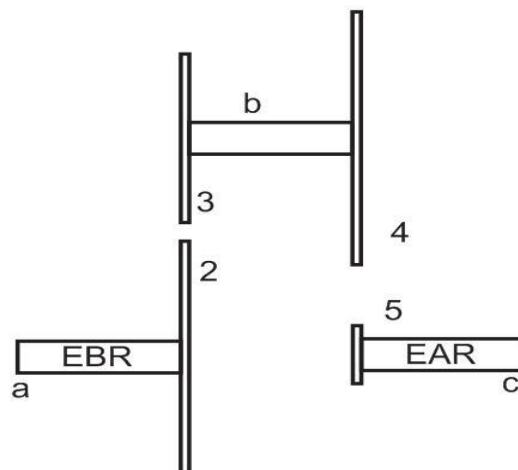


Figura 10 - Desenho esquemático da caixa multiplicadora.

O EBR está acoplado ao motor elétrico e à engrenagem 2. O eixo “b” está acoplado com as engrenagens 3 e 4, portanto essas engrenagens possuem a mesma velocidade rotacional. O EAR está acoplado à engrenagem 5 e ao gerador elétrico.

As engrenagens 2 e 3 estão ligadas por uma corrente. Elas possuem a mesma velocidade tangencial. As engrenagens 4 e 5 também estão ligadas por corrente e possuem a mesma velocidade tangencial.

Para o cálculo da relação de multiplicação, tem-se:

$$v_{t23} = \omega_2 \cdot r_2 = \omega_3 \cdot r_3 \quad (11)$$

onde:

v_{t23} é a velocidade tangencial das engrenagens 2 e 3, [m/s];

ω_2 é a velocidade rotacional da engrenagem 2, [rad/s];

r_2 é o raio médio da engrenagem 2, [m];

ω_3 é a velocidade rotacional da engrenagem 3, [rad/s];

r_3 é o raio médio da engrenagem 3, [m].

A velocidade ω_2 é a mesma do EBR, ou seja, é a velocidade do motor elétrico.

Manipulando a equação (11), tem-se:

$$\frac{\omega_2}{\omega_3} = \frac{r_3}{r_2} \quad (12)$$

Para o engrenamento de duas rodas dentadas há uma condição chamada Condição de Engrenamento (Shigley, Mischke, & Budynas, 2005). Nesse caso as rodas dentadas necessitam possuir o mesmo passo circular, dado por:

$$P = \frac{\pi \cdot r_{eng}}{B} \quad (13)$$

onde:

P é o passo circular, [mm];

r_{eng} é o raio médio da engrenagem, [mm];

B é o número de dentes da engrenagem.

Assim, o passo circular das engrenagens 2 e 3 são iguais. O mesmo acontece para as engrenagens 4 e 5.

Com isso, substituindo a equação (13) na equação (12), tem-se:

$$\omega_2 = \omega_3 \cdot \frac{B_3}{B_2} \quad (14)$$

O mesmo ocorre para as engrenagens 4 e 5.

Como ω_3 é igual a ω_4 , a relação de multiplicação e a velocidade do EAR são determinadas da seguinte forma:

$$\omega_5 = \omega_2 \cdot \frac{B_2}{B_3} \cdot \frac{B_4}{B_5} \quad (15)$$

Como B_2 é igual a 44 dentes, B_3 é igual a 15 dentes, B_4 é igual a 48 dentes e B_5 é igual a 11 dentes a relação de multiplicação é de 1:12,8. Assim o EAR roda 12,8 vezes mais rápido que o EBR.

2.4.3 GERADOR ELÉTRICO

Geradores elétricos, ao contrário dos motores elétricos, convertem energia mecânica em energia elétrica. O gerador utilizado no projeto é classificado como brushless (Felippes, 2012).

Motores ou geradores brushless são diferentes dos demais por não possuírem escovas (Figura 11). Eles possuem nos rotores ímãs permanentes (conjunto girante ou carcaça) e nos estatores os eletroímãs. Como a corrente é fornecida para as bobinas de forma direta não é necessário o uso das escovas.



Figura 11- Gerador Elétrico *Brushless* (www.scorpionsystem.com, 2016).

O gerador elétrico utilizado foi um Turnigy 6364-B 230Kv com potência de 1900 Watts e constituído de 14 polos, tensão máxima suportada é de 37 Volts e resistência interna 28 miliohms. O mesmo possui massa igual a 640 gramas

O 230 Kv significa que, se inserida uma DDP de 1 Volt, a rotação gerada no rotor será de 230 rpm.

3 INSTRUMENTAÇÃO DA BANCADA DINAMOMÉTRICA

Este capítulo apresenta a forma como foi feita a instrumentação da bancada, a calibração dos sensores e a aquisição de dados vindos dos sensores e dos demais componentes estudados.

3.0 INSTRUMENTAÇÃO

Para as medições necessárias, no estudo foram usados os seguintes instrumentos: células de carga com amplificadores, sensor indutivo, sensor Hall, sensores de corrente elétrica não invasivos, voltímetro, alicate amperímetro e osciloscópio.

As células de carga determinam o torque mecânico. Foram colocadas uma célula de carga ao lado do motor elétrico e outra ao lado do gerador elétrico. Assim, pode-se obter o torque do motor e do gerador por meio de braços de alavanca que exercem forças sobre as células de carga. O braço de alavanca do motor é de 112,5 mm e o do gerador é de 130,55 mm. Foram selecionadas primeiramente células de carga com capacidade máxima de 30 kg (GL-30). Notou-se que as mesmas estavam superdimensionadas. Posteriormente foram selecionadas células de carga com capacidade máxima de 10 kg.

Os amplificadores são ligados às células de carga. Cada célula de carga necessita de um amplificador com o objetivo de aumentar em 100 vezes o sinal e filtrar os sinais que ela envia para a placa de aquisição.

O sensor indutivo foi colocado próximo à última roda dentada da caixa multiplicadora (roda dentada número 4) para medir a rotação do EAR. Com o resultado desse sensor e da célula de carga 2 pode-se obter a potência de saída do sistema.

O sensor Hall foi colocado para medir a rotação do EBR. O sensor também verifica se a rotação inserida no inversor de frequência está condizente com a medida no experimento. Com o resultado desse sensor e da célula de carga 1 é possível determinar a potência de entrada do sistema.

Os sensores de corrente elétrica não invasivos foram instalados nas fases do inversor de frequência, nas fases do motor elétrico e nas fases que saem do gerador elétrico.

O voltímetro foi ligado em paralelo com o circuito do gerador elétrico para fazer a medição da diferença de potencial elétrico (DDP) do gerador e do motor elétrico. Outra medição foi feita da mesma forma para determinar a tensão elétrica que chega da rede elétrica do laboratório no conversor de frequência

O alicate amperímetro foi utilizado para medir as correntes de entrada e de saída do sistema. Além disso, foi utilizado para verificar se a corrente determinada pelos sensores de corrente elétrica não invasivos estava correta.

O osciloscópio foi utilizado para melhorar a precisão das medições dos dados obtidos e para verificar a qualidade do sinal que sai de cada sensor. Por meio dele também foram determinados os filtros de sinais necessários para cada sensor.

Todo o sistema possui cabos com dupla blindagem para filtrar ruídos de baixa e alta frequência. Os cabos possuem uma malha trançada de alumínio ou cobre e uma camada de papel alumínio.

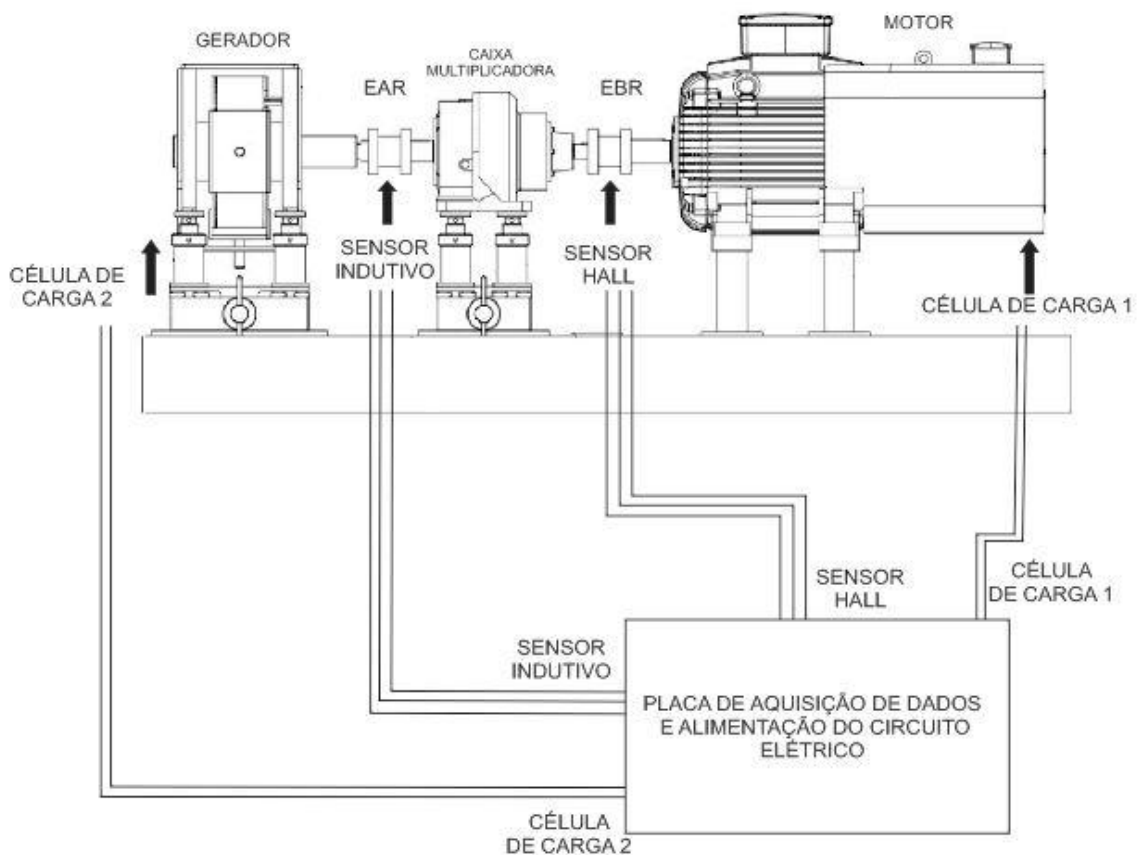


Figura 12 - Circuito completo de instrumentação.

3.1 SELEÇÃO E DESCRIÇÃO DOS INSTRUMENTOS

Com o objetivo de obter os dados experimentais desejados da bancada dinamométrica, foi necessário selecionar alguns instrumentos: conversor de frequência, células de carga e seus amplificadores, sensor indutivo, sensor Hall, sensores de corrente elétrica não invasivos, voltímetro e alicate amperímetro.

A partir de uma análise do *layout* da bancada estabeleceu-se os parâmetros necessários de entrada e saída para caracterização do sistema eletromecânico e obtenção das perdas presentes e da eficiência do mesmo. Estas medições são a corrente de entrada e de saída do sistema, diferença de potencial elétrico no motor e no gerador elétrico, torque gerado pelo motor (torque acionador) e pelo gerador (torque eletromagnético) e, finalmente, rotação nos eixos de alta e baixa rotação.

3.1.1 CONVERSOR OU INVERSOR DE FREQUÊNCIA

O conversor de frequência Danfoss VLT 2800 permite o acionamento do motor para várias rotações e é capaz de manter a rotação do motor constante durante um determinado tempo. Por questão de segurança e para eliminar ruídos elétricos presentes no sistema, o inversor foi ligado ao aterramento do laboratório.

A tensão alternada e a frequência de entrada do inversor foram 380 V e 60 Hz respectivamente. A tensão de saída do inversor chegou a 387 V com uma corrente de 4,7 A. A corrente é maior que a esperada porque a rotação no motor é baixa.

Já a frequência de saída do inversor foi variada entre 1,5 Hz e 3,5 Hz. Abaixo de 1,5 Hz, o motor elétrico não possui potência suficiente para fazer o sistema girar. E acima de 3,5 Hz, a velocidade é muito superior às velocidades médias dos ventos que atingem as turbinas estudadas.

A velocidade tangencial v_{ro} do rotor é descrita por:

$$v_{ro} = \omega_{ro} \cdot r_{ro} \quad (16)$$

onde ω_{ro} é a velocidade angular e r_{ro} é o raio do rotor. A partir da definição de período da rotação Q_{ro}

$$\omega_{ro} = \frac{2 \cdot \pi}{Q_{ro}} = 2 \cdot \pi \cdot f_{ro} \quad (17)$$

Por fim, tem-se:

$$f_{ro} = \frac{v_{ro}}{2 \cdot \pi \cdot r_{ro}} \quad (18)$$

onde:

v_{ro} é a velocidade tangencial do rotor, [m/s];

ω_{ro} é a velocidade angular do rotor, [rad/s];

r_{ro} é o raio do rotor da turbina, [m];

Q_{ro} é o período de uma rotação do rotor, [s];

f_{ro} é a frequência de entrada do motor elétrico, [Hz];

3.1.2 CÉLULA DE CARGA

Para a medição do torque gerado no motor elétrico e no gerador elétrico, usaram-se células de carga e braços de alavanca. As forças foram medidas pelas células de carga. O torque é determinado pelo produto da força da célula de carga e do comprimento dos braços de alavanca.

A célula de carga converte força mecânica em sinais elétricos. Há várias formas de fazer essa conversão, no caso do presente estudo a medição é do tipo extensômetro e utiliza Pontes de *Wheatstone* em seu circuito elétrico.

Nesse tipo de montagem, os extensômetros são montados sobre filmes que deformam ao sofrer tração ou compressão. Essa deformação é a variação do comprimento dividido pelo comprimento inicial proporcional a força aplicada. Assim, conhecendo as características estruturais da célula de carga é possível calcular a força aplicada sobre a mesma.

Para o cálculo da deformação é montada uma Ponte de *Wheatstone* com quatro extensômetros com função de braço resistivo. A variação no extensômetro então altera a resistência dos braços resistivos. O uso da Ponte de *Wheatstone* torna-se necessário para melhorar a percepção desta deformação.

As primeiras células de cargas utilizadas foram do modelo GL – 30, com capacidade nominal de 30 kg. Elas estavam superdimensionadas e não captaram de forma eficaz as forças exercidas pelos braços de alavanca do motor e do gerador. Posteriormente, foram selecionadas células de carga com capacidade nominal de 10 kg, retiradas de balanças da marca Tomate, e os torques nos pontos desejados do sistema foram medidos.

3.1.3 CONDICIONADOR E AMPLIFICADOR DE SINAL

Os condicionadores de sinais, na maioria das vezes, possuem amplificadores de sinais e têm a função de filtrar o sinal de forma a eliminar as frequências indesejadas e os ruídos.

Os amplificadores são necessários porque na maioria das células de carga o sinal sai com nível baixo, algo em torno de 10 mV/V. Com o uso deles, o nível do sinal aumenta gerando ganho na qualidade do sinal porque a resolução da medição aumenta e a relação sinal-ruído é otimizada.

No caso dos amplificadores utilizados, foram necessárias algumas modificações nos circuitos elétricos para filtrar os ruídos gerados no motor e no inversor e, assim, melhorar a coleta do sinal e os dados vindos das células de carga. Além disso, foi fabricada uma caixa de alumínio para servir como Gaiola de Faraday impedindo a interferência dos campos magnéticos gerados no inversor e no motor elétrico nos amplificadores das células de carga.

3.1.4 SENSOR INDUTIVO E SENSOR HALL

Para medir a rotação do EBR e do EAR foram selecionados tipos de sensores distintos. A rotação do EBR é determinada pelo inversor de frequência e medida pelo sensor do tipo Hall. Já a rotação do EAR é medida pelo sensor do tipo indutivo.

No motor elétrico a rotação é determinada pelo conversor de frequência. A verificação dessa rotação foi feita por um sensor Hall. Para que o sensor Hall pudesse ser utilizado foi necessária a fixação de um ímã de neodímio no EBR. O ímã de neodímio é necessário porque o mesmo gera um campo magnético mais intenso que o de um ímã de magnetita. O sensor Hall é feito com material semicondutor e gera um pulso elétrico na presença de campo magnético.

O sensor indutivo é utilizado normalmente em alguns processos de automação quando há necessidade de contagem de produtos ou de medições de rotações. Nesse sensor há uma bobina de indução na superfície onde é feita a medição que gera um campo magnético. A aproximação de um objeto metálico diminui o campo magnético devido à absorção deste campo pelo objeto, surgindo uma corrente parasita no sensor e gerando um pulso elétrico. Para fazer a medição da rotação do EBR no presente estudo, foi adicionada uma pequena placa de aço na porca que prende a engrenagem 5 ao eixo EBR.

3.1.5 SENSOR DE CORRENTE NÃO INVASIVO

Para medir as correntes de entrada no motor trifásico e as correntes de saída do gerador elétrico foram instalados três sensores de corrente não invasivos do tipo YHDC 100A SCT 013, sendo um sensor em cada fase. Esses sensores são também conhecidos como transformadores de corrente por ter funcionamento parecido com os transformadores de tensão. Eles possuem dois enrolamentos com números de espiras distintos, o que faz com que a corrente alternada que sai das espiras seja diferente.

Os sensores de corrente não invasivos funcionam por indução de campo magnético e, dessa forma, eles não influenciam nas características eletromagnéticas do fio estudado. As correntes alternadas que passam pelos fios em questão geram campos magnéticos que, por sua vez, alteram os campos magnéticos dos sensores. Essas alterações geram então correntes nas saídas dos sinais dos sensores. Há sensores de corrente em que a alteração do campo magnético gera diferença de potencial na saída dos mesmos.



Figura 13 – Sensor de corrente não invasivo.

3.1.6 VOLTÍMETRO E ALICATE AMPERÍMETRO

Para medir a tensão de saída de cada sensor e também as tensões presentes no motor e no gerador elétrico usou-se um multímetro Minipa ET-2082A na função de voltímetro. Ele foi utilizado na calibração dos sensores de forma a verificar se a tensão de saída dos sensores ficava abaixo dos 5 V suportados pela placa de aquisição. O sensor indutivo e o gerador elétrico possuem tensão de saída maior que os 5 V desejados, assim é necessário criar um divisor de tensão.

Para verificar a corrente de entrada do motor elétrico e para verificar a corrente de saída do gerador elétrico foi utilizado o alicate amperímetro da marca ICEL GUBINTEC AW-2500.

3.1.7 OSCILOSCÓPIO E CALIBRADOR

O osciloscópio modelo Tektronix TDS 2012 (dois canais) 100 MHz 1 GS/s foi utilizado, primeiramente, para verificar a DDP gerada nos sensores e se ela ultrapassava a tensão máxima de $\pm 5V$ (placa de aquisição). Posteriormente, o osciloscópio foi utilizado para verificar o tipo de sinal e a qualidade dos sinais gerados nos sensores. Desta forma, foi possível tratar os sinais e eliminar a maior parte dos ruídos.

Para calibrar os sensores de correntes elétricas não invasivos utilizou-se o calibrador FLUKE 5500A e o multímetro Agilent 34401A. O calibrador gerou uma corrente conhecida e o multímetro fez a aferição da DDP gerada no sensor. Com os dados obtidos é possível traçar um gráfico e calibrar os sensores.

3.1.8 DIVISOR DE TENSÃO

Um divisor de tensão é uma técnica utilizada para baixar a tensão de saída de forma proporcional à tensão de entrada de um circuito elétrico. A montagem do divisor de tensão é representada na figura abaixo.

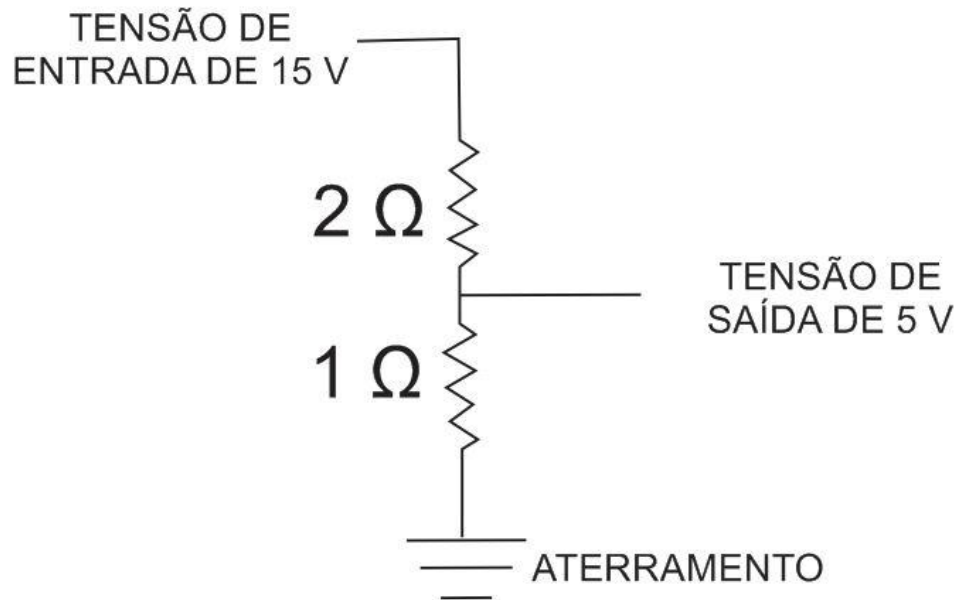


Figura 14 - Divisor de tensão.

O sensor indutivo é alimentado com 15 V e gera sinal digital com a mesma DDP. Como a placa de aquisição de sinal suporta apenas ± 5 V utilizou-se um divisor de tensão como o mostrado na Figura 14. Nessa mesma figura observa-se que há dois resistores em série entre a tensão de 15 V e o aterramento. Com resistores em série a corrente é constante e a tensão é dividida proporcional à resistência.

Pela lei de Ohm, sabe-se:

$$U = R \cdot i \quad (19)$$

onde:

U é a tensão elétrica, [V];

R é a resistência elétrica, [Ω];

i é a corrente elétrica, [A];

Por fim, conclui-se que o resistor de 2 Ω tem uma tensão de 10 V e o resistor de 1 Ω terá uma tensão de 5 V.

Para a aquisição do sinal 5 V liga-se a placa de aquisição em paralelo com o resistor de 1 Ω .

3.1.9 CONTRAPESO DO MOTOR ELÉTRICO

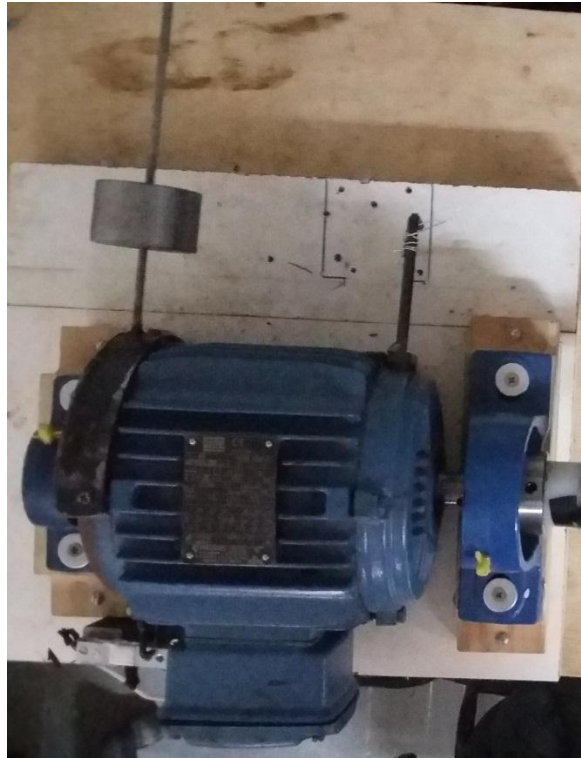


Figura 15 - Contrapeso instalado no motor elétrico.

Como o motor elétrico está em balanço e possui a fiação elétrica e a caixa protetora à esquerda (parte inferior da Figura 15), tornou-se necessária a fabricação de um contrapeso (parte superior da Figura 15) para atingir o equilíbrio do motor. O contrapeso é composto por uma massa, um fuso e uma estrutura de aço em forma de semiarco. A massa é rosqueada ao fuso e o fuso é soldado à estrutura de aço. A estrutura de aço é fixada à carcaça do motor por meio de três parafusos.

3.2 MONTAGEM DA BANCADA DINAMOMÉTRICA E LOCALIZAÇÃO DOS INSTRUMENTOS

Com o *layout* da bancada dinamoétrica já predefinido na Figura 8, **Erro! Fonte de referência não encontrada.** com os dados que deviam ser obtidos já determinados e com a instrumentação necessária definiu-se como seriam feitas a montagem e a instrumentação da bancada dinamoétrica. Além disso, foram definidos os itens a serem reaproveitados, comprados e fabricados.

Os itens reaproveitados foram: conjunto formado pelos eixos de alta e baixa rotação, caixa multiplicadora e gerador elétrico utilizado por Felippes (2012) e Sousa & Oliveira (2010); Motor elétrico e inversor de frequência.

A primeira parte do projeto foi o dimensionamento e a fabricação da base da bancada dinamoétrica. Concluiu-se que o material a ser usado seria madeira compensada. O uso desse

material diminui a massa e a vibração do sistema se comparado a alguns tipos de metais. Outra razão para o uso desse material é a facilidade de execução da fabricação já que a UnB possui uma marcenaria em seu campus.

Assim que a base de madeira compensada foi fabricada, foram colocados sobre ela os itens que seriam reaproveitados e notou-se que para acoplar o motor elétrico ao EBR teria que ser fabricado um acoplamento em nylon. Além disso, teriam que ser comprados mancais com rolamentos para que o motor ficasse em balanço e teria que ser fabricada uma base para o motor elétrico ficar nivelado com o EBR.

Com o motor elétrico acoplado, nivelado com o EBR e em balanço notou-se que a caixa onde a fiação é guardada mantinha o motor sempre pendendo para o lado esquerdo. Percebeu-se a necessidade de um contrapeso. O contrapeso foi projetado e instalado.

A segunda parte do projeto foi selecionar os sensores que seriam utilizados e onde cada um deles ficaria. Como já mencionado, os sensores adquiridos foram: sensor Hall, sensor indutivo, sensores de corrente não invasivos e células de carga. Como também já foram mencionados, os sensores de corrente não invasivos foram colocados na entrada do motor elétrico e na saída do gerador elétrico; os sensores de rotação (sensor Hall e sensor indutivo) foram colocados no EBR e no EAR, respectivamente; as células de carga foram colocadas paralelas ao motor elétrico e ao gerador elétrico para fazerem as medições das forças geradas em cada um deles, mas, para isso, foram necessárias as fabricações dos braços de alavanca. Para fixar e posicionar corretamente os sensores de rotação e as células de carga foram fabricados suportes de metal e de madeira (para o sensor Hall).

Por fim, para verificar o funcionamento dos sensores e se a montagem foi feita de forma satisfatória, foram realizados testes e calibrações na bancada dinamométrica.

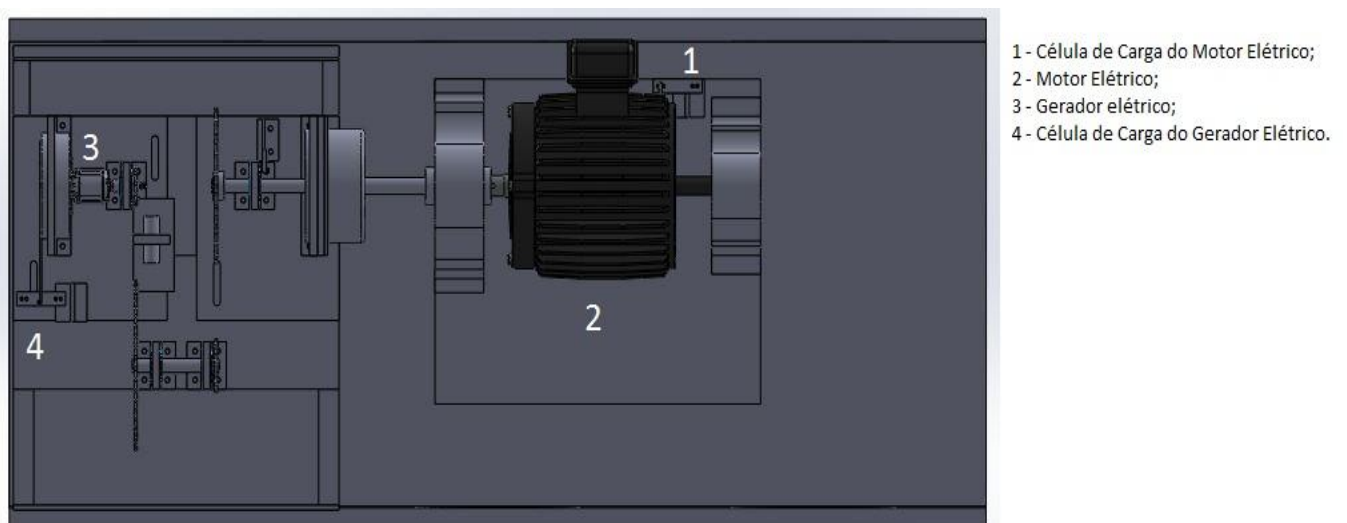


Figura 16 - Vista superior da bancada dinamométrica.

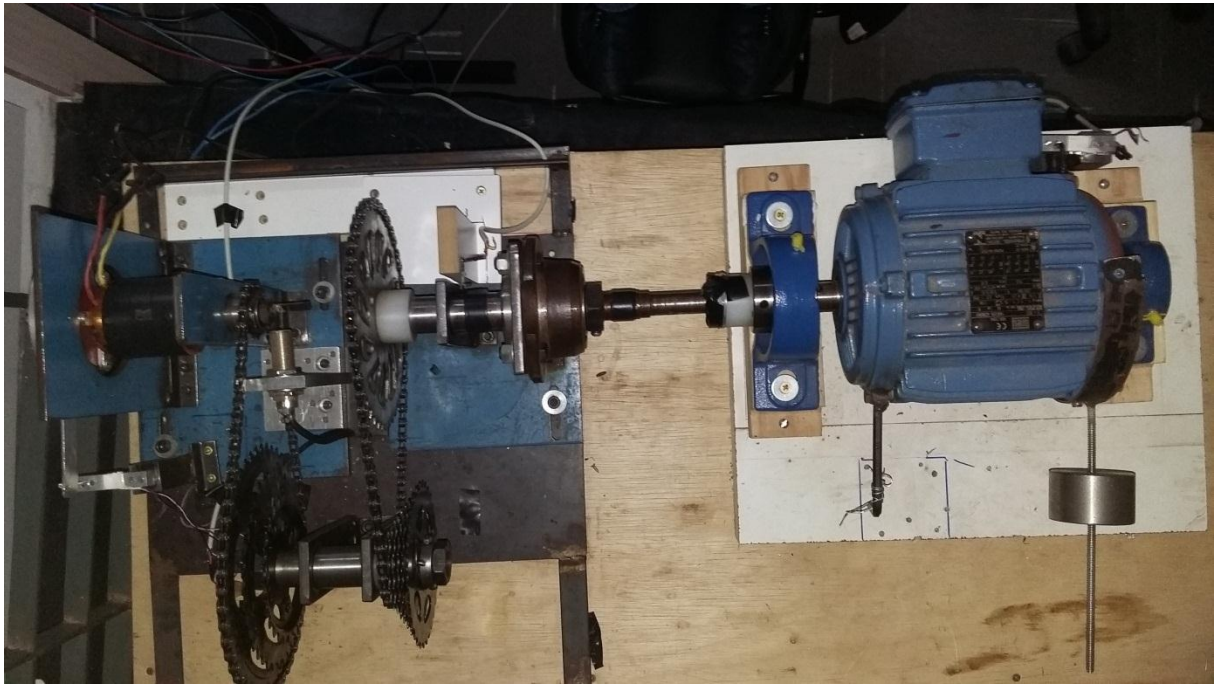


Figura 17 - Vista superior da bancada dinamoétrica.

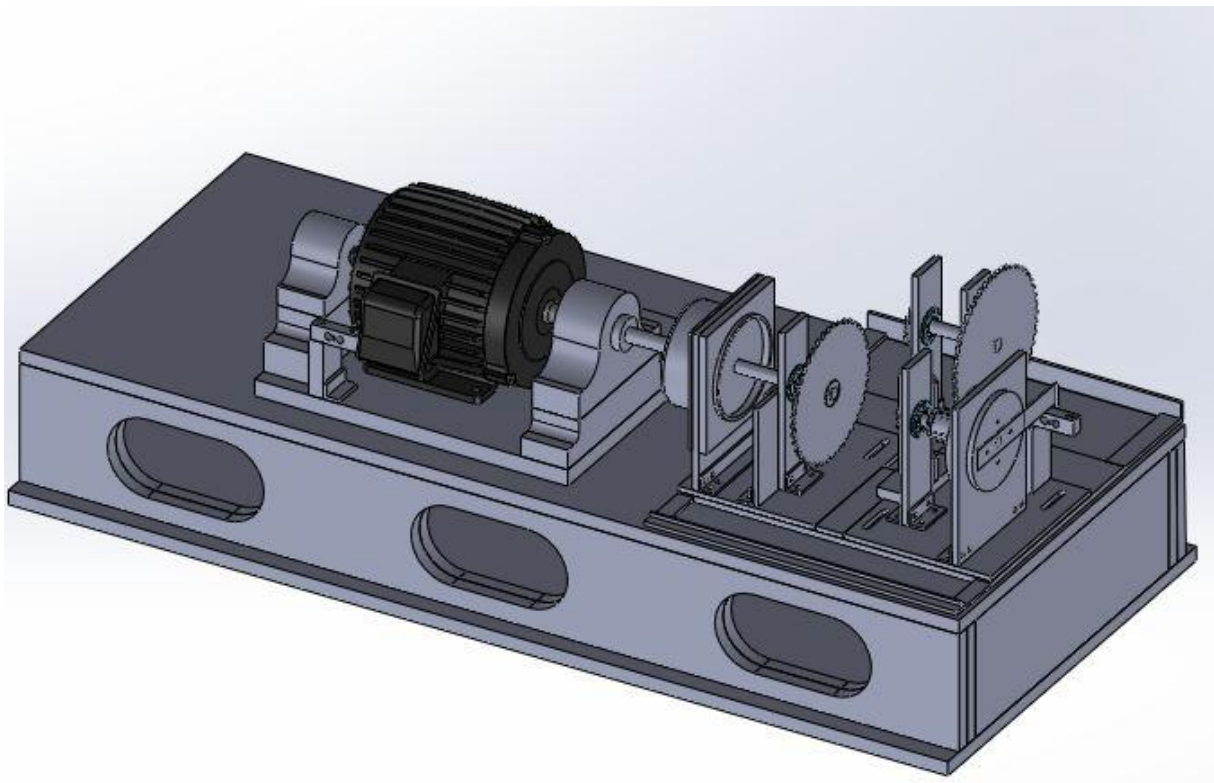


Figura 18 – Vista isométrica da bancada dinamoétrica.

3.3 CALIBRAÇÃO

As calibrações dos sensores serviram para a verificação dos dados cedidos pelos fabricantes, para certificar os locais de instalações predeterminados no projeto, para a avaliação da qualidade dos sinais captados pelos sensores e para a avaliação dos ruídos presentes no circuito elétrico.

3.3.1 CÉLULAS DE CARGA

Os seguintes instrumentos foram utilizados para a calibração das células de carga:

- 1) Fonte de alimentação de 15 Volts;
- 2) Voltímetro;
- 3) Suporte para massas;
- 4) Gancho de fixação;
- 5) Condicionadores com amplificadores;
- 6) Massa de vários valores.

As calibrações das células de carga foram feitas separadamente. O mesmo processo foi realizado para as células de 10 kg e de 30 kg. Determinou-se que a célula de carga 1 era para o motor elétrico e a célula de carga 2 para o gerador. O primeiro conjunto calibrado foi o GL-30 kg e, posteriormente, calibrou-se o conjunto Tomate-10 kg.

Para que a calibração se aproximasse das condições reais de experimento, ligaram-se as células de carga aos condicionadores com amplificadores. A calibração realizada seguiu as seguintes etapas:

- 1) Ligou-se a célula de carga à fonte de 15 V e ao voltímetro para captação do sinal de acordo com o manual do fabricante;
- 2) A célula de carga foi fixada em uma extremidade da bancada de forma que o suporte preso à célula de carga ficasse pendurado;
- 3) Ligou-se a fonte e o voltímetro;
- 4) Retirou-se o suporte e mediu-se a DDP com a célula de carga sem estar carregada;
- 5) O suporte foi adicionado e a DDP foi medida;
- 6) Adicionou-se ao sistema a massa M1 e a DDP foi medida;
- 7) Adicionou-se ao sistema a massa M2 e a DDP foi medida;
- 8) Adicionou-se ao sistema a massa M3 e a DDP foi medida;
- 9) Adicionou-se ao sistema a massa M4 e a DDP foi medida;
- 10) Adicionou-se ao sistema a massa G1 e a DDP foi medida;

- 11) Adicionou-se ao sistema a massa G2 e a DDP foi medida;
- 12) Adicionou-se ao sistema a massa G31 e a DDP foi medida;

Para melhorar os dados obtidos nos primeiros experimentos, fez-se nova calibração com massas menores (Tabela 3) e usou-se o osciloscópio para medir a DDP gerada.

Após a aquisição dos dados traçaram-se gráficos relacionando as massas dos sistemas às DDPs geradas nas células de carga. Nos gráficos nota-se uma relação de primeiro grau e pode-se obter a equação da reta após determinar a linha de tendência.

Segue abaixo as tabelas com as variações das massas e DDPs medidas e seus respectivos gráficos:

Tabela 1 - Dados obtidos da calibração das células de carga modelo GL - 30 kg.

Célula de carga GL-30 kg		
Massa [kg]	DDP da Célula de Carga 1 [V]	DDP da Célula de Carga 2 [V]
0,000	0,01	0,01
0,102	0,02	0,02
0,388	0,04	0,04
0,674	0,05	0,06
0,960	0,07	0,08
1,410	0,10	0,11
2,366	0,16	0,17
3,322	0,23	0,24
4,278	0,29	0,30

Tabela 2 - Dados obtidos da calibração das células de carga modelo Tomate - 10 kg.

Célula de carga Tomate-10 kg		
Massa [kg]	DDP da Célula de Carga 1 [V]	DDP da Célula de Carga 2 [V]
0,000	0,02	0,19
0,106	0,29	0,29
0,606	0,41	0,74
1,106	0,77	1,27
1,606	1,10	1,73
2,106	1,48	2,24
2,606	1,79	2,69
3,106	2,17	3,23
3,606	2,47	3,70

Tabela 3 - Segunda calibração da célula de carga 2 (Tomate 10 kg).

Célula de carga 2 - Tomate 10 kg	Massa [kg]	DDP [V]
VAZIO	0,000	0,012
suporte	0,116	0,024
suporte + M1	0,414	0,052
suporte + M1+M2	0,713	0,084
suporte + M1+M2+M3	1,013	0,112
suporte + M1+M2+M3+M4	1,481	0,156

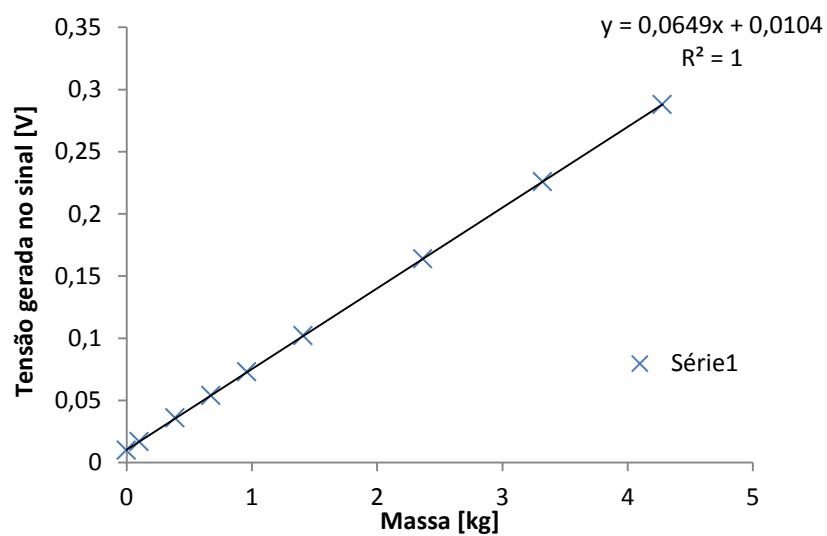


Figura 19 - Relação da massa com a DDP gerada na célula de carga 1 da GL-30kg.

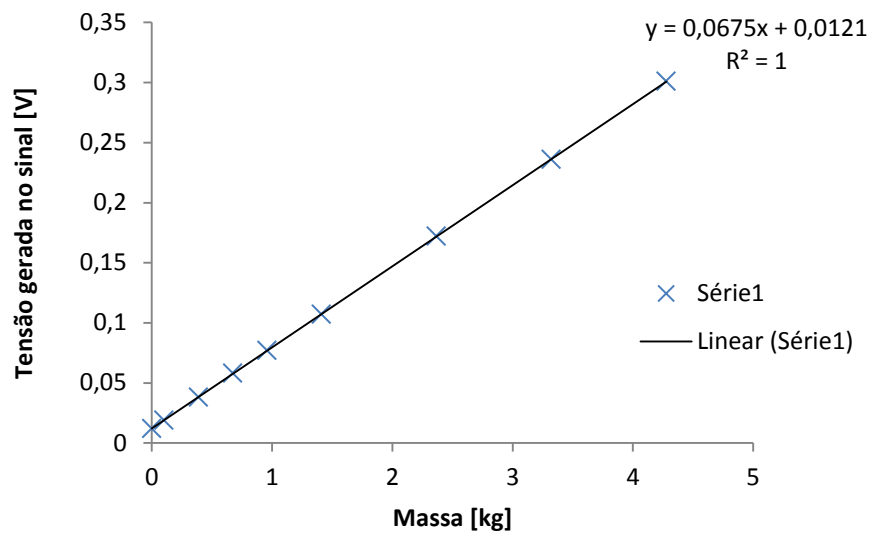


Figura 20 - Relação da massa com a DDP gerada na célula de carga 2 da GL-30kg.

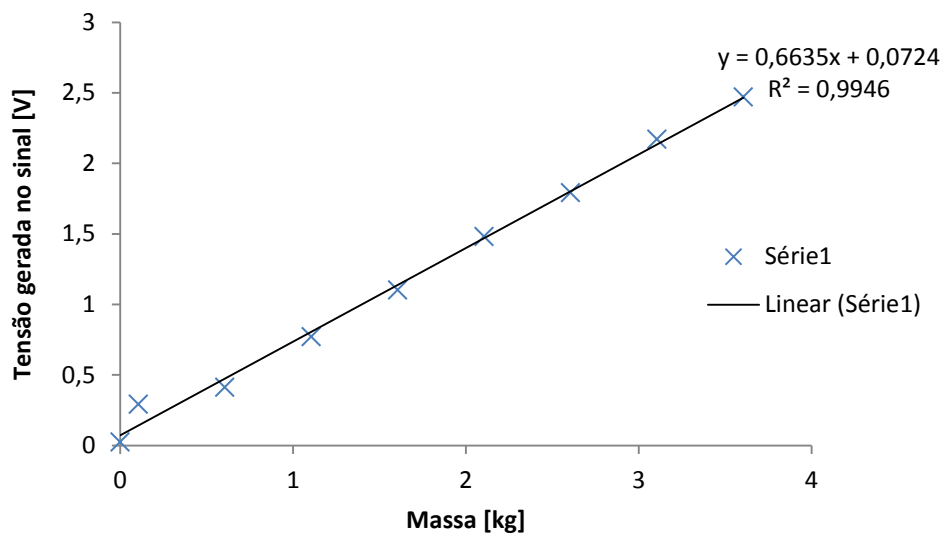


Figura 21 - Relação da massa com a DDP gerada na célula de carga 1 da Tomate-10kg.

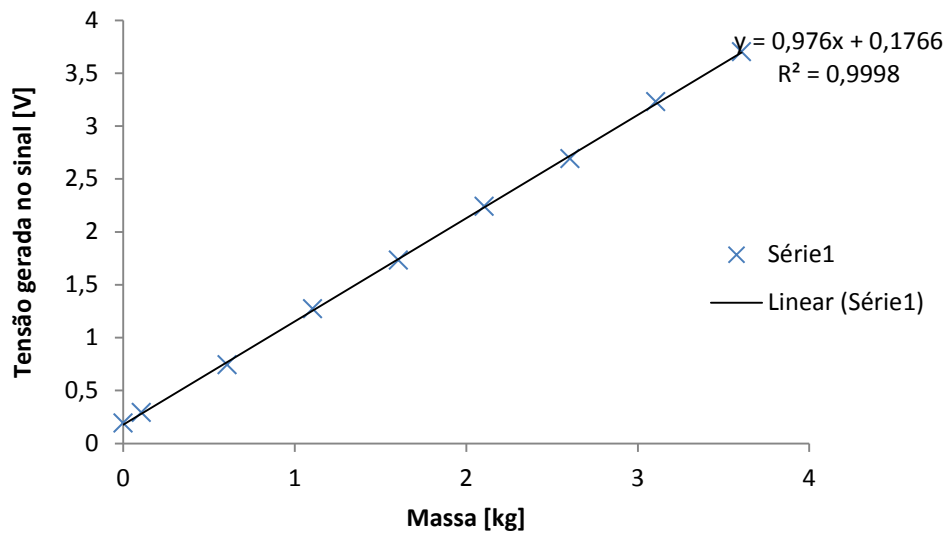


Figura 22 - Relação da massa com a DDP gerada na célula de carga 2 da Tomate-10kg.

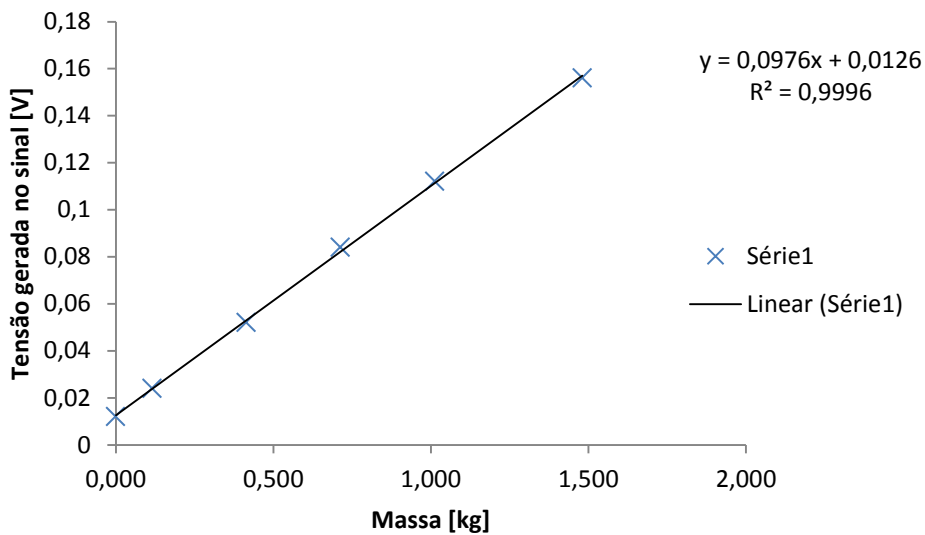


Figura 23 – Relação da massa com a DDP gerada na célula de carga 2 da Tomate-10kg no segundo experimento.

Pode-se observar que todas as células de carga possuem uma relação linear entre a massa e a tensão.

Nota-se também que a variância é pouca quando se faz a linha de tendência. Alguns gráficos apresentam pontos fora da linha devido aos erros instrumentais ou de medição.

Por fim, nota-se que nenhuma linha de tendência passa pela origem do gráfico. Isso ocorre devido à própria massa da célula de carga.

3.3.2 SENSORES DE CORRENTE NÃO INVASIVOS

A calibração ocorreu da seguinte forma:

- 1) Ligou-se o gerador de corrente e gerou-se uma corrente conhecida;

- 2) Colocou-se um fio ligado ao gerador de corrente de forma que o circuito estivesse fechado;
- 3) Inseriu-se o fio nos sensores de corrente não invasivos;
- 4) Mediram-se as correntes que foram geradas nos sensores de corrente não invasivos;
- 5) Modificou-se a corrente em 1A, de forma que a corrente variasse de 1 a 10 Ampères;
- 6) Fizeram-se gráficos relacionando as correntes do fio e as dos sensores de corrente não invasivos;

A calibração realizou-se em todos os sensores de corrente não invasivos de forma separada.

A curva obtida para cada gráfico apresentou-se linear como o esperado. Notou-se que o erro experimental é de ordem menor que o da calibração. Assim, não é possível ver a distinção entre a curva gráfica e a curva de tendência como pode ser visto nas figuras abaixo.

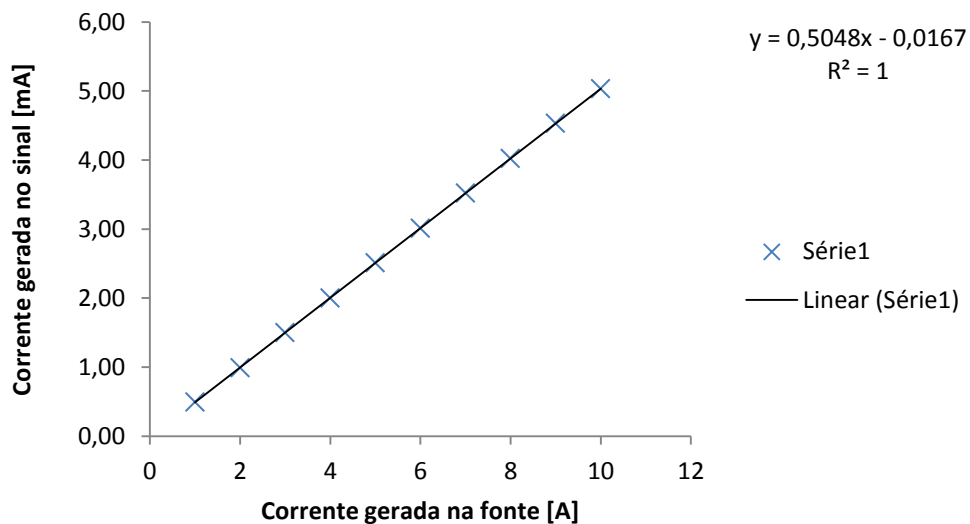


Figura 24 - Calibragem do Sensor de Corrente Não Invasivo 1.

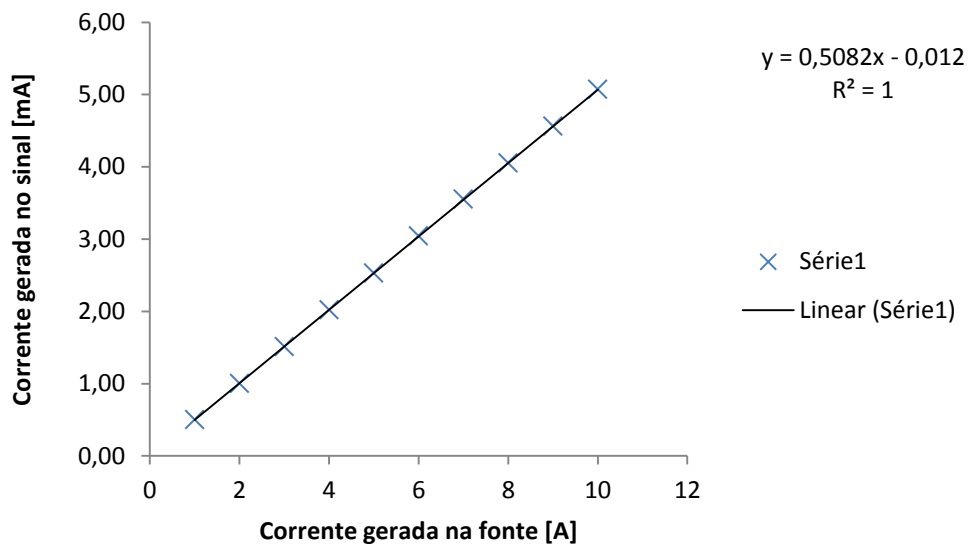


Figura 25 - Calibragem do Sensor de Corrente Não Invasivo 2.

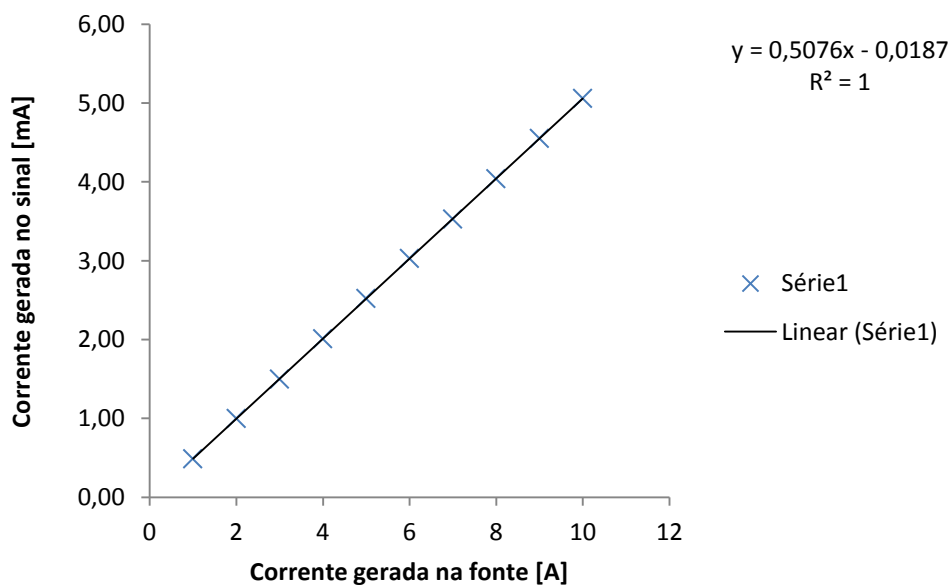


Figura 26 - Calibragem do Sensor de Corrente Não Invasivo 3.

Os sensores de corrente não invasivos apresentam todos os dados em cima das linhas de tendência. Portanto, nota-se que os instrumentos são confiáveis.

3.3.3 SENSORES DE ROTAÇÃO

As calibrações dos sensores de rotação foram mais simples, pois eles são sensores digitais e trabalham de forma booleana, ou seja, só há dois valores de tensões possíveis - um valor da tensão quando são ativados e outro quando não são. Por ter apenas picos rápidos de sinais e para facilitar a leitura deles, utilizou-se o osciloscópio na calibração desses sensores.

A calibração do sensor indutivo realizou-se da seguinte forma:

- 1) Ligou-se o sensor indutivo a uma *protoboard* e fez-se o circuito elétrico como o indicado no manual desse sensor. Assim, os fios azul e marrom foram ligados à fonte de 15 V. Já os fios branco e preto são os sinais gerados no sensor;
- 2) Instalou-se uma placa metálica na ponte do EAR;
- 3) Ligou-se o osciloscópio ao fio branco e ao polo neutro da *protoboard* para fazer a leitura do sinal. A mesma ligação também foi feita para o fio preto, para verificar se havia diferença entre os sinais. Não houve diferença significativa entre os sinais;
- 4) Ligou-se o motor elétrico e ajustou-se a velocidade de rotação pelo inversor de frequência;
- 5) Ajustou-se o sinal lido pelo osciloscópio e verificou-se um sinal quase quadrado.
- 6) Verificou-se que os resultados batiam com o esperado, ou seja, o sinal era de 15 V quando a placa metálica se aproximava e nulo quando a mesma se afastava e notou-se que a relação de multiplicação na caixa multiplicadora era satisfeita ao comparar a frequência do EAR e a gerada no inversor de frequência.

Outra observação realizada na calibração é em relação ao LED presente nesse sensor. O LED indica que o sensor está funcionando e que não houve inversão entre o fio da fase e do neutro (o sensor indutivo e o Hall trabalham com corrente contínua).

A calibração do sensor Hall realizou-se da seguinte forma:

- 1) Ligou-se o sensor Hall à *protoboard* de forma que ele fosse alimentado em 5 V;
- 2) Ligou-se um resistor em série com um LED. Esses dois componentes foram alimentados na tensão gerada entre o sinal e o neutro;
- 3) Fixou-se um ímã de neodímio ao EBR;
- 4) Ajustou-se a distância entre o ímã e o sensor Hall. Verificou-se que o LED ficava aceso quando o ímã não estava próximo ao sensor; e com a aproximação do ímã, o LED apagava;
- 5) Ligou-se o osciloscópio na saída do sinal e no neutro;
- 6) Colocou-se o motor para girar em uma frequência conhecida e comparou-se com o sinal captado pelo osciloscópio e pelo LED. Os resultados obtidos foram satisfatórios.

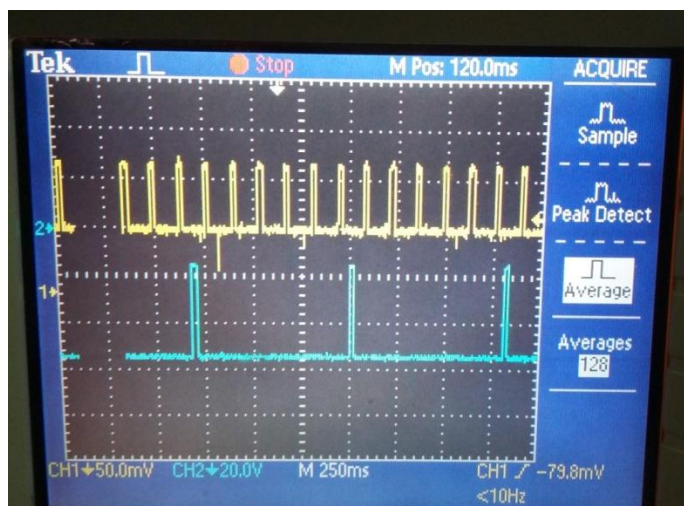


Figura 27 - Aquisição de dados dos sensores de rotação (Azul: sensor indutivo; Amarelo: sensor Hall).

3.4 AQUISIÇÃO DE DADOS

Na aquisição de dados utilizou-se o osciloscópio. A Figura 27 exemplifica os dados obtidos no osciloscópio quanto à leitura dos sensores de rotação. Na imagem nota-se uma multiplicação remetente a primeira relação da caixa multiplicadora utilizada na bancada dinamométrica, ou seja, a relação é de 1:6. Posteriormente, a multiplicação foi aumentada para 1:12,8 e novas medições foram feitas de forma satisfatória.

3.4.1 PLACA DE CIRUITO ELÉTRICO PARA AQUISIÇÃO DE DADOS E ALIMENTAÇÃO DOS SENSORES

Para substituir a *protoboard* utilizada na calibração dos sensores e para organizar a parte elétrica dos sensores presentes na bancada dinamométrica, fabricou-se uma placa com circuitos elétricos. A placa possui alimentação de 15 V, mas possui divisores de tensão para alimentar o sensor Hall e para diminuir a tensão do sinal do sensor indutivo. Ela possui a alimentação e o sinal de todos os sensores.

O esquema elétrico e um esboço da placa podem ser vistos nas duas figuras seguintes.

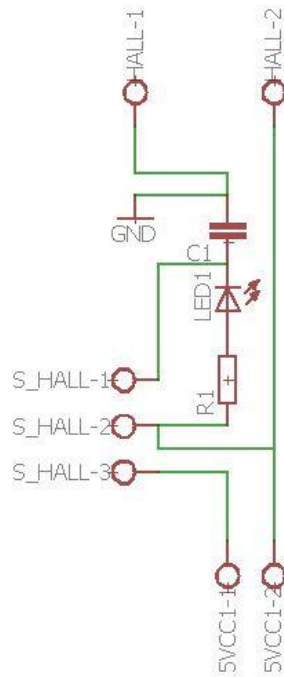


Figura 28 – Esquema do circuito elétrico do sensor Hall.

O circuito elétrico da Figura 28 é alimentado com uma fonte de 5 V com corrente contínua (parte inferior). Os dados são coletados nos dois conectores da parte superior da mesma figura. O sensor Hall possui três conexões (conectores na parte esquerda da figura). A S_HALL -3 é a alimentação e está ligada diretamente com a fase da fonte. O segundo conector (S_HALL-2) é o aterramento e está ligado com o neutro da alimentação. Por fim, o conector S_HALL-1 é o do sinal. Esse deixa de emitir pulsos quando o sensor é ativado. O LED serve para mostrar que o sensor funciona. O resistor serve como um dispositivo de segurança para o LED, absorvendo parte da corrente que passa pelo circuito. O capacitor é usado para melhorar o sinal da aquisição, mantendo o sinal mais constante.

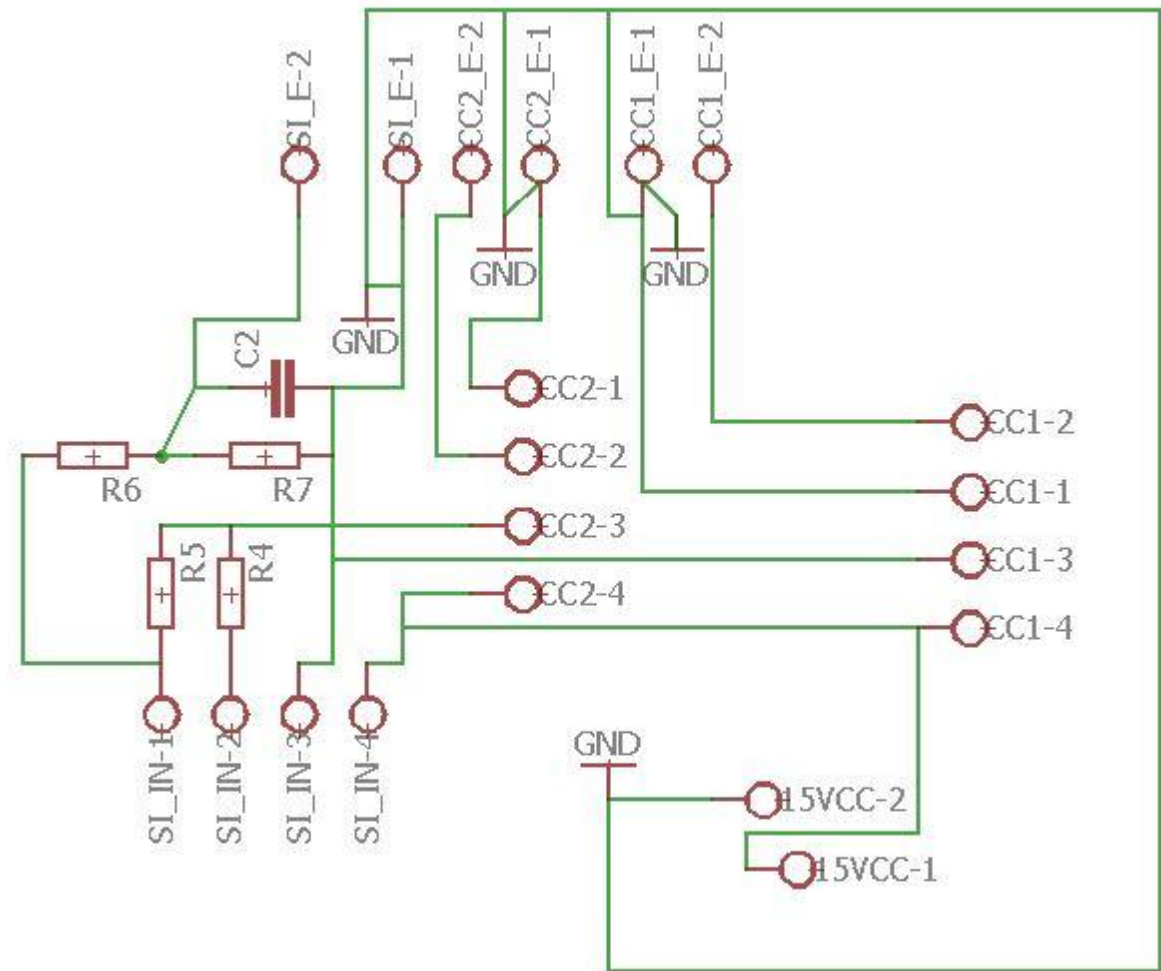


Figura 29 - Circuito elétrico das células de carga e do sensor indutivo.

O circuito elétrico da Figura 29 é alimentado com uma tensão de 15 V com corrente contínua. A aquisição de dados é feita na parte superior da figura.

O sensor indutivo possui 4 conectores, mas para a leitura são utilizados apenas 3. Ele é representado pelas iniciais “SI”, sendo que na parte inferior é a entrada do sensor e na parte superior é a saída do sinal gerado por ele. O circuito elétrico do sensor indutivo possui 4 resistores, sendo o R4 e o R5 definidos pelo manual e o R6 e o R7 o divisor de tensão citado anteriormente. Mais uma vez há um capacitor no circuito para eliminar ruídos.

As células de carga também possuem 4 conectores em suas entradas - dois deles são de alimentação e dois de sinal. Elas foram representadas pelas iniciais “CC” e foram colocadas na parte direita inferior do circuito acima.

4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos por meio de experimentos realizados na bancada dinamométrica. Também é feita uma reflexão sobre tais resultados com o objetivo de analisar se eles condizem com o que era esperado.

4.1 CÉLULAS DE CARGA

Os resultados das células de carga, no geral, foram satisfatórios. As células de carga do modelo GL- - 30 kg mostraram não ser aconselháveis para o experimento, visto que elas estão superdimensionadas e não captam de forma eficaz as pequenas forças aplicadas pelo gerador. As células de carga Tomate de 10 kg são as mais aconselháveis para o experimento porque os dados ficaram mais próximos do que era esperado.

Notou-se que para baixas rotações o sensor não é capaz de medir com precisão. O aumento da rotação melhora a aquisição dos dados na célula de carga do gerador.

A inclusão de cabos blindados no sistema melhorou a aquisição de dados das células de carga porque eliminou os ruídos presentes no sistema.

4.2 SENSORES DE ROTAÇÃO

Os sensores de rotação foram os que apresentaram os melhores resultados. O uso de sensores digitais facilita a aquisição de dados por terem apenas dois valores aceitos. A relação de multiplicação e a rotação foram medidas de forma fácil com o osciloscópio.

4.3 SENSORES DE CORRENTE NÃO INVASIVOS

Os sensores de corrente não invasivos foram pouco utilizados. Para medir a corrente no sistema usou-se o alicate amperímetro. Ele mede a corrente elétrica de forma rápida e eficaz e sem a necessidade de romper o fio ou de fazer a conversão de unidades. O alicate amperímetro foi usado porque a corrente não varia quando se mantém a rotação e a resistência do circuito constantes.

4.4 EXPERIMENTOS FINAIS

O experimento final foi realizado para verificar se a bancada dinamométrica funcionava como o esperado. O experimento consistiu em inserir no inversor de frequência frequências entre 1,5 e 3,5 Hz e coletar os dados obtidos pelos sensores. Depois os dados foram analisados para verificar se eles se aproximavam dos resultados esperados.

O experimento foi realizado três vezes para a verificação dos erros de medição, verificação da precisão e da acurácia dos instrumentos. As médias dos resultados foram utilizadas para realização dos cálculos.

Após a análise dos resultados, fizeram-se as seguintes observações:

a) As rotações medidas no sensor Hall são diferentes das medidas inseridas no inversor de frequência. A diferença deve ocorrer devido ao escorregamento.

Tabela 4 – Cálculo do escorregamento no EBR com carga no gerador.

Sistema com carga no Gerador (resistor de 0,4 Ω)				
Frequência no Inversor [Hz]	Frequência no Sensor Hall [Hz]	Velocidade no Inversor [rpm]	Velocidade no Sensor Hall [rpm]	Escorregamento
1,50	0,28	90,00	16,86	81%
2,00	0,95	120,00	57,12	52%
2,50	1,15	150,00	69,00	54%
3,00	1,32	180,00	78,96	56%
3,50	1,45	210,00	86,94	59%

Tabela 5 – Cálculo do escorregamento no EBR sem carga no gerador.

Sistema sem carga no Gerador (resistor de 1,4 Ω)				
Frequência no Inversor [Hz]	Frequência no Sensor Hall [Hz]	Velocidade no Inversor [rpm]	Velocidade no Sensor Hall [rpm]	Escorregamento
1,50	1,06	90,00	63,36	30%
2,00	1,19	120,00	71,40	41%
2,50	1,39	150,00	83,40	44%
3,00	1,54	180,00	92,40	49%
3,50	1,67	210,00	100,02	52%

b) A relação dos torques deveria ser a mesma da relação de multiplicação (1:12,8), mas não é. Isso ocorre devido aos erros na leitura da célula de carga do gerador e às perdas presentes no sistema. O aumento da rotação do gerador melhora a obtenção dos dados porque a força no sistema aumenta e o

braço de alavanca fica mais fixo à célula de carga, melhorando o sinal. No entanto não faz sentido para o experimento aumentar a rotação do motor, pois as turbinas eólicas não trabalham com rotações altas no EBR. A melhor opção seria aumentar a relação de multiplicação na caixa multiplicadora ou diminuir o braço de alavanca.

c) A presença de uma carga (resistor elétrico) na saída do gerador faz diferença nos resultados obtidos no torque. Um curto-circuito na saída do gerador aumenta significativamente o torque medido na célula de carga 2. Como o circuito não pode ficar em curto, coloca-se um resistor de potência com a menor resistência elétrica possível. Nesse caso, o resistor utilizado é um de 0,4 Ω e 10W. Assim, é possível medir o torque eletromecânico no sistema.

O torque dissipativo é encontrado realizando o experimento com o resistor de potência de 1,4 Ω e 10W, pois a carga sobre o gerador é quase nula. Se o circuito elétrico na saída do gerador for deixado aberto a resistência elétrica tenderá para o infinito. Nesse caso, não retratará a realidade porque um gerador elétrico, em uma turbina eólica em funcionamento, está ligado a uma bateria ou a uma rede elétrica.

O torque mecânico é dado pela seguinte fórmula:

$$T_c = T_{em} - T_d \quad (20)$$

Tabela 6 - Torque mecânico nos eixos EBR e EAR.

Torque mecânico			
Frequência [Hz]	T_c (EBR) [N.m]	T_c (EAR) [N.m]	Relação dos torques
1,50	0,06	0,03	1,95
2,00	0,42	0,05	8,39
2,50	0,66	0,05	12,50
3,00	0,78	0,06	12,80
3,50	0,95	0,05	18,17

A Tabela 7 e a Tabela 8 mostram as potências obtidas em cada eixo e na saída do gerador. Nota-se que a partir de 2,5 Hz é possível observar perdas no sistema. Abaixo disso, os dados não são conclusivos.

Tabela 7 - Dados do experimento final com resistor.

Sistema sem carga no Gerador 1,4 Ω									
Frequência [Hz]	EBR			EAR			Gerador		
	Torque [N.m]	Rotação [Hz]	Potência [W]	Torque [N.m]	Rotação [Hz]	Potência [W]	DDP [V]	Corrente [A]	Potência [W]
1,50	0,96	1,06	6,36	0,01	13,89	0,84	1,67	2,50	4,175
2,00	1,88	1,19	14,04	0,04	16,13	4,52	2,25	2,70	6,075
2,50	2,25	1,39	19,69	0,10	17,86	10,90	2,67	3,15	8,4105
3,00	2,52	1,54	24,37	0,12	19,61	15,20	3,02	3,45	10,419
3,50	2,71	1,67	28,35	0,15	21,67	20,37	3,14	3,55	11,147

Tabela 8 - Dados do experimento final com o resistor tendendo a zero.

Sistema com carga no Gerador 0,4 Ω									
Frequência [Hz]	EBR			EAR			Gerador		
	Torque [N.m]	Rotação [Hz]	Potência [W]	Torque [N.m]	Rotação [Hz]	Potência [W]	DDP [V]	Corrente [A]	Potência [W]
1,50	1,02	0,28	1,80	0,04	3,57	0,95	1,65	1,40	2,31
2,00	2,30	0,95	13,76	0,09	12,20	7,28	1,00	3,30	3,3
2,50	2,91	1,15	21,03	0,15	15,15	14,24	1,44	4,30	6,192
3,00	3,30	1,32	27,31	0,18	16,67	19,33	1,77	4,67	8,2659
3,50	3,66	1,45	33,33	0,20	18,52	23,51	2,00	5,20	10,4

5 CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS

Este último capítulo faz um breve comentário sobre os resultados obtidos. Também são dadas sugestões sobre melhoras que podem ser feitas na bancada dinamométrica e sobre estudos que podem ser realizados nela para melhorar a eficiência dos resultados.

5.1 CONCLUSÃO

Após a realização da calibração dos sensores e a realização dos experimentos testes do protótipo da bancada dinamométrica para turbinas eólicas verificou-se que ela é capaz de obter resultados próximos aos esperados.

Para melhorar os resultados nas faixas de menor frequência pode-se diminuir o braço de alavanca que aciona a célula de carga do gerador elétrico. Isso aumenta a força exercida sobre a célula de carga e faz com que o sinal seja melhor captado. O atual sinal é uma onda onde se obtém apenas uma média. Outra modificação que pode ser feita é o aumento da relação da multiplicação da caixa multiplicadora. Isso faz com que as menores frequências do inversor gerem torques capazes de serem captados e o sistema trabalhe com rotações mais próximas das reais.

Ao longo dos experimentos percebeu-se que a rotação do motor elétrico não condiz com a inserida no inversor de frequência. Isso pode ser visto ao comparar os dados do sensor de rotação aos inseridos no inversor. Essa diferença ocorreu devido ao escorregamento gerado pelo esforço do motor. Assim, um motor mais potente pode reduzir o fator de escorregamento.

O uso de cabos duplamente blindados, de uma caixa de alumínio para blindar os amplificadores de sinal e o uso de aterramento no sistema foi muito importante para a filtragem dos sinais captados dos sensores. Antes da utilização desses cabos os ruídos influenciavam no sinal de forma que em alguns casos não era possível diferenciar o ruído do sinal.

Notou-se que o uso de resistores elétricos na saída do gerador elétrico pode influenciar no torque obtido na célula de carga do gerador. Se o circuito elétrico da saída do gerador for deixado aberto o torque não é captado porque não há força suficiente na célula de carga. Se o circuito elétrico for colocado em curto-circuito o torque é bem perceptível, no entanto, o sistema não pode trabalhar em curto porque gera danos a ele. Assim, a alternativa encontrada foi a inserção de resistores de $0,4\Omega$ e de $1,4\Omega$. Quanto menor for a resistência, melhor será a leitura do sinal, pois o sistema estará com carga.

5.2 PERSPECTIVAS

A coleta dos dados e a eliminação dos ruídos podem ocorrer se o atual motor de corrente alternada for substituído por um motor de corrente contínua. Assim, não será necessário o uso do inversor de frequência que é responsável pela maior parte dos ruídos.

A construção de um aterramento somente para a bancada também pode ajudar a melhorar a captação do sinal. O aterramento utilizado foi o presente no próprio laboratório.

O rendimento da caixa multiplicadora pode ser melhorado fazendo um estudo sobre lubrificantes e sobre a tração nas correntes dela. Alguns estudos já realizados como o de Neto (2013) comprovam que as perdas de rendimento sofridas devido ao aumento da tração são bem inferiores se comparadas com os ganhos de potência devido a essa alteração.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- (09 de Maio de 2016). Fonte: <http://www.ni.com/tutorial/7138/pt/>
- (09 de Maio de 2016). Fonte: http://www.digel.com.br/novosite/index.php?option=com_content&view=article&catid=42&id=67&Itemid=69
- (09 de Maio de 2016). Fonte: http://www.digel.com.br/novosite/index.php?option=com_content&view=article&id=70:como-funciona-um-inversor-de-frequencia
- (09 de Maio de 2016). Fonte: <http://www.citisystems.com.br/sensor-indutivo/>
- (09 de Maio de 2016). Fonte: <http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/circuitos-simulados/timers-e-disparadores/258-disparador-de-schmitt-ne0064>
- (26 de Março de 2016). Fonte: <http://www.epe.gov.br/AnuarioEstatisticodeEnergiaEletrica/Forms/Anurio.aspx>
- (26 de Março de 2016). Fonte: <http://www.mme.gov.br/documents/1138787/0/Capacidade+Instalada+de+EE+2014.pdf/cb1d150d-0b52-4f65-a86b-b368ee715463> (4 paginas)
- (26 de Março de 2016). Fonte: http://www.celuladecarga.com.br/portal/?page_id=8
- (26 de Março de 2016). Fonte: <http://www.duke-energy.com.br/usinas/Paginas/UHE-e-PCH.aspx> (diferença entre CGH, PCH e UHE)
- (26 de Março de 2016). Fonte: <https://evolucaoenergiaeolica.wordpress.com/energia-eolica-no-mundo/>
- (26 de Março de 2016). Fonte: http://www.bbc.com/portuguese/noticias/2015/11/151110_energia_eolica_nordeste_rb
- (08 de Junho de 2016). Fonte: http://www.ufrgs.br/eng04030/Aulas/teoria/cap_04/diviteco.htm
- (11 de Junho de 2016). Fonte: http://mstudioblackboard.tudelft.nl/duwind/Wind%20energy%20online%20reader/Static_pages/upwind_downwind.htm
- (14 de Junho de 2016). Fonte: http://www.facta.art.br/wp-content/uploads/2012/12/luzdeemergencia_fig2.png
- Arduino e Cii*. (18 de 06 de 2016). Fonte: <http://www.arduinoecia.com.br/p/calculador-divisor-de-tensao-function.html>
- CTA- IF - UFGS*. (18 de junho de 2016). Fonte: http://cta.if.ufrgs.br/objects/instrumentacao-fisica/wiki/Magnet%C3%B4metro_-_Funcionamento?version=8
- www.scorpionsystem.com*. (14 de Novembro de 2016). Fonte: Precision Scorpion Performance: http://www.scorpionsystem.com/info/brushless_outrunner_motors/
- ABEEólica, A. B. (2016). *Boletim de Dados*. São Paulo.
- Aparecida, L. B. (2014). *Construção de Bancada Eólica para Avaliação de Comportamento Dinâmico do Conjunto Eletromecânico*. Brasília.
- Barreto, G., Castro Júnior, C. A., Murari, C. A., & Sato, F. (2011). *Circuitos de Corrente Alternada - Fundamentos e Prática*. Campinas - SP: Oficina de Textos.
- Felippes, R. A. (2012). *Análise e Desenvolvimento de Aerogeradores com Pás Compósitas*. Brasília.
- Fontes, M. J. (2013). *Automação de Sensores de Corrente Elétrica*. Brasília.
- Genta, G., & Delprete, C. (1992). Some Considerations on the Experimental Determination of Moments of Inertia. *Meccanica*, 29, 125-144.
- Kalkmann, A. (2014). *Modelagem Dinâmica de Bancada de Testes para Avaliação de Comportamento de Powertrain de Turbinas Eólicas ou Hidrocinéticas*. Brasília.

- Marrant, B., Vanhollebeke, F., & Peeters, J. (2010). *Comparison of Multibody Simulations and Measurements of Wind Turbine Gearboxes at Hansen's 13MW Test Facility*. Kontich.
- Moraes, E. E. (Novembro de 2016). *Sala da Elétrica*. Acesso em 22 de Novembro de 2016, disponível em <http://www.saladaeletrica.com.br>:
<http://www.saladaeletrica.com.br/velocidade-motor-eletrico-trifasico/>
- Morais, M. V. (2015). *Análise Dinâmica e Estática de Sistemas de Conversão Hidrocinéticas*. Brasília.
- Neto, D. G. (2013). *Estudo da Influência das Condições de Operação em Sistemas de Transmissão de Potência por Elementos Flexíveis*. Porto Alegre.
- Pinto, M. d. (2014). *FUNDAMENTOS DE ENERGIA EÓLICA*. Rio de Janeiro: LTC.
- Rocha, R. V. (2008). *Simulação de Aerogerador em uma Bancada Experimental*. Rio de Janeiro.
- Shigley, J. E., Mischke, C. R., & Budynas, R. G. (2005). *Projeto de Engenharia Mecânica*. Porto Alegre - RS: Bookman.
- Silva, R. B. (2014). *Avaliação da Inércia de Giração em Rotores de Turbinas Eólicas*. Brasília.
- Silva, R. B. (2014). *Avaliação da Inércia de Giração em Rotores de Turbinas Eólicas*. Brasília.
- Sousa, A. L., Silva, M. M., & Pires, I. A. (2012). *Estudo de Interferência na Alimentação Elétrica de Motores de Indução por Inversores de Frequência*. Belo Horizonte: UniBH.
- Sousa, G. d., & Oliveira, T. B. (2010). *Estudo Aerodinâmico e de Funcionamento de uma Turbina Eólica no Distrito Federal*. Brasília.
- Vitorino, C. R. (2012). *Modelagem Dinâmica de Caixa Multiplicadora de Velocidades de Aerogeradores*. Brasília.

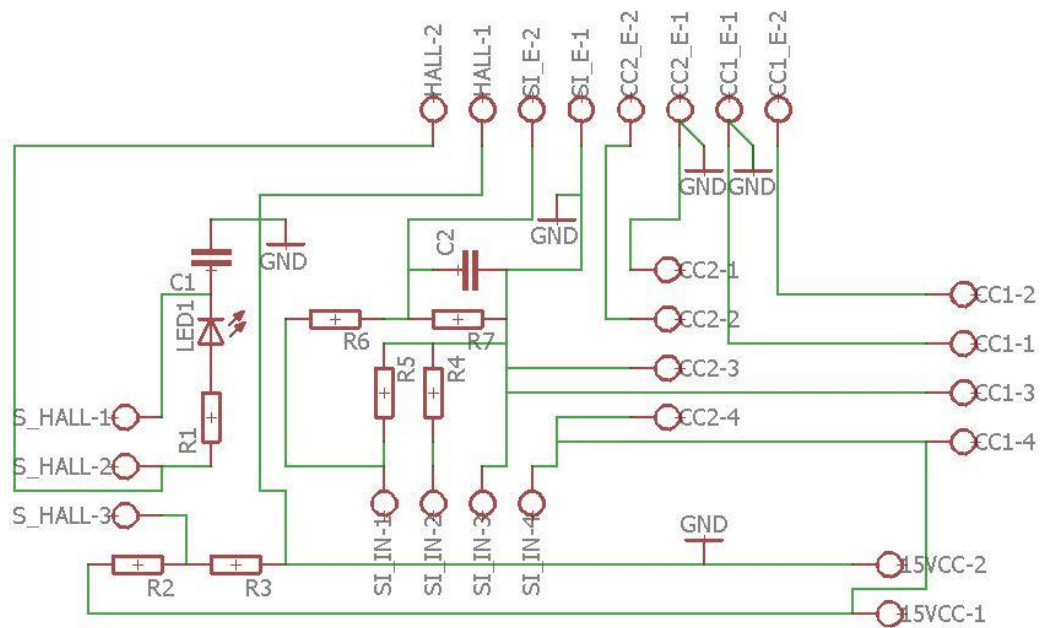


Figura 30 - Circuito elétrico completo de aquisição de dados e alimentação dos sensores.

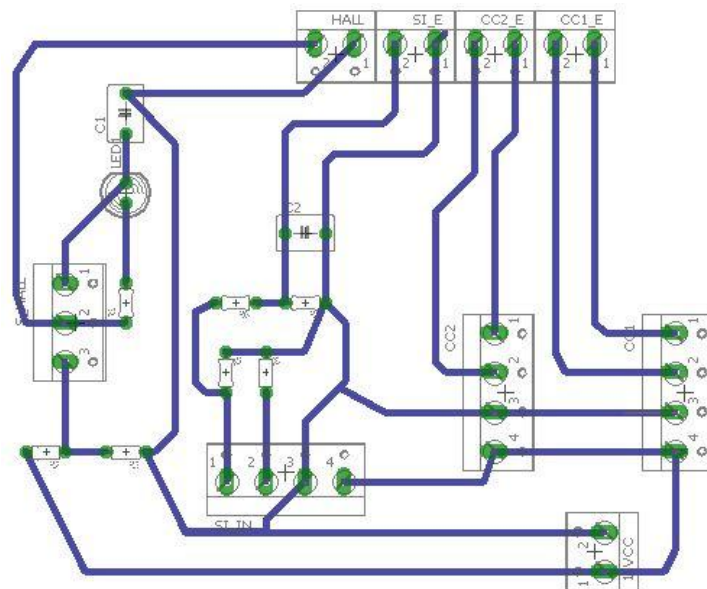


Figura 31- Placa do circuito elétrico de alimentação dos sensores e aquisição de dados.

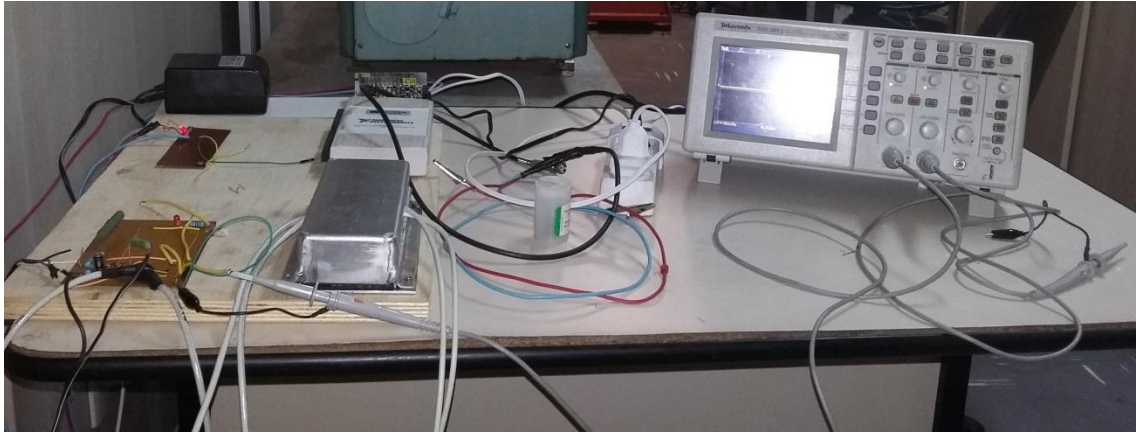


Figura 32 - Sistema de aquisição de dados e alimentação do circuito elétrico.

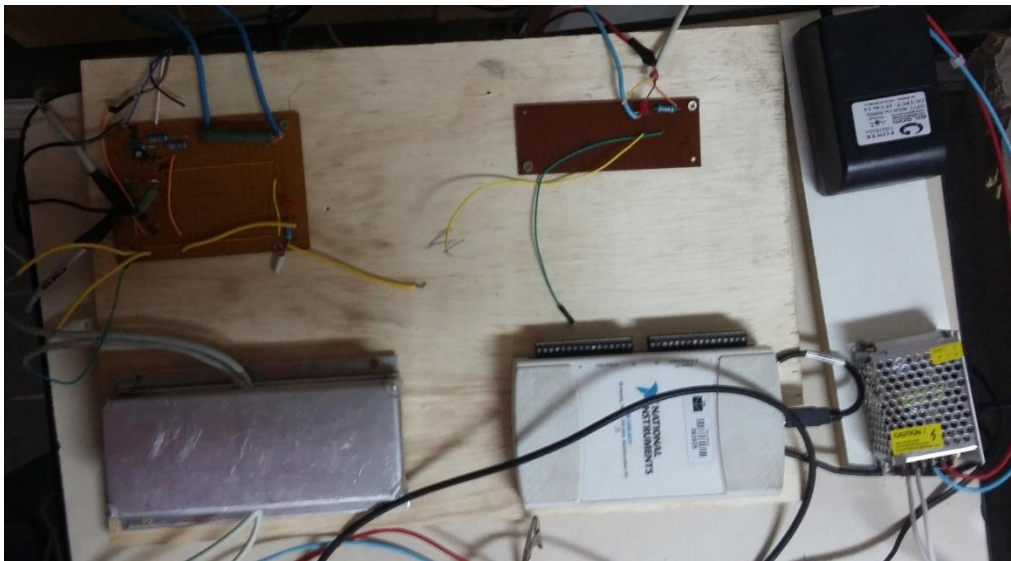


Figura 33 – Vista superior do sistema de aquisição de dados e alimentação do circuito elétrico.

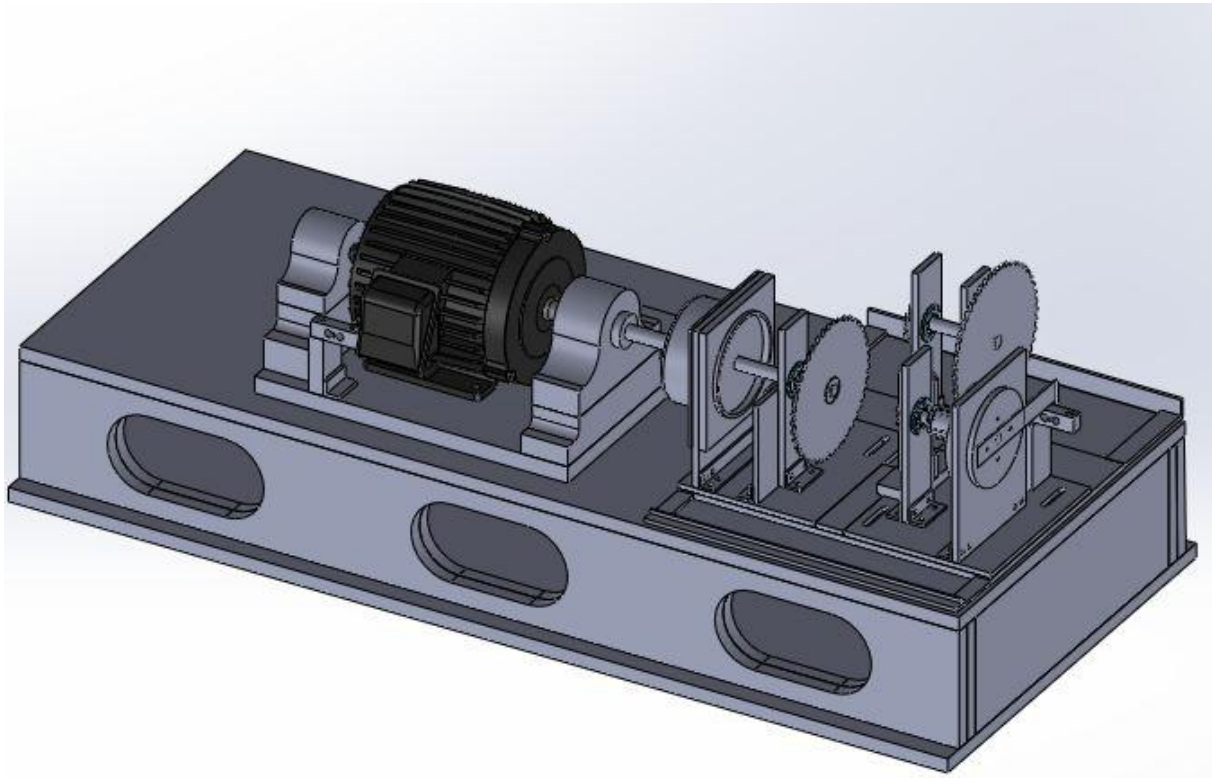


Figura 34 - Desenho técnico da bancada.

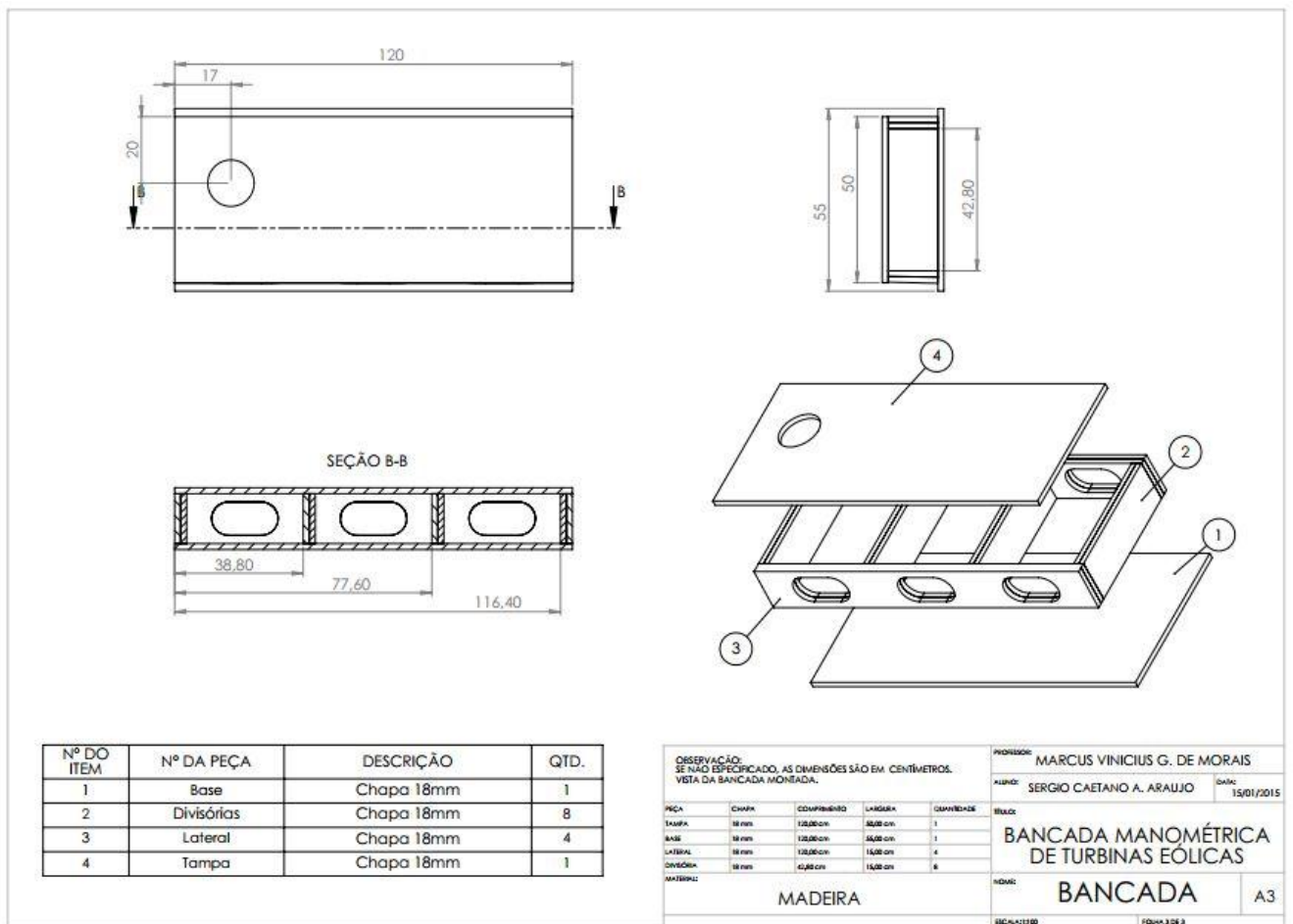


Figura 35 - Desenho técnico da base da bancada dinâmométrica (escala em cm).

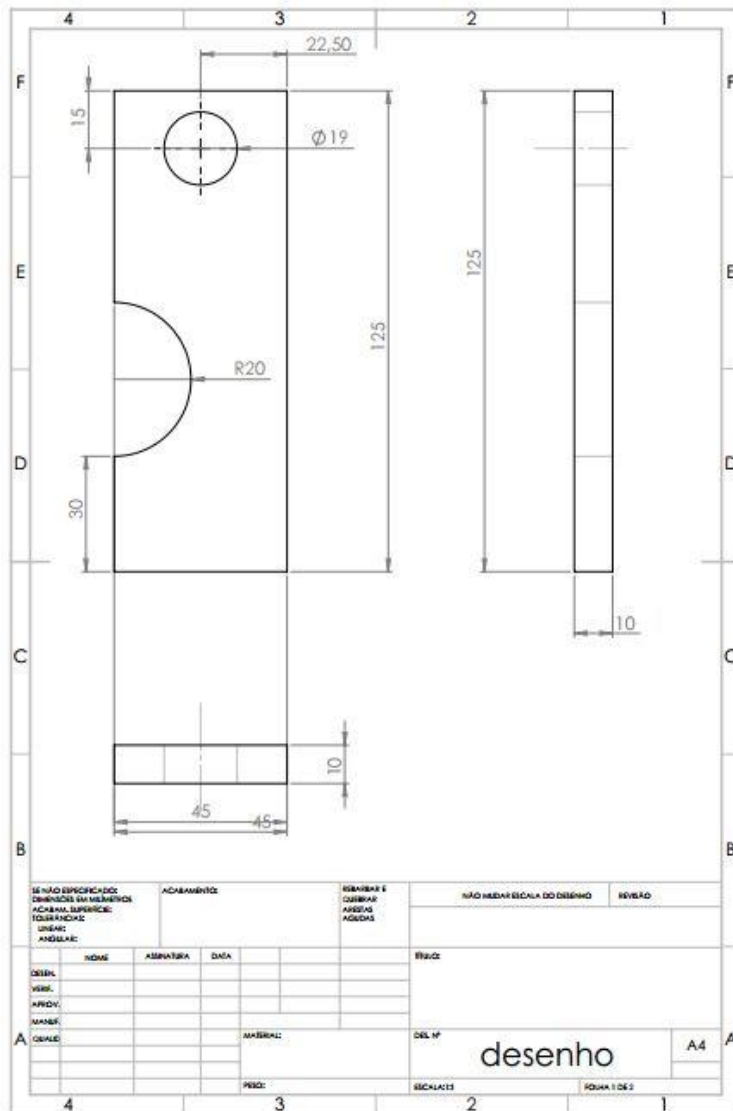


Figura 36 - Desenho técnico do suporte do sensor indutivo.

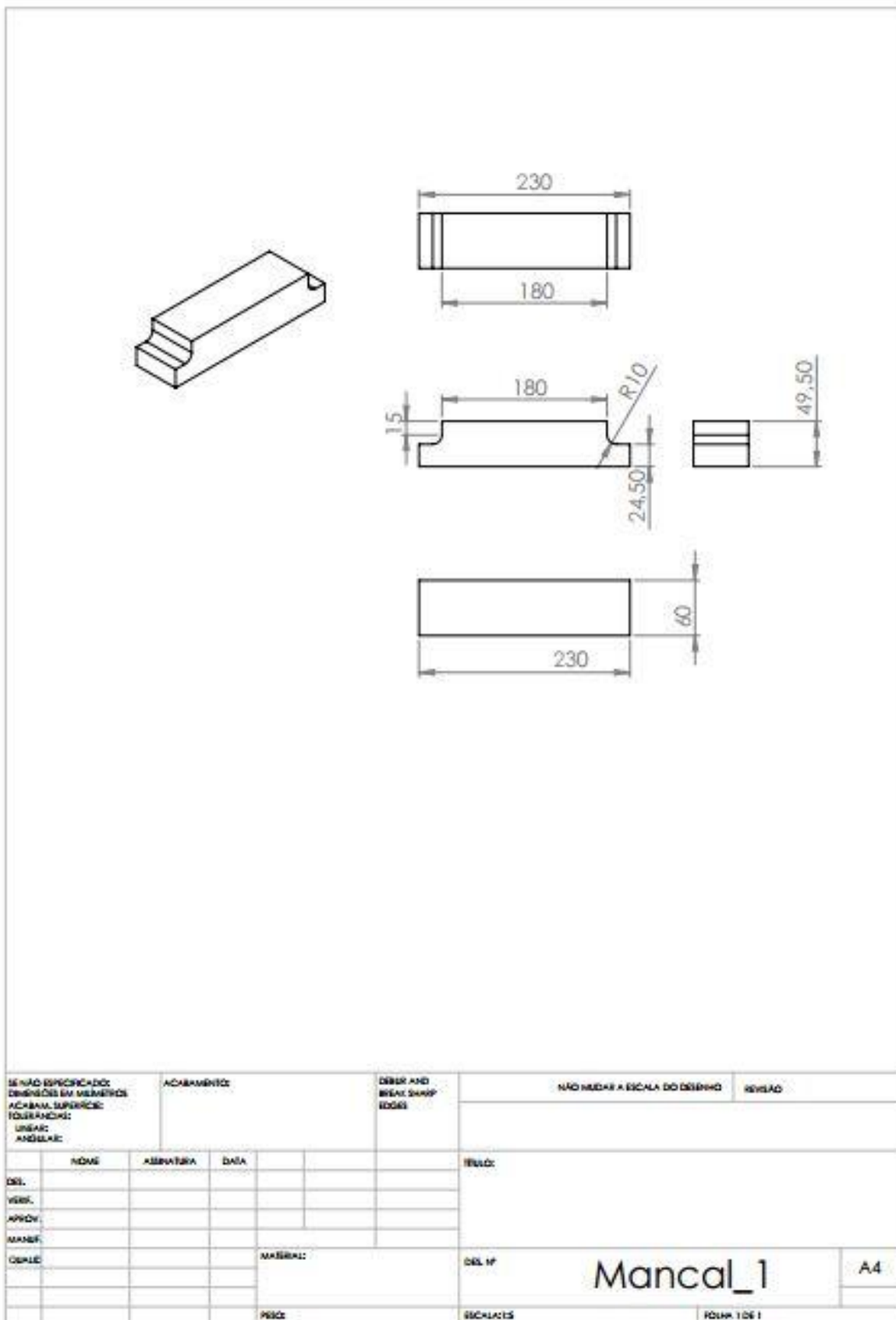


Figura 37 - Desenho técnico do suporte do motor elétrico.

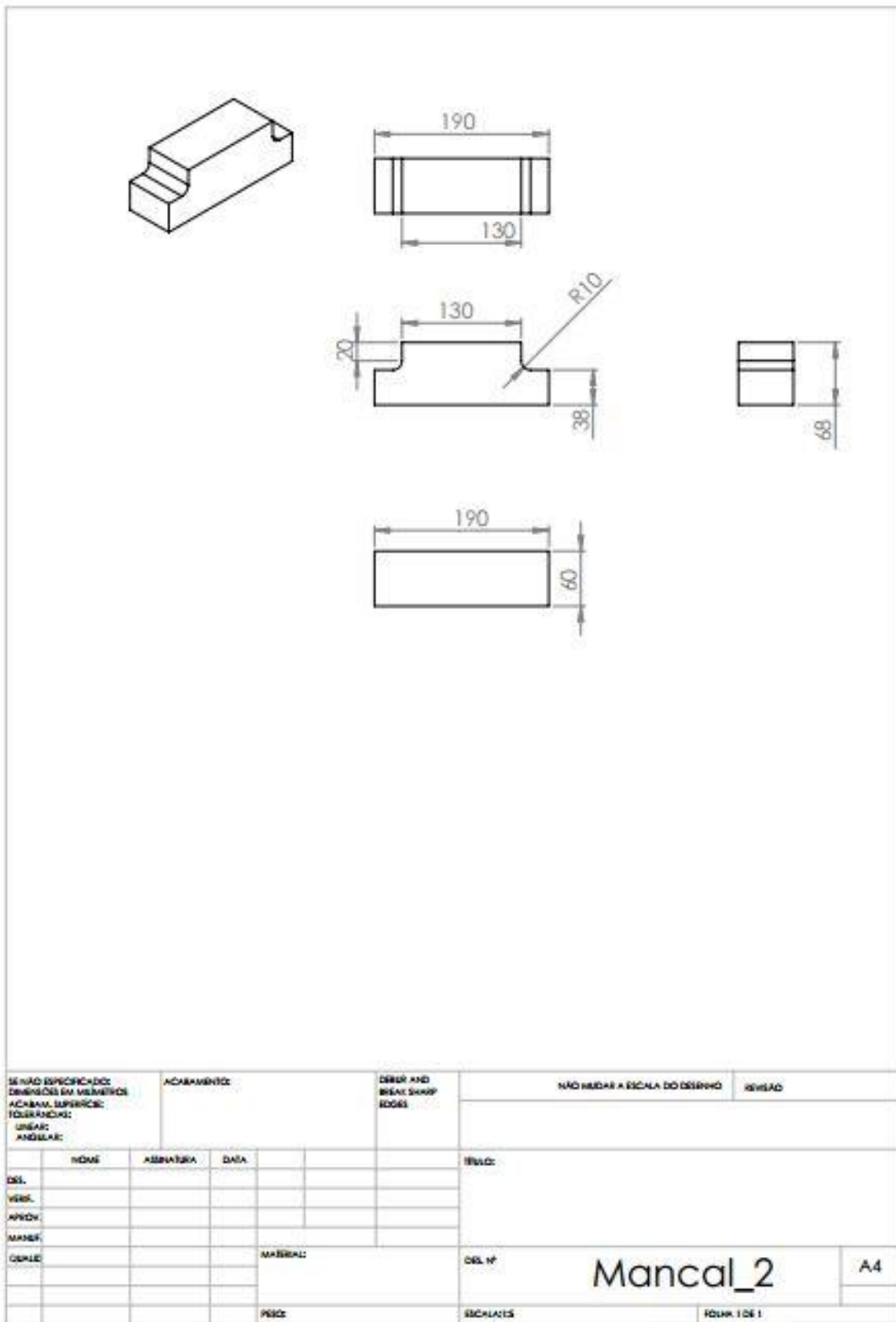


Figura 38 - Desenho técnico do suporte do motor no eixo de saída.