



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS**

MARIANA DE SOUSA CAVALCANTE

**APERFEIÇOAMENTO DA BANCADA DE TESTE PARA PROTÓTIPOS DE PÁS
ÉOLICAS**

**2016
FORTALEZA**

MARIANA DE SOUSA CAVALCANTE

APERFEIÇOAMENTO DA BANCADA DE TESTE PARA PROTÓTIPOS DE PÁS
ÉOLICAS

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
curso de Engenharia de Energias Renováveis da
Universidade Federal do Ceará.

Orientador: Profa. Dra. Carla Freitas de
Andrade.

2016

FORTALEZA

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

C364a Cavalcante, Mariana de Sousa.

Aperfeiçoamento da bancada de teste para protótipos de pás eólicas / Mariana de Sousa Cavalcante. – 2016.

38 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia de Energias Renováveis, Fortaleza, 2016.

Orientação: Profa. Dra. Carla Freitas de Andrade.

1. Sistema de aquisição de dados. 2. Placa de circuito impressa. 3. Torque. 4. Motor . 5. Bancada de teste.
I. Título.

CDD 621.042

MARIANA DE SOUSA CAVALCANTE

APERFEIÇOAMENTO DA BANCADA DE TESTE PARA PROTÓTIPOS DE PÁS
ÉOLICAS

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
curso de Engenharia de Energias e Meio
Ambiente – Engenharia de Energias
Renováveis da Universidade Federal do Ceará.

Aprovada em: ___ / ___ / ____.

BANCA EXAMINADORA

Professora Dra. Carla Freitas de Andrade (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Professor
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Professor
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Professora Dra. Carla que tanto acreditou em mim, me incentivou nos momentos mais difíceis durante o período da minha graduação.

Aos meus pais pela educação e todos princípios que hoje tenho sobre a vida. Agradeço a minha irmã, que está ao meu lado em todos os momentos e me faz caminhar sempre pra frente.

Fico grata a todos do Laboratório de Aerodinâmica e Mecânica dos Flúidos Computacional - LAERO, da Universidade Federal do Ceará, que tanto se esforçam para que o laboratório seja reconhecido e cresça continuamente. E a todos que me ajudaram durante este trabalho.

Aos professores do curso de Engenharia de Energias Renováveis por todos o conhecimento transmiltido e por todo o esforço para formar alunos competentes. Como também, ao curso de Engenharia Elétrica por toda a atenção e disponibilidade para ajudar na concepção da placa, em especial ao Professor Dr. Demercil de Souza Oliveira Júnior

“*Aquilo que eu desconheço é minha melhor parte.*”

Clarice Lispector.

RESUMO

A energia eólica é uma alternativa energética que está gradativamente sendo mais explorada. Com isso, existe o interesse em realizar análises e testes que buscam o aperfeiçoamento de perfis aerodinâmicos, com finalidade de aumentar sua eficiência. O Laboratório de Aerodinâmica e Mecânica dos Fluidos Computacional (Laero) possui linhas de pesquisas relacionadas ao aperfeiçoamento de perfis. Para executar os testes de protótipos de pás aerodinâmicas, o Laero faz uso de uma bancada de testes que funciona dentro de um túnel de vento. Esta bancada possui um sistema de aquisição de dados que mede velocidade de vento e torque, dados importantes para se obter o desempenho dos tipos de perfis. Com isso, este trabalho tem como propósito buscar soluções para os problemas atuais da bancada de teste. A bancada possuía um motor que estava apresentando uma resistência para baixar rotações, o que prejudicava as medições de torque. Como alternativa, foi feita a mudança para um motor *brushless*, o qual se mostrou mais estável nesta situação. O sistema de aquisição de dados estava montado em uma *protoboard*, a qual é utilizada apenas para a criação da placa e possibilita mudanças nas conexões, o que ameaçava a segurança do sistema aquisição. Dessa forma, foram realizados testes para checar se as conexões estavam interferindo no sinal, troca por resistências mais precisas e foi contruída uma placa de circuito impresso.

Palavras-chave: Sistema de Aquisição de Dados, Placa de Circuito Impressa, Torque, Motor, bancada de teste.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Placa Arduino Mega	15
Figura 2 - Motor <i>Brushless</i>	17
Figura 3 - Placa de circuito impresso	17
Figura 4 - Circuito Somador	18
Figura 5 - Energia extraída do vento	19
Figura 6 – Ilustração da Bancada de Teste do LAERO.....	20
Figura 7 – Foto do Transdutor de Torque e Velocidade.....	21
Figura 8 – Foto do Anemômetro.	21
Figura 9 – Desenho do Túnel de Vento do LAERO.....	22
Figura 10 – Imagem do Gerador de Funções.	22
Figura 11 – Desenho do Circuito elétrico.....	24
Figura 12 – Foto do Sistema de aquisição, <i>protoboard</i> ligado ao Arduino.	24
Figura 13 – Foto do Sistema de aquisição com resistências de maior precisão.	25
Figura 14 – Foto do Motor de 12V	26
Figura 15 – Foto do Motor DC de 3,3 V.	27
Figura 16 – Foto do Motor <i>Brushless</i> Instalado na Bancada de Testes.....	28
Figura 17 – Foto da Placa de Circuito Impresso.	29
Figura 18 – Foto do Sistema para Analisar o Funcionamento da Placa	29
Figura 19 – Foto do Sistema de Aquisição sem a PCI.	32
Figura 20 – Foto do Sistema de aquisição com a PCI.	32
Figura 21 – Imagem do Comportamento do Sinal.	33
Figura 22 – Foto do Conjunto de pás	34
Figura 23 – Foto da Diposição dos Equipamento para a Realização dos Testes.....	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificações do Microcontrolador ATmega1280.....	16
Tabela 2 - Valores de Mínimo e Máximo para o Motor de 12 V e o <i>Brushless</i>	31
Tabela 3 - Dados de rotação e torque medidos com e sem pás, mostrando a diferença de valores nestas duas situações.	35

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	JUSTIFICATIVA	13
3	OBJETIVO	14
3.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
4	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
4.1	ARDUINO	15
4.2	MOTOR <i>BRUSHLESS</i> (SEM ESCOVAS).....	16
4.3	PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO	17
4.4	AMPLIFICADOR SOMADOR	18
4.5	A INFLUÊNCIA DO TORQUE NOS ESTUDOS AERODINÂMICOS	18
5	METODOLOGIA.....	20
5.1	BANCADA DE TESTE.....	20
5.2	EQUIPAMENTOS UTILIZADOS PARA A EXECUÇÃO DO PROJETO	20
5.3	TRANSDUTOR DE TORQUE.....	21
5.4	ANEMÔMETRO	21
5.5	TÚNEL DE VENTO.....	22
5.6	GERADOR DE FUNÇÕES	22
5.7	ESTUDO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.....	23
5.8	TESTE COM MOTORES DE DIFERENTES TENSÕES.....	25
5.9	CONCEPÇÃO DA PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO.....	28
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
6.1	ESTUDO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.....	30
6.2	TESTE COM MOTORES DE DIFERENTES TENSÕES.....	30
6.3	CONCEPÇÃO DA PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO (PCI).....	31
6.4	REALIZAÇÃO DOS TESTES	33
7	CONCLUSÃO.....	36
	REFERÊNCIAS.....	37
	APÊNDICE A - CÓDIGO EM ARDUINO	39

1 INTRODUÇÃO

O homem tem provocado diversas alterações no mundo, gerando resultados negativos como, por exemplo, o desmatamento de florestas e a emissão de gases poluentes, os quais colaboram para a intensificação do efeito estufa. Entretanto, como resposta, a natureza se manifesta com o aumento dos desastres naturais. Essas consequências ambientais mostraram ao mundo a necessidade de mudanças para evitar a degradação ambiental, as quais vêm sendo discutidas nas Conferências Nacionais sobre o Meio Ambiente. A utilização de combustíveis fósseis provoca inúmeros impactos ambientais, dessa forma, as energias renováveis servem como alternativa de fontes energéticas, por serem consideradas energias limpas, ou seja, essa forma de energia causa menor impacto ambiental de acordo com a UNESCO.

As primeiras formas de utilização da energia eólica foram para a moagem de grãos, para o bombeamento de água e como impulsor de veleiros (Burton et al., 2001). Tempos depois, após o surgimento da energia elétrica, veio o interesse em utilizar este tipo de fonte para gerar eletricidade. Historicamente, o país pioneiro em geração de energia por meio da energia do vento foi a Dinamarca. Porém, o preço do combustível Diesel exercia uma forte influência no interesse do uso das turbinas eólicas (HAU, 2006). Há algumas décadas, a energia eólica está gradativamente se consolidando, devido a sua atratividade econômica, a qual se deve à preços cada vez mais competitivos do quilowatt-hora que ocorreu neste período, possibilitando a viabilidade desta fonte de energia de acordo com Simas e Pacca (2013).

Em 2015, pela primeira vez em quatro décadas, de acordo com REN21(2015) as emissões globais de carbono associadas ao consumo de energia mantiveram-se estáveis e isso foi atribuído à inserção de energias renováveis e melhorias na eficiência. Além da vantagem de ser uma fonte que não acarreta maiores danos ao meio ambiente, a energia eólica proporciona oportunidade de emprego, pois, até 2016, foi ultrapassada a marca de 1,1 milhão de empregos relacionados à área de acordo com Renewable Energy and Jobs (2016). Além disso, essa fonte de energia também consegue ser obtida em áreas remotas, tendo em vista que atualmente mais de 1 milhão de pessoas ainda não têm acesso à eletricidade (REN21,2015).

O Brasil tem diversas alternativas para atender sua demanda energética, contudo grande parte de sua matriz é de responsabilidade das usinas hidrelétricas. A energia eólica tem conseguido expandir sua capacidade instalada, pois, de acordo com REN21 (2015), em 2014, o Brasil continuou líder em solicitações para aumento da capacidade energética deste tipo de fonte, chegando ao recorde de 2,5 GW de capacidade de energia eólica. Visto que, além dos

benefícios inerentes a este tipo de fonte, é possível também achar vantagens particulares ao cenário brasileiro, como a complementaridade com o regime hidrico, ou seja, é uma fonte energética que possui maior disponibilidade no período de seca, e com isso, também permite a redução do acionamento das termelétricas segundo Neto e Enio (2012).

O aproveitamento dessa energia dos ventos, de forma generalizada, inicia a partir da energia cinética das partículas no ar, que se transformam em energia mecânica através do impulso gerado nas pás, conseguindo, por fim, se transformar em energia elétrica no gerador. de acordo com Manwell (2002). O túnel de vento possibilita o estudo do comportamento das pás em condições conhecidas. Ele possui uma seção de teste, onde se localiza a bancada de teste, a qual irá coletar os sinais necessários para a análise do desempenho.

Os sinais gerados por sensores são transmitidos ao sistema de aquisição de dados responsável pela interpretação dos sinais, ou seja, eles precisam de um equipamento capaz de traduzir os valores enviados pelos sensores para uma linguagem mais acessível. Segundo Arnold (1982, apud BAPTISTA, 1990, p. 5): “Um sistema de aquisição de dados pode ser definido como um instrumento eletrônico, ou um grupo de componentes eletrônicos interligados, destinado à medida e quantificação de sinais analógicos ou processamento digital.”

O presente trabalho teve como propósito realizar um estudo no intuito de buscar o aperfeiçoamento do sistema de aquisição dos dados já existentes no laboratório, que tem como microcontrolador o Arduino. O estudo foi realizado em uma bancada de testes de protótipo de pás eólicas, analisando os dados através de manipulações, a fim de obter curvas de potência mecânica gerada. Os resultados das melhorias propostas neste estudo foram comparados com os resultados de Filho (2015) e Marcos (2014), mantendo-se as mesmas condições. Também foi construído uma placa, no intuito de melhorar as condições do sistema de aquisição atual.

2 JUSTIFICATIVA

O Laero (Laboratório de aerodinâmica e mecânica dos fluidos) possui um túnel de vento que consegue simular o escoamento de vento constante. Dentro do referido túnel há uma bancada de teste, na qual são feitas análises com diferentes perfis de pás eólicas. Dessa forma, como esse estudo é realizado através de um sistema de aquisição dados é imprescindível a verificação da existência de curto-circuitos e de seus dispositivos de proteção. A montagem da placa também interfere nos resultados, por isso a importância que as conexões sejam impressas para que não possua algum mau contato.

O motor também é um componente importante nos estudos de perfis de pás eólicas, pois caso seja inadequado para a situação pode causar interferências nos resultados. O Laero possui na sua bancada de teste o mesmo motor utilizado para a movimentação dos vidros elétricos de carros. Ele tem a função de gerar um contra-torque, ou seja, o vento irá tentar elevar a rotação, porém o motor irá estabelecer a velocidade das pás. O sentido que rotaciona o motor é o mesmo sentido do rotor das pás. Então, é importante a busca pelo aperfeiçoamento do sistema, para evitar perturbações nos dados.

3 OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo realizar aperfeiçoamentos na bancada de teste dos protótipos das pás, realizando o estudo voltado para o motor e a aquisição de dados (*hardware*).

3.1 Objetivos específicos

- Investigar o motor mais adequado para se utilizar na bancada de teste;
- Testar a segurança do sistema de aquisição de dados, com análise de curto-circuito e mudanças nos componentes eletônicos;
- Construir uma Placa de Circuito Impresso;
- Testar o funcionamento, com base em estudos anteriores, após as modificações através de um ensaio com um conjunto de pás.

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O mercado dispõe de diversas opções de placas com ampla variedade de valores, e o preço delas está vinculado à tecnologia que influencia diretamente sua precisão. Entretanto, nem todas as tarefas necessitam de uma elevada exatidão, dessa forma torna-se possível a utilização de microcontroladores simples e baratos. D’Ausilio (2012) cita algumas operações consideradas de baixo nível de precisão, dentre elas o sensor de torque. Este autor também afirma que, dentre as placas consideradas de baixo custo, o Arduino tem como vantagem pregar a filosofia de *hardware* e *software* livres, a qual incentiva sua utilização por pessoas com pouca experiência em programação e eletrônica.

4.1 Arduino

O Arduino foi desenvolvido na Itália em 2005, com a finalidade de proporcionar a construção de projetos com um custo abaixo dos outros sistemas disponíveis no mercado. Essa plataforma adota os preceitos de *hardware* e *software* livres, o que viabiliza sua versatilidade e a torna colaborativa. A placa Arduino, mostrada da Figura 1, possui o chip Atmega como microcontrolador, o qual é constituído por microprocessador, memória e portas de entrada e saída de dados, como mostra a Tabela 1.

“O Arduino é o que chamamos de plataforma de computação física ou embarcada, ou seja, um sistema que pode interagir com seu ambiente por meio de hardware e *software*”(Michael McRoberts, 2010). Isso justifica a sua gama de utilizações, podendo ser um projeto de acionamento de um LED por um certo tempo, ou um sistema mais complexo para controlar um drone.

Figura 1 - Placa Arduino Mega



Fonte: Página Arduino¹.

¹ - Disponível em : <<https://www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega>> Acesso em Setembro 2016.

Tabela 1 - Especificações do Microcontrolador ATmega1280

Tensão	5V
Tensão de entrada (recomendado)	7- 12V
Tensão de entrada (limites)	6- 20V
Digital I / O Pinos	54 (dos quais 15 oferecem saída PWM)
Analógico Input Pinos	16
Memória Flash	128 KB
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
A velocidade do clock	16 MHz

Fonte: Página Arduino².

4.2 Motor *Brushless* (sem escovas)

Os motores possuem atualmente diversas formas, dentre estas existem os motores CC que não possuem escovas, as quais são fundamentais para realizar a rotação de motores com escovas, porém há motores que não necessitam desse componente que são os motores sem escovas ou motor *brushless*, pois possuem um rotor de imã permanente, de acordo com Fowler (2013). Os motores *brushless* passaram muito tempo para se tornarem competitivos no mercado, comparados aos motores DC, pois a produção em diferentes frequências e tensões era muito complexa. Em virtude da tecnologia dos microcontroladores atuais e dos transistores eficientes, o motor *brushless* conseguiu alcançar preços razoáveis para poder concorrer com motores DC.

² - Disponível em : <<https://www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega>> Acesso em Setembro 2016.

Quando comparado a outros motores, ele consegue ser superior por possuir maior confiabilidade, tempo de vida, eficiência, baixa necessidade de manutenção entre outras vantagens, segundo Tong (2014). Os diversos benefícios inerentes a este tipo de motor, tornam-o padrão para modelos de barcos, carros e aeromodelos. A Figura 2 mostra o modelo de motor utilizado neste trabalho.

Figura 2 - Motor *Brushless*



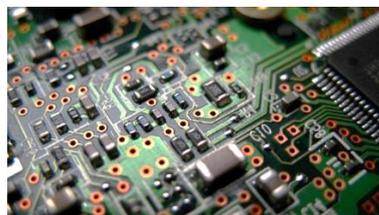
Fonte: Página iflye³

4.3 Placa de Circuito Impresso

A Placa de Circuito Impresso (PCI), mostrada na Figura 3, é uma forma de montar um circuito elétrico, onde são traçados caminhos de cobre para conectar todos os dispositivos da placa. A PCI pode ser feita de polímeros e materiais de vidro-epóxi e aceita diversos componentes, como CI, diodos, transistores e etc.

Uma vantagem da montagem de placa impressa é que ela oferece uma aparência agradável, pois os fios para realizar as conexões dentro da placa são substituídos por uma fina camada de cobre condutor que interliga os componentes eletrônicos. Outro ponto positivo é a boa resistência mecânica, pois os fios que estão conectados na placa são unidos através de uma solda, a qual impede que estes separem facilmente ou que exista algum mal contato.

Figura 3 - Placa de circuito impresso



Fonte: Página All about circuits⁴.

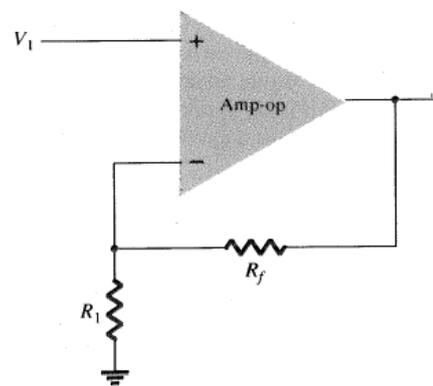
³ - Disponível em: < <http://www.iflye.com.br/motor-brushless-emax-cf2822-pr-5-341339.htm>> Acesso em Setembro 2016.

⁴ - Disponível em: < <http://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/concepts-and-variables-with-state-space-and-canonical-models/>> Acesso em Setembro 2016.

4.4 Amplificador somador

Os amplificadores têm a função de atender necessidades do sistema em relação a tensão, sua amplitude e polaridade, como é o caso do circuito somador que provoca a elevação da tensão de saída através de uma soma algébrica das tensões de entrada. A Figura 4 mostra uma representação genérica desse tipo de circuito e sua tensão de saída é calculada de acordo com a Equação 1.

Figura 4 - Circuito Somador



Fonte: Boylestad (1999)

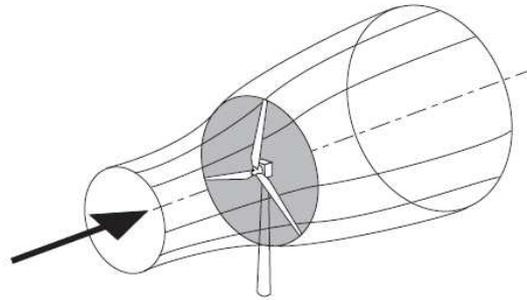
$$V_0 = - \left(\frac{R_f}{R_1} V_1 + \frac{R_f}{R_2} V_2 + \frac{R_f}{R_3} V_3 \right) \quad (1)$$

Onde, V_0 é a tensão final, $\frac{R_f}{R_{1,2,3\dots}}$ são fatores de ganho e $V_{1,2,3\dots}$ são as tensões de entrada.

4.5 A influência do torque nos estudos aerodinâmicos

A energia dos ventos é gerada a partir da energia cinética das partículas do ar. Esta forma uma massa de ar que passa pelo rotor, isso pode ser melhor visualizado na Figura 5 . O escoamento do vento está expresso, por unidade de tempo, em termos na Equação 2.

Figura 5 - Energia extraída do vento



Fonte: Burton (2001)

$$P = \frac{1}{2} \rho AV^3 \quad (2)$$

Cujo, P é a energia cinética por unidade de tempo, ρ é a densidade do fluido que escoar (ar), A a área do rotor, ou seja, toda a região necessária para acontecer a rotação das pás e V a velocidade do ar.

A eficiência do aproveitamento energético do vento é definido pelo coeficiente de desempenho (C_p) de um gerador eólico. Ele depende da energia disponibilizada pelo vento e da energia produzida pelo motor, de forma que elas se relacionam de acordo com a Equação 3 para fornecer o valor de C_p .

$$C_p = \frac{P_{motor}}{\frac{1}{2} \rho AV^3} \quad (3)$$

Dessa forma, a potência do motor pode ser encontrada pelo produto do torque (T) com a rotação (ω) ($P_{motor} = T \times \omega$). Assim, a precisão do torque irá influenciar diretamente nos resultados de desempenho de um aerogerador.

5 METODOLOGIA

A investigação sobre a coleta de dados foi desenvolvida em etapas, composta por:

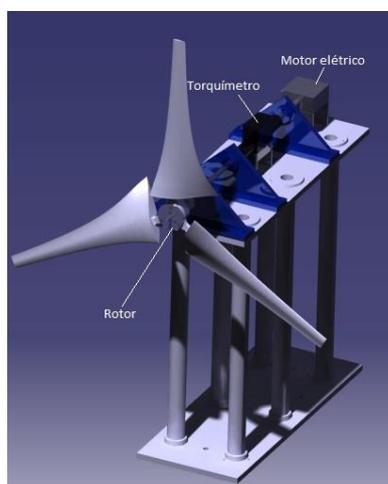
- Estudo do sistema de aquisição de dados;
- Teste com motores de diferentes tensões;
- Concepção da PCI.

Assim, este item irá tratar acerca do local que foi realizado o estudo, os materiais utilizados e metodologias aplicadas para a concepção deste projeto.

5.1 Bancada de teste

A bancada de teste, mostrada na Figura 6, foi a estrutura utilizada para a execução deste projeto. Ela é responsável por acomodar os protótipos de pás, o motor elétrico, o eixo e o transdutor de torque e velocidade.

Figura 6 – Ilustração da Bancada de Teste do LAERO.



Fonte: Adaptado de ALMEIDA (2013).

5.2 Equipamentos utilizados para a execução do projeto

Os testes para a execução do projeto foram viabilizados por meio de determinados componentes, os quais são: o transdutor de torque e rotação, o anemômetro, o túnel de vento, a fonte de alimentação, o gerador de sinais e o motor elétrico. Com isso, estão discriminados abaixo os principais componentes com as características, exceto o motor elétrico, que será tratado na seção dos testes com os motores.

5.3 Transdutor de torque

O transdutor é o instrumento responsável por fazer medições de torque estática/dinâmica e da velocidade de rotação. O modelo utilizado neste trabalho, mostrado na Figura 7, foi o T20WN do fabricante Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, o qual tem capacidade de ler um torque de até 2 N.m com uma precisão de aproximadamente $\pm 0,2\%$, suportando uma rotação máxima mensurável de 3000 rpm, possuindo sinal de saída de ± 10 V para a medição de torque e para a rotação gera 360 pulsos de 5 V para cada rotação.

Figura 7 – Foto do Transdutor de Torque e Velocidade.



Fonte: FILHO (2015).

5.4 Anemômetro

O anemômetro é o instrumento capaz de realizar a medição da velocidade de vento. Neste trabalho foi utilizado o modelo TAR-176 do fabricante Instrutherm, o qual é mostrado na figura 8.

Figura 8 – Foto do Anemômetro.

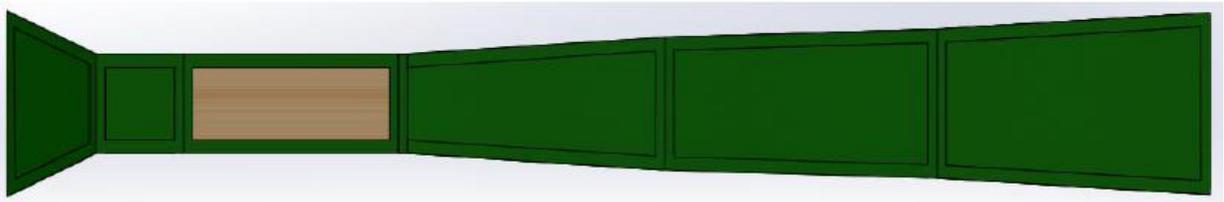


Fonte: O autor.

5.5 Túnel de vento

Os teste foram executados em um túnel de vento, o qual foi desenvolvido no próprio laboratório. Este túnel possui um ventilador industrial com potência de 2 hp da fabricante VENTISILVA e mede aproximadamente 6,5 m de comprimento, com uma seção de teste de 500 x 495 mm. A Figura 9 mostra o desenho em CAD do Túnel de Vento do LAERO,

Figura 9 – Desenho do Túnel de Vento do LAERO.



Fonte: DINIZ (2014).

5.6 Gerador de funções

O gerador de funções gera um sinal de entrada no circuito para observar como ele se comporta, assim possibilita testar a funcionamento da placa. Dessa forma, foi utilizado o modelo GFG-8200A do fabricante Good Will Instrument Co., mostrado na Figura 10.

Figura 10 – Imagem do Gerador de Funções.



Fonte: Página Good Will Instrument Co.⁵.

⁵ - Disponível em : <http://www.gwinstek.com/en-global/products/Signal_Sources/Analog_Function_Generators/GFG-8200A> Acesso em Setembro 2016.

5.7 Estudo do sistema de aquisição de dados

A bancada de aquisição de dados do protótipo das pás criada por FILHO (2015), a qual está mostrada na Figura 12, foi o ponto de partida para buscar os melhoramentos e aperfeiçoamento dos dados. Ela tem como função receber o sinal de torque, o qual varia de -10 V a +10 V. Os ensaios de protótipos de pás eólicas não ultrapassam o intervalo de -5 V a +5 V, dessa forma para o Arduino realizar a leitura do sinal negativo ser acrescido uma tensão de +5 V e final será dividido por 2. A Figura 11 mostra a representação do circuito elaborado para o funcionamento desse sistema.

Assim, o cálculo, que foi escrito no código do programa, para interpretar o valor de entrada da porta analógico A1 do Arduino, referente ao sinal de Torque, está apresentado na equação (4) possuindo um valor final no intervalo entre -1000 mN/m e +1000 mN/m.

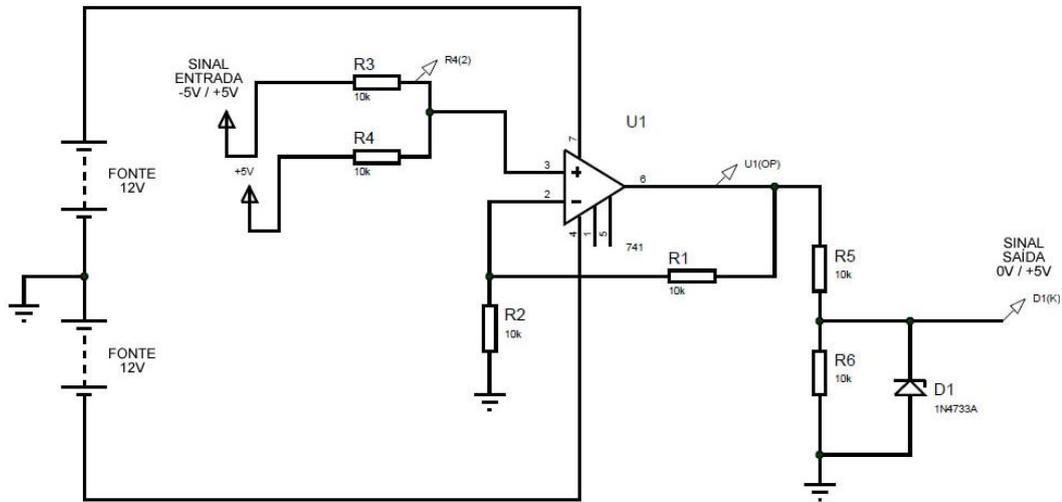
$$Torque = \frac{-1[5-2(valorvolt)] \times 1000}{5} \quad (4)$$

A bancada de aquisição de dados também tem como função receber e interpretar o sinal de rotação. O sensor emite um sinal em forma de pulso a cada 0,5 s e em uma rotação totaliza 360 pulsos. Assim, o código possui a equação 5 com a finalidade de transforma esse sinal em um valor em RPM.

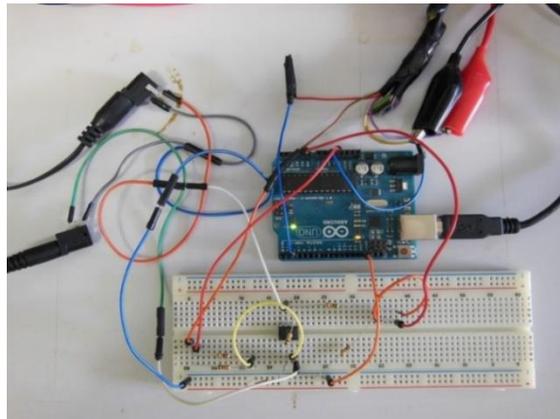
$$RPM = \frac{(contapulso) \text{ pulsos}}{0,5s} \times \frac{1 \text{ rotação}}{360 \text{ pulsos}} \times \frac{60s}{1 \text{ minuto}} \quad (5)$$

O monitor serial do Arduino responsável por mostrar os resultados obtidos pelo programa, imprime os valores interpretados do sensor pelo código escrito. Isso possibilita uma melhor acessibilidade para o tratamento dos dados.

Figura 11 – Desenho do Circuito elétrico



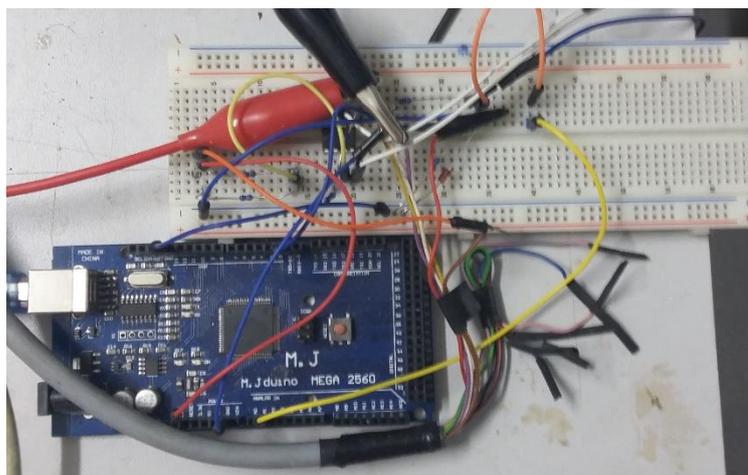
Fonte: FILHO (2015)

Figura 12 – Foto do Sistema de aquisição, *protoboard* ligado ao Arduino.

Fonte: FILHO (2015).

Inicialmente foi remontado o sistema de aquisição e foram soldados alguns fios para que não houvesse problema nos testes. No intuito de buscar a precisão nos dados, o sistema de aquisição de dados foi estudado a fundo para identificar possíveis problemas no circuito que impeçam a transmissão do sinal como, por exemplo, a existência de um componente danificado. Dessa forma, foi analisado o sistema em funcionamento, a fim de saber se este estava produzindo o sinal de acordo com os resultados do trabalho de FILHO (2015). Após esta verificação, foi realizado um teste em todas as conexões para verificar o comportamento da corrente elétrica através de um provador de continuidade. Também foi verificada a precisão dos componentes do sistema. Dessa forma, foi realizada a troca, como mostrado na Figura 13, pelos que possuem até 1% de tolerância, ou seja, que não possuem resistência maior que 1%.

Figura 13 – Foto do Sistema de aquisição com resistências de maior precisão.



Fonte: O Autor.

Essa etapa trouxe segurança ao sistema, pois com a verificação da continuidade garantiu que o sinal está sendo transmitido corretamente, ou seja, sem interferências. Já a troca das resistências com maior precisão, que geram dados mais confiáveis, juntamente com o inserção do diodo, que protege a placa de qualquer oscilação de tensão, possibilitam o início para os testes com os diferentes motores.

5.8 Teste com motores de diferentes tensões

O motor elétrico é o dispositivo fundamental para o funcionamento da bancada, pois possui a responsabilidade de gerar a rotação no eixo de transmissão. Assim, ele estabelece um valor fixo de rotação por minuto e, juntamente com a ação do vento, que provoca uma força adicional nas pás, é gerado um torque no eixo. Inicialmente, a bancada operava com um motor elétrico de passo de corrente contínua 12 V, o qual é mostrado na Figura 14.

Figura 14 – Foto do Motor de 12V



Fonte: O Autor

O motor não estava apresentando nenhum defeito, ou seja, não possuía aquecimento, ruído ou outros problemas durante o seu funcionamento. Entretanto, foi notado que o motor tinha uma alta inércia, o que dificultava o seu funcionamento em baixas rotações, pois era preciso vencer essa força para iniciar o seu funcionamento e, quando a rotação era reduzida para o valor desejado, o motor não conseguia manter constantância no funcionamento.

Dessa forma, isso motivou uma pesquisa sobre os motores mais adequados para a bancada. A princípio, essa busca teve o propósito de achar um motor que permitisse as pás girarem livremente e o motor servisse apenas como um freio, ou seja, provocasse uma rotação contrária ao do rotor, assim o motor teria a função de diminuir a velocidade de rotação para provocar um torque no eixo. Com isso, foi realizado o teste com as pás livres, sem a ajuda do motor para rotacionar e com o motor desacoplado do eixo, para saber se elas rotacionavam apenas com a força do vento. Essa verificação mostrou que o vento tinha capacidade de provocar a rotação do rotor. Após essa etapa, foi inserido um motor DC de indução de 3,3 V, o qual é mostrado na Figura 15, no eixo para que funcionasse apenas para freiar as pás, porém não foi obtido êxito no teste, pois as pás não conseguiram se movimentar só com a força do vento. Dessa forma, o motor foi utilizado da mesma maneira que era utilizado em ensaios anteriores, ou seja, rotacionando para o mesmo sentido do rotor.

O motor DC de indução de 3,3 V foi utilizado nos teste em que o motor gira no mesmo sentido que o rotor, pois ele possui uma baixa inércia, assim era provável que ele não influenciasse nos dados obtidos pelo torquímetro. Com isso, foram realizados testes que permitiram identificar uma melhora nos dados de torque quando o motor estava em funcionamento, pois os valores estavam mais estáveis do que em relação ao motor de 12 V.

Entretanto, foi percebido que não era possível trabalhar com este motor, pois ele não permitia que se chegasse a valores de rotações elevadas, ou seja, não seria viável fazer o estudo com as pás com esse tipo de motor, pois ele não comportaria os vários níveis de rotação que seriam necessários.

Figura 15 – Foto do Motor DC de 3,3 V.



Fonte: O Autor

Então, foi realizada uma pesquisa para encontrar um motor que atendesse as condições desejadas, para obter um motor que não interferisse no funcionamento dos dados de torque. Dessa forma, foi encontrada uma nova opção, que era um sem escovas da marca EMAX de modelo CF2822, o qual é mostrado na Figura 16. Ele apresentou as características desejadas, como possuir uma baixa inércia e conseguir altos valores de rotação.

Para o início dos testes, houve a necessidade de fazer adaptações na bancada, assim foi construído um suporte para o motor que não atrapalhasse o escoamento do vento. Após a adequação do motor na bancada, foram realizados testes para verificar se conseguia se comportar como o motor de 3,3 V, ou seja, sem provocar muitas oscilações nos valores de torque. Após verificar que os dados conseguiram se manter mais estáveis do que o motor de 12 V, iniciou-se os testes com os mesmos intervalos de rotação que estudos anteriores utilizaram com o motor de vidro elétrico, para que fosse possível realizar as comparações.

Figura 16 – Foto do Motor *Brushless* Instalado na Bancada de Testes.



Fonte: O Autor

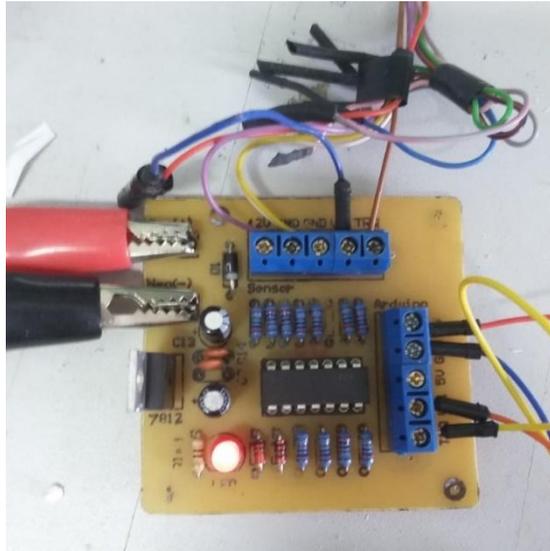
5.9 Concepção da Placa de Circuito Impresso

O circuito para a aquisição de dados foi construído em *proto-board*, e este método de montagem é utilizado normalmente para realização de testes com a finalidade de posteriormente desenvolver a placa definitiva. Dessa forma, não era muito interessante que circuito continuasse com aquele tipo de montagem, pois, tanto a sua aparência estava desagradável, devido às inúmeras conexões existentes no circuito, quanto sua segurança estava vulnerável, pois esse tipo de construção permite fáceis alterações no circuito, dessa forma existia a possibilidade de algum fio se soltar.

Dessa forma, foi construída uma Placa de Circuito Impresso (PCI), mostrado na Figura 17, onde foram colocados todos os componentes que existiam na *proto-board* e, assim, foram soldados, impedindo a possibilidade de mal contato ou até mesmo de queimar algum dos componentes. A Figura 11 mostra o circuito criado por FILHO (2015), que retrata o esquema elétrico para a aquisição de dados do sensor de torque, o qual foi todo construído na PCI.

Além disso, também foram realizadas algumas modificações, como a eliminação de uma das duas fontes que eram utilizadas, passando a ser utilizada apenas uma, bem como a transferência da conexão do sinal da velocidade de rotação, a qual ficava ligada diretamente no Arduino, foi deslocada para dentro da PCI. Também foi adicionado um regulador de tensão fixo, ou seja, que fornece apenas uma tensão de saída. Ele tem como função evitar que tensões acima do permitido, ou seja 12 V, danifiquem o circuito.

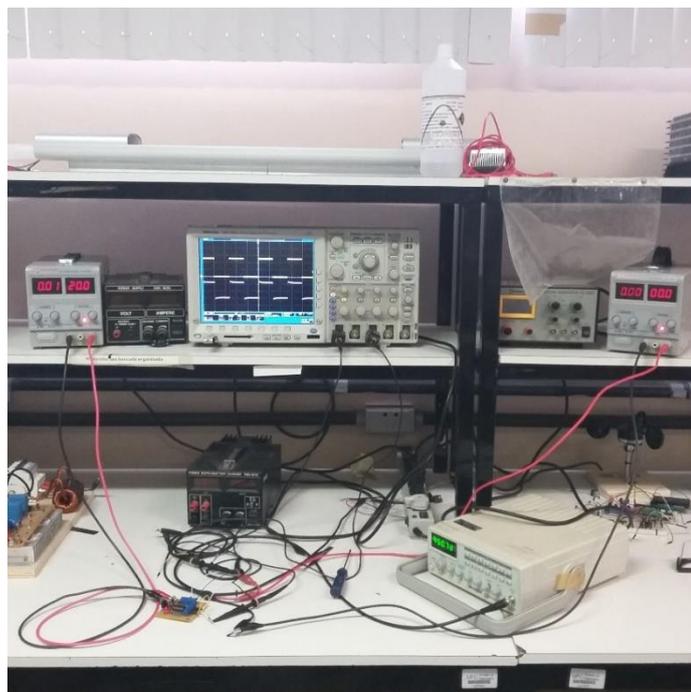
Figura 17 – Foto da Placa de Circuito Impresso.



Fonte: O Autor

Após a construção da PCI, foram realizados teste para examinar se a placa estava funcionando de acordo como era desejado, como está mostrado na Figura 18. Assim, foi utilizado um gerador de funções, o qual tem o papel de realizar simulações de pulsos para saber se a placa está conseguindo fazer o condicionamento do sinal, ou seja, se ela está realizando a amplificação do sinal corretamente.

Figura 18 – Foto do Sistema para Analisar o Funcionamento da Placa



Fonte: O Autor

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esse trabalho proporcionou uma investigação em alguns pontos da bancada de teste, buscando trazer a confiabilidade na aquisição de dados. Assim, cada etapa da metodologia será discutida.

6.1 Estudo do sistema de aquisição de dados

O teste de continuidade permitiu conferir se a corrente elétrica estava passando corretamente, tanto nos fios quanto nos componentes eletrônicos. Esse procedimento trouxe segurança ao circuito, pois, ao realizar essa verificação, constatou-se que não existia a ocorrência de um curto-circuito.

O sinal de torque possuía um ruído nos dados, pois, ao ligar somente o sistema de aquisição de dados sem que ocorresse qualquer interferência externa, como o funcionamento do motor ou o giro das pás, surgiam valores nos dados de torque. Assim, com a substituição das resistências de menor para as de maior precisão, esse ruído foi reduzido. Também foi inserido um diodo para proteção da placa Arduino, o qual é um componente fundamental para qualquer sistema, porque tem como função permitir a passagem de corrente em apenas um único sentido. O diodo se assemelha a uma chave, a qual, no sentido oposto ao desejado, age como um circuito aberto.

6.2 Teste com motores de diferentes tensões

Os motores foram analisados de acordo com os dados de torque e velocidade adquiridos através do ensaio na bancada de teste. O motor de 3,3V não seguiu o mesmo procedimento dos outros, pois, logo no início do estudo, foi percebido que ele não iria suportar as faixas de velocidades pré-estabelecidas, de acordo com estudos anteriores realizados na bancada de teste. Dessa forma, a Tabela 2 mostra os valores mínimo e máximo de torque para as faixas de velocidade.

Tabela 2 - Valores de Mínimo e Máximo para o Motor de 12 V e o *Brushless*

Velocidade	Motor 12 V		Motor Brushless	
	Torque Mínimo	Torque Máximo	Torque Mínimo	Torque Máximo
600-700	-6,88	14,62	0,65	10,42
800-900	-8,84	14,62	4,56	12,38
1000-1100	-8,84	16,58	4,56	14,33
1400-1500	-6,88	16,58	6,51	22,15

Fonte: O autor.

O levantamento foi realizado com os dois motores, de corrente contínua de 12V e o *brushless*, o quais geraram aproximadamente 200 dados e desses valores foram retirados os menores e maiores torques de cada faixa de velocidade de rotação. Analisando os dados, é possível notar que houve uma mudança dos valores mínimo e máximo em todas as faixas de velocidade. Essa alteração forneceu uma redução na diferença entre o maior e o menor torque. Entretanto, não foi possível coletar os dados para velocidades pré-estabelecidas, pois o controle do motor *brushless* não permitia fixar a rotação em um único valor.

6.3 Concepção da Placa de Circuito Impresso (PCI)

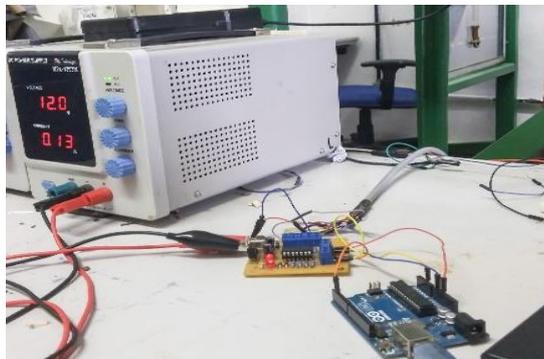
A PCI conseguiu trazer segurança ao sistema de aquisição de dados, pois a quantidade de fios foi reduzida, evitando, assim, a existência de algum mal contato, curto-circuito ou que um fio se solte acidentalmente. A placa impressa também possibilitou um ambiente de trabalho mais confiável, pois, com a retirada de umas das fontes de alimentação, e com a redução do tamanho da placa, foi minimizada a quantidade de elementos no sistema de aquisição de dados. A Figura 19 mostra a situação anterior à concepção da PCI e a Figura 20 apresenta o novo arranjo do sistema de aquisição de dados.

Figura 19 – Foto do Sistema de Aquisição sem a PCI.



Fonte: O autor.

Figura 20 – Foto do Sistema de aquisição com a PCI.



Fonte: O autor.

Após a criação da nova placa, buscou-se verificar se a mesma estava funcionando corretamente. Dessa forma, foram realizados testes em ambiente controlado para fazer esta avaliação. Com isso, o gerador de funções emulou o pulso de onda quadrada dos sensores de torque, sinal que poderia ser tanto positivo quanto negativo, para saber se a placa estava conseguindo interpretar estas duas situações. Dessa forma, com um osciloscópio foi possível visualizar o comportamento do sinal, retratado na Figura 21.

Figura 21 – Imagem do Comportamento do Sinal.



Fonte: O autor.

A imagem do osciloscópio, mostrado na Figura 21, informa que a placa está operando corretamente. Na imagem, o canal 1 ilustra o comportamento do sinal do sensor, o qual possui tensão no intervalo de -5 V a 5 V, pois os testes realizados no LAERO não ultrapassam o valor de torque de 1 N.m. Já o canal 3 apresenta o sinal de saída da placa para o arduino, este possuindo um valor de 5 V como esperado após o condicionamento do sinal.

6.4 Realização dos testes

Os ensaios foram realizados buscaram analisar o funcionamento do sistema, permitindo, assim, uma comparação com trabalhos anteriores que utilizaram os mesmos equipamentos. Com isso, foi implementado, no sistema de aquisição de dados, o código em Arduino desenvolvido por FILHO (2015), que se encontra no Apêndice A, para interpretar o sinal emitido pelo transdutor.

No túnel de vento, a velocidade do escoamento do vento foi parametrizada, assim foi utilizada em todas as medições uma velocidade de 5 m/s. Primeiramente, o teste foi realizado na ausência das pás no rotor, ou seja, o motor rotacionou o eixo sem pás em diferentes velocidades na presença de vento provocado pelo exaustor. Posteriormente, foi realizado o teste com a presença das pás, as quais estão mostradas na Figura 22, em impressora 3D com o perfil

NREL S809 e velocidade específica de ponta 7. A figura 23 mostra como ficou a disposição dos equipamentos para a realização dos testes.

Figura 22 – Foto do Conjunto de pás



Fonte: FILHO (2015)

Figura 23 – Foto da Diposição dos Equipamento para a Realização dos Testes



Fonte: O autor.

O teste foi realizado no intuito de comparar com ensaios anteriores nas mesmas condições ambientais. Nos teste foi feito um levantamento com a partir de 200 dados, com os dados coletados foi feito média destes. Dessa forma, a tabela 3 mostra os valores médio de torque para a velocidade média de rotação.

Tabela 3 - Dados de rotação e torque medidos com e sem pás, mostrando a diferença de valores nestas duas situações.

VELOCIDADE DE ROT	TORQUE COM PÁS	TORQUE SEM PÁS	DIFERENÇA
601,87	10,42256684	6,605666667	3,82
748,27	11,49527076	7,849069767	3,65
958,46	12,92142012	8,82895	4,09
1082,11	12,02006536	7,79135514	4,23
1152,18	13,22205047	9,158208955	4,06
1212,65	13,46692135	9,407074236	4,06
1317,38	12,15992867	9,4745	2,69

Fonte: O autor.

Os resultados permitiram a análise do torque e da velocidade para seguintes situações: na presença e na ausência dos protótipos de pás. A partir destes valores, foi possível realizar uma comparação com testes realizados em trabalhos anteriores. Na análise dos dados, foi possível perceber uma incompatibilidade nos valores, pois, com as mudanças realizadas neste trabalho, o torque apresentou números muito abaixo dos que foram medidos por outros autores.

7 CONCLUSÃO

O aperfeiçoamento da bancada de testes deve ser continuamente estudado, para que os dados obtidos dela sejam progressivamente melhorados. Assim, esse trabalho conseguiu colaborar com a evolução do assunto, pois propôs novas possibilidades para a bancada de teste. A investigação do funcionamento do circuito e as mudanças propostas foram bem sucedidas, por reduzir o ruído existente na leitura do sinal do sensor.

O sistema de aquisição de dados foi analisado de forma a garantir um bom funcionamento da placa, com a inexistência de um possível curto-circuito ou alterações na condução da corrente elétrica. Para isso, o teste de continuidade permitiu averiguar se todos os componentes e fios estavam conduzindo corretamente o sinal e a troca das resistências garantiu a precisão no sistema.

Os ensaios com diferentes motores mostraram a influência que este item exerce nos dados, pois, ao realizar a troca, foi percebida uma mudança no torque. O torque deve permanecer constante em uma velocidade de rotação. Com dificuldade de fixar o valor de RPM, optou-se por realizar o teste em intervalos de 100 RPM. O motor *brushless* mostrou dados mais satisfatórios, pois, na mesma faixa de velocidade, o intervalo entre o máximo e o mínimo torque é menor. Como no caso da faixa de velocidade entre 1000 RPM e 1100 RPM, que no motor de 12 V teve uma diferença entre o menor valor e o maior valor de 25,42 mV/m, já no motor *brushless* teve um diferença de 9,77 mN/m, o que significa que o motor *brushless* conseguiu deixar o torque mais estável, ou seja, com um oscilação menor, sendo esta a situação mais desejada. Nesse projeto, também foi substituída a placa de aquisição de dados por uma PCI, a qual trouxe ao sistema de aquisição de dados segurança e um melhor visual ao sistema.

Entretanto, os resultados obtidos no ensaio com as pás divergiram dos valores de ensaios anteriores. Contudo, isso pode ser ocasionado devido ao controle do motor, por ter sido difícil manter a velocidade de rotação constante, visto que esta oscilava muito.

Assim, estudos futuros podem analisar melhores formas de controlar o motor, bem como continuar os testes com outros motores *brushless*, para analisar qual melhor se adequa à bancada de teste.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, T. M. J. Projeto e Fabricação de uma Bancada de Testes para Protótipos de Pás e Rotores Eólicos. 2013, 33f. Trabalho de Conclusão de Curso - Dep. de Engenharia Mecânica e de Produção, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.**
- BAPTISTA J. P. C. **Sistema de Aquisição de Dados.** Porto Cordex: Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal, 1990.
- BOYLESTAD, R. L. N. **Dispositivos Eletrônicos e Teoria De Circuitos.** 6ta. Ed. Rio de Janeiro: Prentice-Hall do Brasil, 1999.
- BURTON, Tony et al. **Handbook of Wind Energy.** Chichester: John Wiley & Sons, 2001.
- DINIZ, M. A. B. **Avaliação de desempenho aerodinâmico de uma turbina eólica em escala, perfil NREL S809, com diferentes velocidades específicas de projeto. 2014, 107f.** Dissertação (Mestrado) – Dep. de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.
- D'AUSILIO, Alessandro. **Arduino: A low-cost multipurpose lab equipment.** Behavior Research Methods. Springer Us, p. 305-313. jun. 2012.
- FILHO, P. S. L. F. **Sistema de aquisição de dados de torque e rotação para testes de protótipos de rotores eólicos de eixo horizontal utilizando o arduino.** Trabalho de conclusão de curso – Dep. de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.
- FOWLER, R. **Fundamentos de Eletricidade: Corrente Alternada e Instrumentos de Medição,** vol 2, 7.Ed. McGraw-Hill Companies, 2013.
- HAU, E., **Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application And Economics.** Springer, 2006.
- MANWELL, J. F.; MCGOWAN, J. G.; ROGERS, A. L. **Wind Energy Explained: Theory, Design and Application.** Chichester: John Wiley & Sons, 2002.
- NETO, E.; ENIO, E. **Estudo da Complementaridade entre as Disponibilidades de Energia Hídrica e Eólica na Região Nordeste do Brasil.** Trabalho de conclusão de curso – Instituto de Pesquisas Hidráulicas e Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.
- RENEWABLE ENERGY AND JOBS. **Annual Review 2016.** Masdar City, Abu Dhabi United Arab Emirates: International Renewable Energy Agency (irena), 2016.

REN21, **Global Status Report. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, 2015**. Paris: Ren21 Secretariat, 2015. Disponível em: < <http://www.ren21.net/status-of-renewables/global-status-report/renewables-2015-global-status-report/>> Acesso em: 08/11/2016.

ROBERTS, **Michael. Beginning Arduino**. New York: Apress Inc., 2010.

SIMAS, M.; PACCA, S. **Energia eólica, geração de empregos e desenvolvimento sustentável**. Estud. av., vol.27, no.77, São Paulo, 2013.

TONG, W. **Mechanical Design of Electric Motors**. Virginia: Crc Press, 2014.

UNESCO. **Dia Mundial da Ciência pela Paz e pelo Desenvolvimento, 10 de novembro: qual é a melhor fonte de energia para o nosso futuro?**; trabalhos e desenhos premiados 2012. – Brasília: UNESCO, Senado Federal, 2012.

APÊNDICE A - CÓDIGO EM ARDUINO

No microcontrolador do Arduino foi inserido o seguinte código:

```
#include <TimerOne.h>
volatile int contaPulso = 0;
int valorAntigo = 0;
int contaAtual = 0;

const float volt = 1;
float valorvolt = 0;
float torque = 0;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Timer1.initialize(500000); // Inicializa o Timer1 e configura para um período de 0,5
  segundos
  Timer1.attachInterrupt(contador); // Configura a função contador() como a função para ser
  chamada a cada interrupção do Timer1
  attachInterrupt(0,somador,FALLING); // Configura a função somador() para ser executada a
  cada vez que o sinal recebido na
  // porta digital 12 vai do HIGH para LOW
}

void somador() {
  contaPulso++;
}

void contador() {
  contaAtual=contaPulso-valorAntigo;
  valorAntigo=contaPulso;
}

void loop() {
  valorvolt = analogRead(volt);
  valorvolt *= 0.004887585533 ;
  torque = -1*(5-2*valorvolt)*1000/5;

  Serial.print(contaAtual/3);
  Serial.print(" ");
  Serial.print(torque);
  Serial.print("\n");
  delay(500);
}
```