

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
MATHEUS HENRIQUE SOUSA

DESENVOLVIMENTO DE UM EMULADOR DE ENERGIA EÓLICA

FORMIGA - MG

2016

MATHEUS HENRIQUE SOUSA

DESENVOLVIMENTO DE UM EMULADOR DE ENERGIA EÓLICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica do IFMG-Campus Formiga, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. MSc. Gustavo Lobato Campos

FORMIGA - MG

2016

Sousa, Matheus Henrique

621.3 Desenvolvimento de um emulador de energia eólica / Matheus Henrique
S725dSousa. --Formiga : IFMG, 2016.

97p. :il.

Orientador: MSc. Gustavo Lobato Campos

Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto Federal de
Minas – *Campus Formiga*.

1. Emulador – energia eólica. 2. Controle – geração elétrica. 3. Turbina
eólica simulada. I. Título.

CDD 621.3

MATHEUS HENRIQUE SOUSA

DESENVOLVIMENTO DE UM EMULADOR DE ENERGIA EÓLICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao IFMG Campus Formiga como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Avaliado em: ___ de _____ de _____.

Nota: _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. MSc. Gustavo Lobato Campos - Orientador

Prof.^a MSc. Mariana Guimarães dos Santos - Avaliadora

Prof.^a MSc. Ana Paula Lima dos Santos - Avaliadora

AGRADECIMENTOS

A Deus, primeiramente, pelo dom da vida e por todas as maravilhas realizadas em minha caminhada.

A Edmar, Maria Teresinha, Lucas, Caroline e Thallys pelo amor, carinho, apoio e paciência em todos os momentos, principalmente durante esta jornada acadêmica.

Ao meu amigo e orientador neste projeto e no programa Ciências sem Fronteiras, professor Gustavo Lobato Campos, por todo o suporte e dedicação para auxiliar-me no desenvolvimento deste projeto e no período de intercâmbio.

A todos os professores, orientadores e amigos do IFMG - Campus Formiga, da *Penn State Harrisburg* e do *Illinois Institute of Technology* por todos os ensinamentos e auxílio nas atividades acadêmicas, bem como o companheirismo e amizade em todos os momentos nestas instituições.

Aos meus amigos de longa data, por toda a parceria, amizade e boas lembranças que dividiram e ainda dividem comigo.

A todos vocês, o meu muito obrigado e minha imensa gratidão!

RESUMO

Este trabalho discute um dos principais e mais relevantes problemas da geração de energia elétrica por meio de fonte eólica, sendo a geração não constante de eletricidade e os riscos de investimento para implantação de turbinas eólicas sem estudo prévio, e apresenta uma ferramenta promissora para a solução deste problema: o emulador de energia eólica. O objetivo deste projeto é desenvolver e construir um sistema de controle independente que possa ser utilizado em qualquer turbina eólica geradora e um simulador de dimensões pequenas quando comparado com uma turbina real. Neste emulador, os usuários podem modelar seu sistema eólico com qualquer condição de vento, o que provê maior flexibilidade para que usuários e pesquisadores possam estudar e analisar seu sistema antes mesmo de sua instalação. O *software Simulink/MATLAB* é utilizado como o controlador principal do emulador a fim de desenvolver um sistema de controle de malha fechada, usando o *feedback* de sensores, para garantir que a tensão produzida pelo gerador do emulador seja constante durante toda a simulação, mesmo quando a velocidade do vento é variante e aleatória.

Palavras-chave: Emulador de energia eólica; controle de geração elétrica; turbina eólica simulada.

ABSTRACT

This paper discusses one of the main and most relevant problems of electricity generation by wind power, as the inconstant power generation and the investment risks of its installation without prior analyses, and presents a promising tool to solve this problem: the wind power emulator. The goal of this project is to develop and build a stand-alone control and diagnostic system that can be used in any wind turbine and a small size simulator (when compared to an actual turbine). In this emulator, users can model their wind system using any wind conditions, which provides more flexibility for users and researchers to study and analyze their system before its installation. The software Simulink/MATLAB is used as the emulator main controller in order to develop a closed-loop control system, getting the feedback from a group of sensors to ensure that the voltage produced by the generator of the emulator is constant throughout the simulation, even when the wind speed is random and variant.

Keywords: wind power emulator; electric power control; simulated wind turbine.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Turbina eólica de Charles Francis Brush, em Ohio, 1888.	10
Figura 2 - Mapa eólico da Europa ocidental.....	14
Figura 3 - Exemplo de relação entre potência gerada e velocidade do vento.	15
Figura 4 - Componentes de uma turbina eólica.....	16
Figura 5 - Dimensões e capacidade das turbinas mundiais atuais.....	17
Figura 6 - Campo eólico terrestre, localizado na Alemanha.	19
Figura 7 - Diagrama de blocos do sistema de emulação da turbina eólica.....	21
Figura 8 - Sistema mecânico do emulador, em funcionamento.....	22
Figura 9 - Os três grandes grupos de divisão do emulador de energia eólica proposto.....	26
Figura 10 - Diagrama de blocos do emulador de energia eólica.	27
Figura 11 - Arduino Due, utilizado como controlador principal.	29
Figura 12 - Arduino Uno, utilizado como controlador secundário.....	29
Figura 13 - Visor LCD 16x2 usado para monitoramento.	30
Figura 14 - Máquinas e conversor utilizados.	31
Figura 15 - Inversores utilizados para acionamento dos motores.....	31
Figura 16 - Sensor de efeito Hall e ímã utilizados.	32
Figura 17 - Sensor de efeito Hall e ímã acoplados ao rotor do motor de indução.....	32
Figura 18 - Sensor de correntes utilizado.....	33
Figura 19 - Diagrama do controlador, criado em <i>Simulink</i>	35
Figura 20 - Detalhes do bloco " <i>Subsystem</i> "	37
Figura 21 - Medição dos tempos de subida do sensor de efeito Hall por meio de osciloscópio.....	39
Figura 22 - Valores de velocidades de ventos aleatórios usados para teste do emulador.....	42
Figura 23 - Velocidade de rotação do motor de indução (turbina simulada) de acordo com os valores de incidência de ventos.	43
Figura 24 - Tensão gerada pelo emulador sem a utilização dos controladores.	43
Figura 25 - Variação da tensão do circuito de excitação independente do gerador CC.	44

Figura 26 - Tensão gerada pelo emulador utilizando o controlador para geração constante.....	45
Figura 27 - Velocidade de rotação da turbina simulada de acordo com a incidência do vento e do limite máximo de velocidade permitido.	46
Figura 28 - Tensão do circuito de excitação do gerador CC e tensão gerada pelo emulador (com limitação da velocidade máxima).	47
Figura 29 - O emulador de energia eólica completo e seu autor, Matheus Henrique.	48

SUMÁRIO

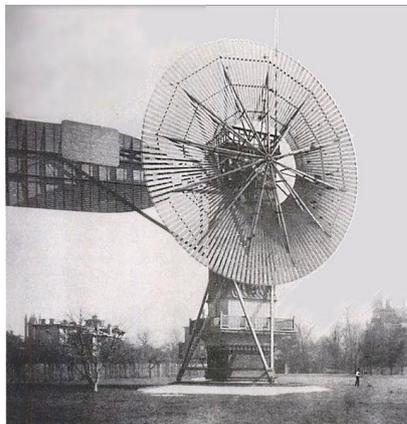
1. INTRODUÇÃO	10
1.1. Objetivos	12
1.1.1. Objetivos gerais	12
1.1.2. Objetivos específicos	12
1.2. Justificativa e relevância	13
2. REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1. Geração de energia eólica.....	16
2.2. Turbinas atuais	17
2.3. Modelagem e controle de parques eólicos.....	18
2.4. Emuladores de energia eólica	20
3. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO.....	24
3.1. Definição dos equipamentos e procedimentos pré-projeto	24
3.2. Visão geral do projeto.....	25
3.3. Pesquisa com possíveis consumidores	27
3.4. Equipamentos, dispositivos e <i>software</i>	28
3.5. O papel do emulador de energia eólica	34
3.6. Desenvolvimento e aplicação do algoritmo do controlador	35
3.7. Definição do sensor de velocidade de rotação	38
3.8. Integração dos sistemas	39
3.9. Testes realizados	40
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
4.1. Resultados do emulador sem o controlador de geração	42
4.2. Resultados do emulador com controle de geração.....	44
4.3. Resultados do emulador com a inserção de limites de velocidade	46
5. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS.....	49
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	51

APÊNDICES	54
APÊNDICE A - Lista de equações.	55
ANEXOS	58
ANEXO A - Modelo do questionário para possíveis clientes sobre características do sistema.	59
ANEXO 2 - Relatório sobre o emulador de energia eólica (realizado nos EUA.).....	60

1. INTRODUÇÃO

A energia eólica é obtida pela extração da energia mecânica proveniente dos ventos e convertida em energia elétrica. No final do século XIX teve início esta prática a fim de gerar energia elétrica utilizando os ventos como fonte para mover o rotor do gerador em questão. Em 1887, o engenheiro e professor escocês James Blyth iniciou os experimentos sobre geração eólica e, após três *designs* de turbinas diferentes, construiu uma grande turbina em sua fazenda, utilizando pás de tecido para captar a massa de ar, conseguindo gerar energia elétrica para carregar acumuladores usados para iluminação de sua residência por cerca de 25 anos. Em 1891 tal experimento deu origem a uma patente, sendo datado como a primeira turbina eólica da história (THE COURIER, 2015). Em 1888, em Ohio, Estados Unidos, o inventor americano Charles Francis Brush também conseguiu produzir energia elétrica por meio de um gerador alimentado a energia eólica. Este gerador alcançava uma potência máxima de 12 kW e tinha a finalidade de carregar um banco de 408 baterias que forneciam eletricidade à residência e ao laboratório de Brush (THE GUARDIAN, 2015). Na Figura 1 ilustra-se a primeira turbina eólica americana da história. Em 1890, o inventor dinamarquês Poul la Cour foi o primeiro a descobrir que quanto maior a velocidade que a turbina girasse, mais eficiente esta seria para produzir eletricidade. Em 1904, então, la Cour fundou a Sociedade dos Eletricistas Eólicos, que ministrou os primeiros cursos sobre geração eólica. A partir disso as turbinas e geradores têm evoluído e ganhado mais espaço, representando, nos dias atuais, cerca de 4,0% da produção mundial de eletricidade, sendo utilizadas para uma imensa gama de propósitos, desde carregamento de baterias em residências isoladas até a providência de energia para redes elétricas nacionais (WWEA, 2016).

Figura 1 - Turbina eólica de Charles Francis Brush, em Ohio, 1888.



Fonte: RIGHTER, 1996

Até os dias atuais, o tipo de geração de energia mais utilizado no mundo é a geração térmica, proveniente principalmente da queima de combustíveis fósseis como carvão, óleo e gás natural. Contudo, com a taxa de consumo atual deste tipo de material, as reservas de óleo estarão esgotadas em cerca de 40 anos (ECOTRICITY, 2015). Devido a este fator, as energias renováveis (como energias solar, eólica, marítima, etc.) são consideradas o futuro da produção de energia elétrica por serem limpas (não emitem poluentes), sustentável, econômica para indústrias e para o governo, e vêm atraindo inúmeros pesquisadores para a área. No entanto, apesar de seus pontos positivos, a energia eólica não pode ser considerada uma fonte confiável, devido à sua variação, gerando valores diferentes de geração a todo momento (as variações nos regimes e fluxos dos ventos apresentam graus de incerteza maiores que as variações de vazão d'água, com fatores de capacidade de cerca de 35% contra 65% da geração hidrelétrica). Muitos estudos sobre mapeamento, medição e previsão dos ventos são necessários para definir a viabilidade da implantação de um campo de turbinas eólicas em determinada região. Os custos de instalação da mesma também são elevados, podendo chegar à cerca de US\$ 1.500.000,00 por cada 1 MW de capacidade instalado (WORLDPRESS, 2016).

A fim de obter-se o máximo possível de eletricidade gerada utilizando a energia dos ventos, pesquisadores precisam analisar as características do sistema de energia eólica antes de iniciar sua instalação. Para tanto, o método mais efetivo é a experimentação do modelo a ser implantado em simuladores de *hardware* e *software*, nos quais o sistema pode demonstrar sua performance. Alguns emuladores de energia eólica já estão em desenvolvimento e oferecem a flexibilidade para seu usuário aplicar as condições de ventos desejadas e simular testes a fim de analisar a viabilidade de uma possível instalação de um campo eólico. Além disto, o controle sobre a geração elétrica desta turbina também é levado em conta, buscando eliminar a maior desvantagem deste tipo de geração: a inconstância de sua fonte de energia (os ventos), fazendo com que a potência gerada seja constante sob qualquer condição externa.

Neste trabalho apresenta-se o emulador construído pelo autor Matheus Henrique durante dois semestres letivos na universidade *Penn State Harrisburg* (PSH), em seu intercâmbio nos Estados Unidos pelo programa do governo federal brasileiro "Ciências sem Fronteiras" (CsF), entre Agosto de 2015 e Maio de 2016. Destaca-se como co-autor deste emulador o discente da *Penn State Harrisburg*, Thien Pham. Além destes, cita-se a participação neste projeto do professor PhD. Peter Idowu, da PSH, como orientador técnico, e

por fim do professor Gustavo Lobato Campos, do IFMG - Formiga, como orientador de Matheus Henrique no projeto e no programa de intercâmbio CsF.

O autor deste trabalho esteve diretamente envolvido no processo de construção deste emulador nas tarefas pertinentes à: pesquisa e desenvolvimento do controlador do sistema; equacionamento das máquinas elétricas; pesquisa dos sensores e métodos de medição de velocidade de rotação de motores; conexões de sensores e integração das máquinas elétricas; integração dos subsistemas; avaliação de testes dos sensores e controladores; testes finais do sistema e apresentação e documentação do emulador. Este projeto foi apresentado na "*Capstone Design Conference*", conferência para apresentação dos trabalhos de conclusão de curso na universidade *Penn State Harrisburg*, na cidade de Harrisburg, Pensilvânia, Estados Unidos, em Maio de 2016. Tal apresentação foi requisito para aprovação do autor nas disciplinas "*EE 405: Capstone Proposal Preparation*" e "*EE 406W: Electrical Engineering Capstone Design*", cursadas na mesma instituição. Essas disciplinas são consideradas como o trabalho de conclusão de cursos de engenharia da PSH nas quais os alunos pesquisadores devem desenvolver um produto/protótipo inovador em seus projetos.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivos gerais

Este trabalho descreve o desenvolvimento, montagem, testes e análises de um Emulador de Energia Eólica (EEE) e tem por objetivo criar um equipamento para controle e monitoramento da geração de eletricidade de qualquer turbina eólica existente, possibilitando a simulação de sistemas geradores com condições de vento diferentes e aleatórias.

1.1.2. Objetivos específicos

Este emulador deve possuir as seguintes especificações:

- Ser desenvolvido utilizando controladores Arduino e *software Simulink/MATLAB*;
- Controlar e monitorar um sistema gerador eólico de maneira independente;
- Possuir tamanho reduzido quando comparado a uma turbina real para permitir que usuários e pesquisadores realizem estudos e simulações de seus geradores em diferentes

condições de ventos sem a necessidade de sair de seu laboratório ou realizar uma pesquisa em campo;

- Possuir um sistema *closed loop* (sistema em malha fechada), no qual diversos sensores coletam informações sobre os valores gerados e os retornam ao controlador para que este possa recalcular e ajustar o equipamento, a fim de obter-se o melhor resultado gerado pela turbina e expor ao usuário estes valores para fins de monitoramento;
- Ter a capacidade de ser aplicado em simulações de *hardware* de nível real e ser utilizado para carregar um sistema de baterias CC (corrente contínua).

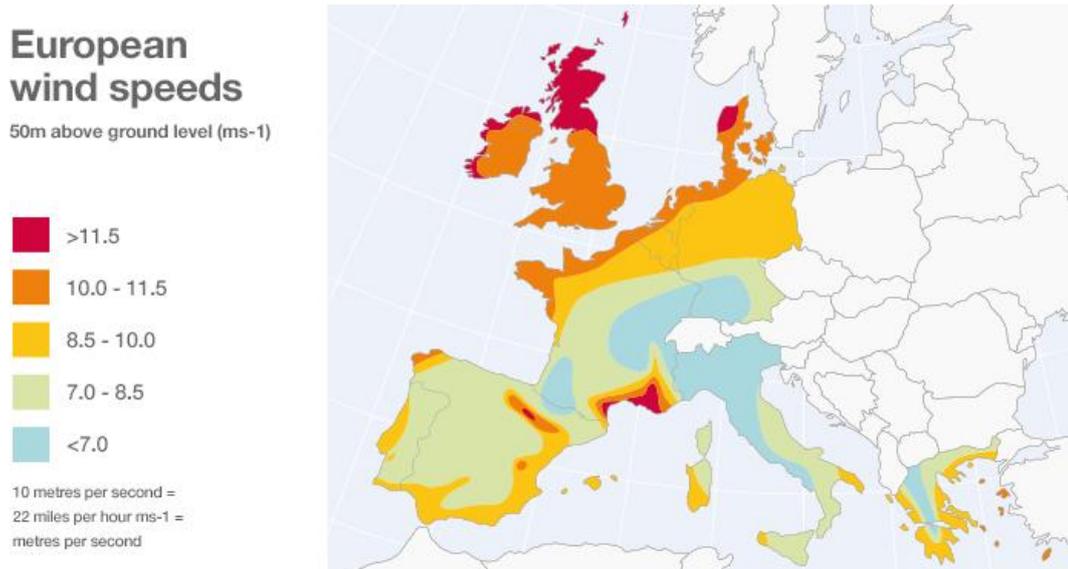
1.2. Justificativa e relevância

A ideia para este trabalho surge da maior desvantagem encontrada na geração de energia eólica, existente desde o seu princípio: a inconsistência do vento. Sendo o vento uma fonte natural inconstante, este tipo de geração também o é, o que torna difícil a sua integração ao sistema elétrico existente (WORLDPRESS, 2016). Segundo Salles (2004), especialmente para pequenos intervalos de tempo (por exemplo, um dia), a falta de constância da velocidade do vento afeta diretamente a sua operação em conjunto das demais fontes energéticas na rede elétrica. Este comportamento pode ocorrer em diversas escalas, sendo as mais relevantes o controle da turbina eólica e a integração deste tipo de geração à rede elétrica convencional. O impacto da energia gerada por fontes eólicas no sistema elétrico depende de uma operação eficiente deste sistema, por parte de técnicos e operadores do mesmo, em prever a disponibilidade de energia dos ventos, já que o sistema elétrico deve operar de forma intermitente. Uma boa previsão de incidência de ventos permite a estes operadores programar mais adequadamente a produção de eletricidade para melhor atender a demanda de energia elétrica. Tal ação de previsão também pode ser substituída ou acoplada a um sistema capaz de controlar a geração eólica com o mesmo intuito de manter a rede elétrica funcionando sem interrupções.

Em muitas regiões, a incidência de ventos chega a ser tão baixa que não produziria eletricidade alguma. Em outras, pode ser tão aleatória que pode vir a gerar grandes quantidades durante um período do dia, mas não gerar nada no restante do mesmo. E durante o período de produtividade da turbina, as variações existentes da incidência de vento fazem com que a potência gerada também seja inconstante e, portanto, pouco confiável. Enfim, a energia eólica acaba por ser amplamente viável apenas em regiões onde a incidência de

massas de ar é muito elevada (algumas regiões da China e Europa, por exemplo), garantindo assim uma produção mínima aceitável para compensar o investimento requerido (WORLDPRESS, 2016). A Figura 2 apresenta um mapa eólico europeu para ilustrar a diferença de velocidades de ventos mesmo em regiões muito próximas e com geografias parecidas.

Figura 2 - Mapa eólico da Europa ocidental.

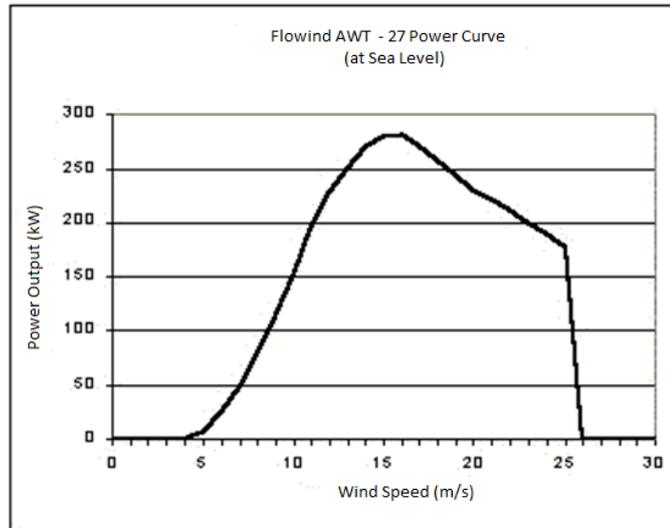


Fonte: <http://www.banksgroup.co.uk/banks-group/banks-renewables/faqs/turbine-efficiency/>

Uma outra desvantagem, que atinge o lado econômico, é o investimento inicial para instalação de um campo eólico, que é caro e pode chegar facilmente à casa de milhões de dólares. Logo, faz-se necessário um estudo longo e minucioso sobre a incidência de ventos de uma determinada região para enfim chegar à conclusão sobre a viabilidade de implantação de um campo eólico na mesma.

A Figura 3 apresenta um gráfico com a relação entre a potência gerada e a velocidade do vento, demonstrando que a turbina é incapaz de gerar eletricidade sob certas velocidades e também a aleatoriedade desta geração devido a diferentes valores de incidência. A otimização destes valores gerados pelo sistema eólico pode ser alcançada pela correção da variação de energia elétrica produzida por meio de um controle independente aplicado à turbina, mesmo diante de diferentes velocidades dos ventos incidentes.

Figura 3 - Exemplo de relação entre potência gerada e velocidade do vento.



Fonte: ROSEN, 1998.

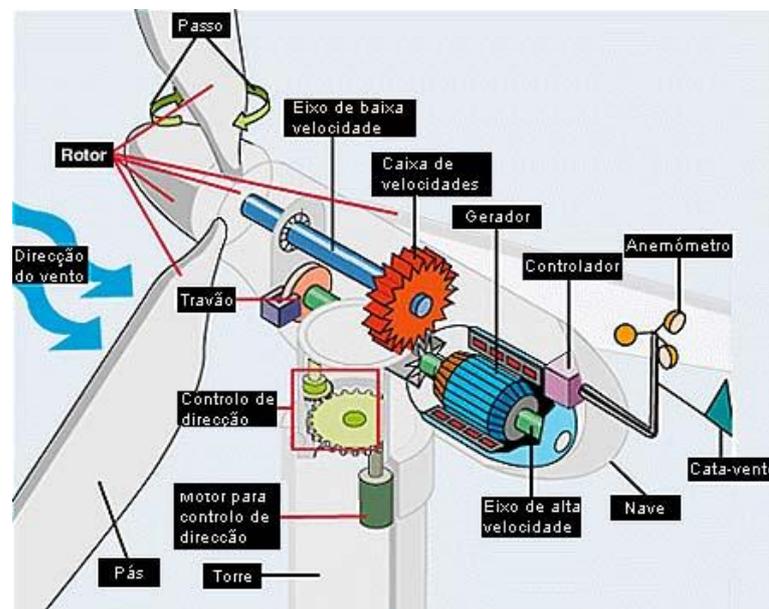
Um equipamento capaz de minimizar os problemas previamente citados é fundamental para o desenvolvimento e, conseqüentemente, o futuro da geração de energia eólica. O emulador apresentado neste trabalho é uma ferramenta capaz de otimizar uma solução para estes problemas, já que anulá-los é ainda impossível devido a momentos e/ou regiões com incidências muito baixas de ventos, nos quais a turbina não adquire a força mecânica necessária para girar o rotor do seu gerador.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Geração de energia eólica

A turbina eólica transforma parte da energia cinética dos ventos incidentes sobre a área de suas pás em energia mecânica para rotação do rotor. O eixo deste rotor é acoplado a um gerador elétrico e a sua rotação permite que o gerador produza eletricidade (RÜNCOS *et al.*, 2000). A Figura 4 ilustra alguns dos componentes que formam uma turbina eólica.

Figura 4 - Componentes de uma turbina eólica.



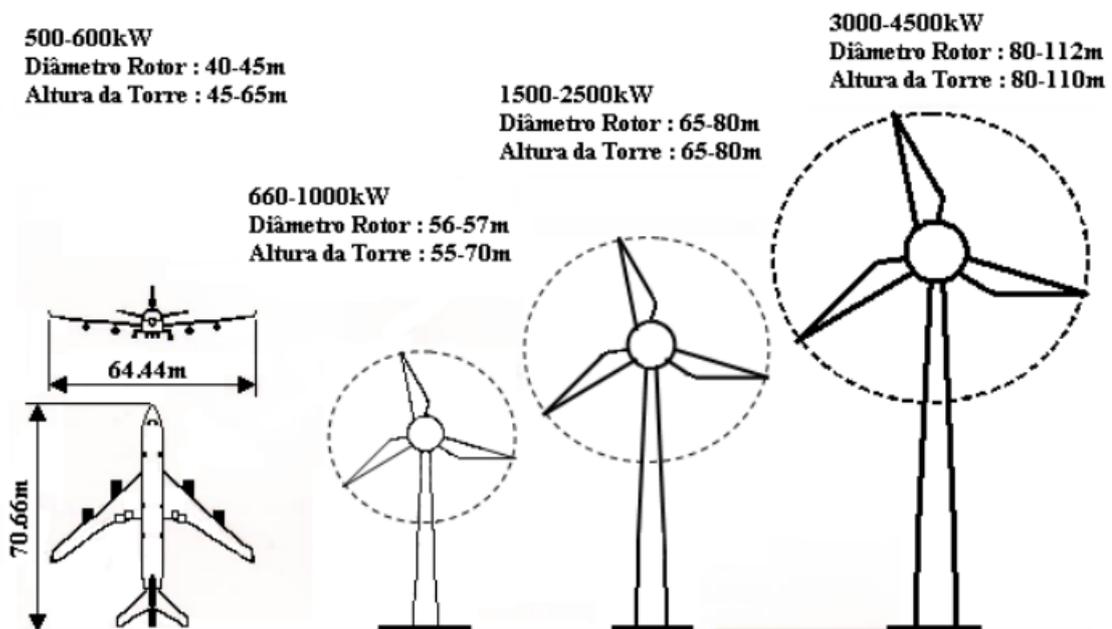
Fonte: <http://www.industriahoje.com.br/o-que-e-um-gerador-eolico>

Como apresentado pela ilustração, são vários os componentes de uma turbina, como a caixa de velocidades (conjunto de engrenagens redutoras que permitem que o gerador "sinta" a rotação do rotor da turbina de maneira mais efetiva), controle de direção (engrenagens que ajustam o eixo da turbina para que suas pás estejam sempre perpendiculares à incidência do vento, provendo maior proveito desta fonte), torre de sustentação, travão (ou freio, acionado em casos de velocidades muito altas de ventos, de modo a frear o rotor e impedir danos ao gerador), dentre outros.

2.2. Turbinas atuais

Ainda segundo Rüncos *et al.* (2000), os geradores eólicos têm passado por grande desenvolvimento tecnológico atualmente a fim de aumentar suas dimensões e capacidades de geração. A Figura 5 demonstra as dimensões das turbinas atualmente presentes no mercado mundial, comparando-as com um Boeing 747. Até o momento, existem turbinas que entregam até 2 MW de potência e já estão em desenvolvimento as de potência superior a este valor.

Figura 5 - Dimensões e capacidade das turbinas mundiais atuais.



Fonte: RÜNKOS *et al.*, 2000.

Importante citar que ao se estimar o consumo médio de uma casa em aproximadamente 165 quilowatts-hora por mês, uma única turbina de 2 MW seria capaz de abastecer cerca de 2900 casas (NO MINUTO, 2016).

Nos quesitos ecológico e social, a rotação das turbinas atuais é otimizada para diminuir o ruído aerodinâmico das pás, satisfazendo as exigências de ruído próximo a áreas residenciais mesmo quando instaladas a distâncias da ordem de 300 metros. Quanto maior a turbina, também, menos veloz é a sua rotação. A rotação mais baixa das turbinas modernas permite que as pás sejam visíveis e, portanto, possam ser evitadas por pássaros durante o voo,

diminuindo este impacto sobre a fauna local (problema que existe desde o início deste tipo de produção). Esses aspectos fazem da tecnologia eólico-elétrica uma fonte de geração de energia ecologicamente correta, sendo classificada como uma fonte limpa e alternativa e com capacidade de geração na casa de megawatts (RÜNCOS *et al.*, 2000).

Apesar de todos os avanços para esta tecnologia, a geração eólica é totalmente dependente da velocidade de incidência dos ventos sobre as pás da turbina. Segundo Rüncos *et al.* (2000), ventos da ordem de 2,5 m/s (metros por segundo, ou seja, 9,0 km/h) já podem ser empregados para geração de eletricidade. Abaixo deste valor, o conteúdo energético do vento é muito baixo e, portanto, não justifica o seu aproveitamento. Para ventos com velocidade entre 2,5 m/s e 12,0 m/s, a potência gerada varia muito, de acordo com o valor do vento elevado ao cubo. Enfim, em alguns tipos de equipamentos, é possível, para a faixa de velocidade dos ventos entre 12,0 m/s e 25,0 m/s, ativar um sistema de limitação automático de potência, para o qual a eletricidade gerada possui valores quase constantes. Para velocidades acima de 25,0 m/s, porém, um sistema de proteção deve ser ativado, no qual a turbina é freada, a rotação das pás é reduzida e o gerador é desconectado da rede elétrica para evitar danos aos equipamentos. Assim, devido à característica de velocidade variável, a turbina eólica não consegue transformar a energia do vento em energia elétrica de maneira constante.

2.3. Modelagem e controle de parques eólicos

Parques eólicos são grandes espaços terrestres ou marítimos onde são concentradas diversas turbinas eólicas, resultando em campos de geração de energia elétrica. Para a construção destes parques é necessário um profundo estudo sobre as áreas e regiões onde eles serão instalados pois uma má localização pode causar impactos ambientais e sociais negativos, como morte de aves e poluição sonora, problemas já citados previamente. Quanto maior o número de turbinas instaladas em um parque eólico, maior a vantagem econômica devido à larga escala de produção de eletricidade. Estas várias turbinas podem ser instaladas em diferentes configurações, baseadas nas características geográficas do local, buscando sempre o melhor alinhamento com a direção de incidência do vento (PAO e JOHNSON, 2009). A Figura 6 ilustra um parque eólico *on-shore*, ou parque eólico terrestre, localizado no estado de Lower Saxony, na Alemanha.

Figura 6 - Campo eólico terrestre, localizado na Alemanha.



Fonte: MAY, P. (2008).

Segundo Pao e Johnson (2009), pela perspectiva de sistemas de controle de parques eólicos de geração, duas áreas dividem o foco principal: o controle da geração de eletricidade por todas as turbinas e o controle coordenado de energia produzida por turbinas individuais para minimizar os efeitos negativos de interação aerodinâmica.

Ao mesmo tempo que os campos eólicos auxiliam na redução do custo médio de energia devido à sua escala econômica, a interação aerodinâmica entre as turbinas pode diminuir a energia total convertida em eletricidade quando comparado com o mesmo número de turbinas, porém de forma isolada, operando sob as mesmas condições de ventos. Isto ocorre porque cada turbina pode desacelerar o vento incidente sobre ela por uma distância de até 20 km, fazendo com que o mesmo vento incida com uma velocidade inferior sobre as demais. Estas turbinas são então espaçadas umas das outras de forma paralela e perpendicular à direção do vento, porém tal técnica requer áreas maiores para implantação dos campos eólicos e impede a utilização de parte da terra ou mar devido a este fator.

É praticamente impossível eliminar este efeito da interação aerodinâmica e, portanto, um sistema de controle coordenado de todas as turbinas de um parque eólico deve ser estabelecido. A estratégia, por exemplo, de instalar estas turbinas de forma que cada uma possa entregar o máximo de sua potência não leva ao máximo de geração possível por todo o campo eólico em conjunto devido ao espaçamento necessário entre as mesmas, deixando inutilizável uma grande área. Ao diminuir este espaçamento entre as turbinas, entretanto, apenas aquelas localizadas nas bordas (que recebem primeiramente a incidência dos ventos) extraem a maior parte da energia, porém desaceleram o mesmo vento antes que este incida sobre as demais turbinas.

Dessa forma, é extremamente necessário, visando a máxima extração de energia elétrica possível, que métodos e estratégias de controle sejam aplicados aos parques de geração eólicos, como por exemplo o emulador de energia proposto neste trabalho uma opção a ser considerada neste processo.

2.4. Emuladores de energia eólica

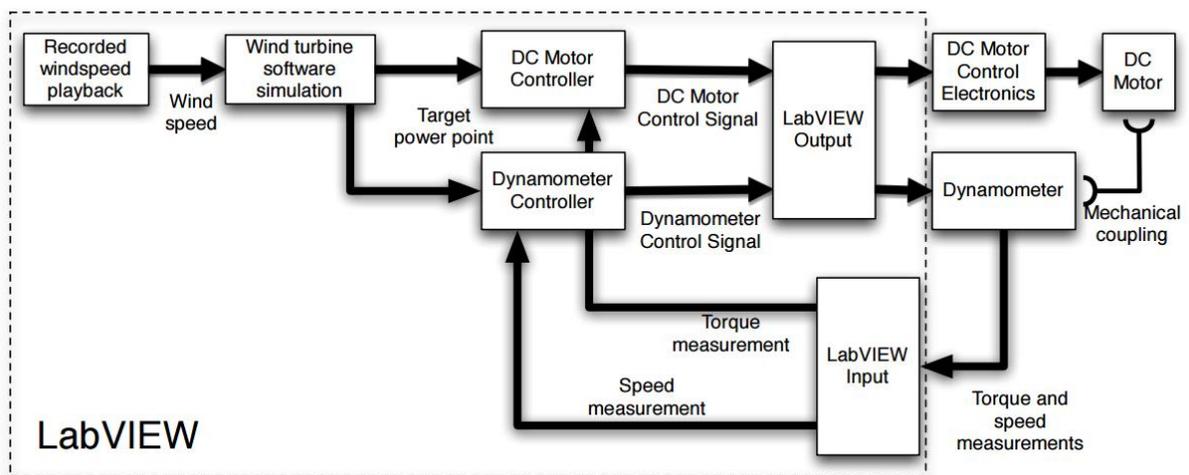
Assim como os combustíveis fósseis vem se tornando mais caros e agressivos ao meio-ambiente, a demanda por fontes renováveis aumenta cada vez mais, sendo a energia eólica uma das alternativas presentes. Porém, fontes que se apresentem não-confiáveis tornam complexo este processo de migração para novas fontes energéticas. Por isto, a busca por métodos para controle se torna importante, com o intuito de aumentar a eficiência e obter-se a captura máxima destes novos tipos de fontes geradoras, além de ser uma ferramenta de grande valia para fases iniciais de projetos (HARDY e JEWELL, 2011).

Hardy e Jewell (2011) buscaram criar um *software* para modelagem e simulação, capaz de desenvolver e testar turbinas eólicas usadas em aplicações reais. Para tornar a ideia mais realista em termos de técnicas de controle do gerador, os dois pesquisadores desenvolveram, por fim, um emulador no qual um motor elétrico seria responsável por girar o rotor do gerador, imitando assim uma turbina geradora com capacidade de 1,5 MW.

O DICIONÁRIO PRIBERAM (2013) define um emulador como um dispositivo capaz de imitar por emulação e fazer o possível para igualar ou exceder outro dispositivo. O emulador de energia eólica busca, portanto, "imitar" o funcionamento de uma turbina real, com o objetivo de obter resultados semelhantes, sem a necessidade de utilização da mesma.

Segundo Hardy e Jewell (2011), o maior problema neste tipo de projeto é o modelo a ser utilizado como *software* de simulação. Os dados de entrada seriam diferentes velocidades de ventos que seriam aplicadas ao modelo de turbina para produzir a potência de saída usada como referência para controle do motor e produzir energia mecânica para o emulador. Os autores utilizaram o *software* LABVIEW para emulação dos componentes mecânicos, cálculo da potência de geração desejada levando em consideração as velocidades dos ventos gravadas, a curva de potência máxima, o modelo da turbina e qualquer outro valor de parâmetros reais que pudesse complementar os cálculos. Uma visão geral do diagrama de blocos do emulador de Hardy e Jewell (2011) pode ser visto na Figura 7 a seguir.

Figura 7 - Diagrama de blocos do sistema de emulação da turbina eólica.



Fonte: Hardy e Jewell (2011).

O projeto de Hardy e Jewell (2011) utilizava também controladores proporcionais integrais derivativos (PID) e dinamômetros para controlar respectivamente a turbina e o gerador emulados. O controlador PID é uma técnica de controle de processos que une ações de controladores, fazendo com que um sinal de erro seja minimizado pela ação proporcional, zerado pela ação integral e obtido com uma velocidade antecipada pela ação derivativa (WESCOTT, 2000). Ao término de seu projeto, o emulador de Hardy e Jewell (2011) conseguiu simular e acompanhar de forma satisfatória, segundo os autores, as variações dos valores de *input* do vento e puderam concluir que seus resultados poderiam ser utilizados para o desenvolvimento de estratégias de controle de geradores eólicos. O sistema também

demonstrou habilidade para seguir as mudanças na potência gerada baseado na velocidade do vento e mostrou os efeitos de inércia da turbina que limitavam a habilidade de responder rapidamente às variações do vento. A Figura 8 mostra o sistema mecânico real, funcionando juntamente com o *software* simulador, no laboratório dos autores.

Figura 8 - Sistema mecânico do emulador, em funcionamento.



Fonte: Hardy e Jewell (2011).

Outro exemplo deste tipo de dispositivo é a turbina eólica isolada de pequeno porte, desenvolvida por Arifujjaman, Iqbal e Quaciao (2011). Tal emulador foi construído, segundo seus autores, utilizando um motor CC com excitação independente para emular a turbina e um gerador síncrono. Um microcontrolador PIC foi utilizado para controle da corrente de armadura do motor de corrente contínua a fim de emular altas velocidades de ventos incidentes, além de dispositivos de eletrônica de potência (conversores CC-CC e modulação de largura de pulso, conhecido como PWM, por exemplo) que têm a função de extrair a máxima potência possível do sistema. O emulador de energia eólica de pequeno porte de Arifujjaman, Iqbal e Quaciao (2011) é designado para uso em localidades remotas e isoladas, geralmente na ausência da rede de energia elétrica. Neste cenário, a eletricidade é primeiramente retificada por uma ponte retificadora trifásica e então passa por um conversor CC- CC. Nessa situação o emulador de turbina eólica de pequeno porte e seu controlador de

máxima potência são ferramentas poderosas para garantir a maximização de energia elétrica gerada. Os autores concluem ainda que, após os testes e experimentos realizados, as funcionalidades de limitação de corrente em casos de ventos com pouca capacidade de geração (velocidades muito baixas) responderam satisfatoriamente e o controlador apresentou a performance desejada, independentemente da velocidade de incidências de vento e dinamismo do motor.

Finalmente, as seções seguintes apresentam os materiais, métodos, desenvolvimento e resultados do emulador de energia eólica desenvolvido para este trabalho, utilizando o *software Simulink/MATLAB* e controladores Arduino, apresentando uma proposta inovadora para correções de um dos principais problemas atuais para geração eólica e de um modo ainda não abordado por outros pesquisadores, aumentando a viabilidade para esse tipo de geração e consequentemente diminuindo a necessidade de fontes geradores não-renováveis.

3. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

3.1. Definição dos equipamentos e procedimentos pré-projeto

Antes da montagem e construção do emulador de energia eólica, vários parâmetros e configurações necessitavam ser pesquisados e selecionados para que o projeto fosse inovador e atendesse as expectativas iniciais. As definições dos tipos de máquinas a serem utilizadas para emulação, os controladores e sensores de monitoramento, os *softwares* responsáveis pelos cálculos e comandos dos controladores, etc., são alguns dos procedimentos a serem considerados antes mesmo do início da construção do protótipo final.

Primeiramente, em conjunto com o orientador do projeto, foi definido o *software* usado para o controle principal do sistema e cálculos dos parâmetros a partir de condições iniciais (velocidade dos ventos incidentes, por exemplo) e *feedback* dos sensores. O *Simulink*, *software* desenvolvido pela empresa *MathWorks*, em conjunto com o MATLAB, da mesma empresa, foi selecionado para o projeto devido à sua potencialidade para criação e processamento de sistemas de controle por meio de diagramas de blocos. Apesar de ser um *software* um pouco mais "pesado" computacionalmente do que outras linguagens de programação mais tradicionais, como C/C++, *Python*, dentre outras, suas ferramentas disponíveis permitem cálculos mais avançados e com maior precisão, maior clareza na criação do algoritmo de controle e maior praticidade para testes com diferentes parâmetros em situações diversas. Até a presente data, não há registros de nenhum emulador de turbina eólica que utilize *Simulink* como seu *software* principal.

Além da escolha deste *software*, foram definidos também, previamente: o motor de indução trifásico, a ser usado para emular a turbina eólica, e o gerador CC; controlador principal, Arduino Due, devido principalmente à sua compatibilidade para processamento de algoritmos criados em *Simulink*/MATLAB e de suas especificações técnicas (32 bits, *clock* de 84 MHz, 12 entradas analógicas, conexão USB etc.); o sistema de *closed loop* (sistema de malha fechada) para obter-se o *feedback* dos valores gerados medidos pelos sensores. Um levantamento de dados também foi gerado por meio de um questionário respondido por possíveis clientes que utilizariam o protótipo final (neste caso, os clientes foram alunos de mestrado e doutorado e professores doutores da universidade). Este questionário segue em anexo e foi utilizado para a definição de vários outros fatores iniciais do projeto, como a presença um sistema audiovisual para emergências, o tipo de monitoramento, métodos de

proteção, capacidade para controle independente e atualizações futuras, dentre outros. Com base em todas estas predefinições mencionadas, deu-se início a construção do emulador de energia eólica.

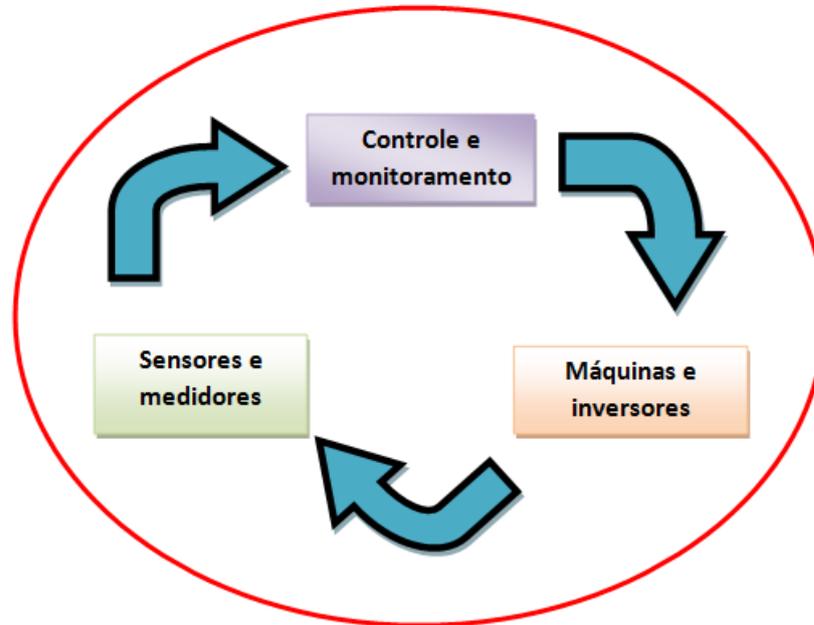
Com o progresso do projeto, outros equipamentos foram sendo definidos. A universidade *Penn State Harrisburg* disponibilizou os motores, inversores de frequência, conversores, sensores e medidores de tensão e correntes utilizados. Os demais equipamentos ainda necessitariam de mais pesquisas para sua definição e obtenção. A ideia inicial era utilizar apenas um controlador, o Arduino Due. Contudo, apesar de todas as suas vantagens, este modelo do equipamento possui tensão de saída de apenas 3,3 V, diferente de outros modelos de sua família que geralmente dispõem de 5,0 V. Um Arduino Uno, então, foi escolhido como um controlador secundário pois o sistema de monitoramento, utilizando um *display* LCD, requeria um valor de tensão de saída de 5,0 V, além de possuir uma biblioteca específica para demonstração de dados no visor. O controlador secundário também foi responsável por receber a leitura dos sensores e repassar os dados ao Arduino Due. Dessa forma, o controlador principal pôde ser usado exclusivamente para controle das máquinas elétricas do sistema.

Com o estudo das equações das máquinas utilizadas neste trabalho para geração de energia, constatou-se que seria necessário obter o valor da velocidade de rotação do motor de indução trifásico (simulando a turbina eólica) a fim de calcular os parâmetros para controle do gerador. Destaca-se que a lista de equações utilizadas está disponível no apêndice deste trabalho e foi diretamente incorporada no algoritmo do controlador. Após diversas pesquisas, o sensor de efeito Hall foi selecionado para realizar a medição da velocidade do rotor girante e integrado ao sistema conectado ao controlador secundário. Com os dados colhidos por ele, tornou-se possível a implementação do emulador em questão, bem como seu monitoramento.

3.2. Visão geral do projeto

O emulador de energia eólica desenvolvido pode ser separado em três grandes grupos de equipamentos interligados, resultando no protótipo final do projeto. A Figura 9 ilustra esses grupos e suas correlações.

Figura 9 - Os três grandes grupos de divisão do emulador de energia eólica proposto.



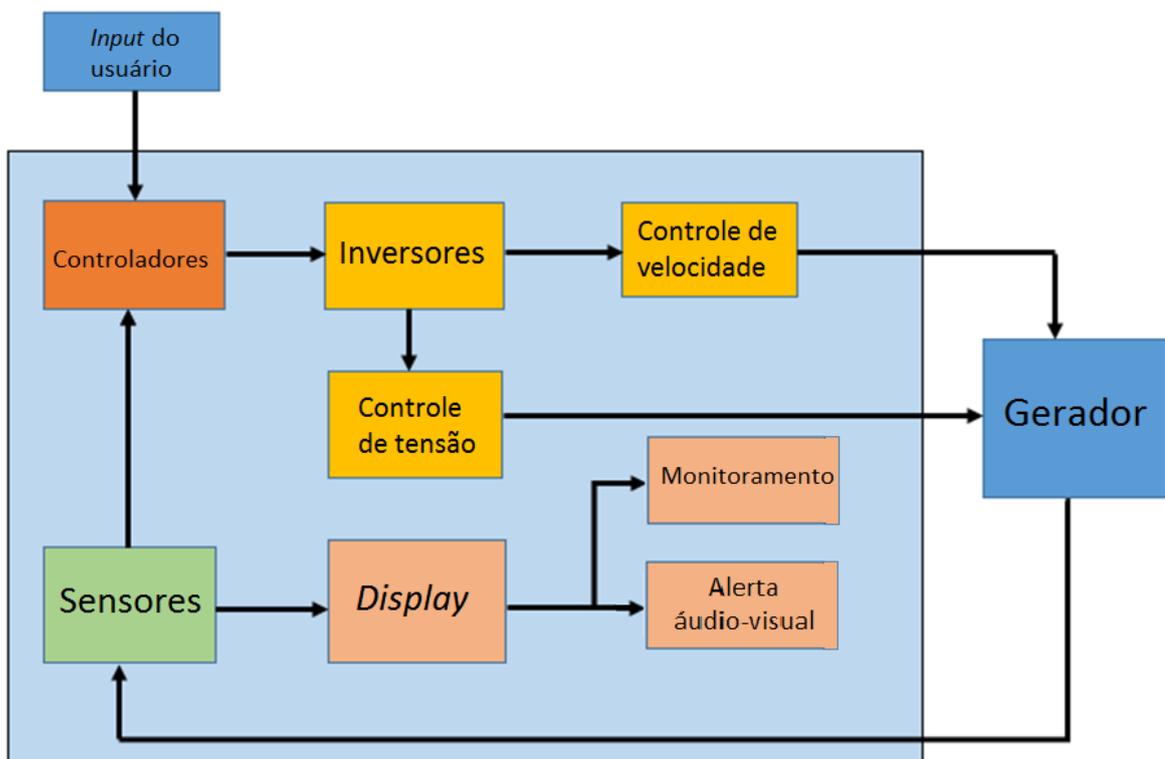
Fonte: Elaborado pelo autor.

O primeiro grupo é destinado à área de controle e monitoramento, que a partir dos dados de entrada de velocidades dos ventos fornecidos pelo usuário e dos valores reais gerados medidos pelos sensores, consegue calcular e transmitir aos inversores de frequência as ações a serem tomadas pelas máquinas elétricas a fim de manter a tensão gerada sempre constante. Tais ações são o aumento ou diminuição tanto da tensão do campo magnético da armadura do gerador quanto da velocidade de rotação do motor (ou seja, turbina) para que simule a velocidade do vento incidente, fornecida pelo usuário, com fidelidade. Este grupo também é responsável pelo desligamento das máquinas e demais equipamentos em caso de sobrecarga e/ou valores de velocidades de ventos que estejam além dos limites de geração (tanto para velocidades muito baixas, nas quais a geração é inexistente, como para velocidades muito altas, que podem danificar o sistema e seus componentes).

O segundo grupo é formado pelos itens de maior dimensão e robustez que compõem o emulador: as máquinas elétricas, inversores de frequência e conversores. Tais equipamentos recebem sinais dos controladores que definem seu modo de funcionamento, com o objetivo de sempre obter uma tensão de geração constante, e são monitorados pelos sensores.

No terceiro grande grupo tem-se os sensores, responsáveis pelo monitoramento dos valores reais de tensão e corrente geradas e velocidade de rotação do motor de indução. Estes sensores fornecem um *feedback* aos controladores para que eles possam realizar a análise para confirmação da confiabilidade do sistema de acordo com os dados de entrada fornecidos pelo usuário e mostrar os valores reais pelo sistema de monitoramento. A Figura 10 demonstra o diagrama de blocos deste protótipo e todas as áreas necessárias para seu funcionamento.

Figura 10 - Diagrama de blocos do emulador de energia eólica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3. Pesquisa com possíveis consumidores

Após a definição do problema e a justificativa para desenvolvimento do emulador, uma pesquisa foi realizada com possíveis consumidores e pesquisadores que poderiam vir a utilizar um equipamento como este. Um questionário foi elaborado, perguntando a estes pesquisadores sobre características e periféricos do emulador que eles avaliavam ser necessários, desejados ou irrelevantes. Uma cópia deste questionário segue em anexo. Professores doutores, alunos de mestrado e doutorado em engenharia elétrica na universidade

norte-americana *Penn State Harrisburg*, localizada na cidade de Harrisburg, estado da Pensilvânia, Estados Unidos, foram voluntários para responder o referido questionário. De acordo com os requisitos destes profissionais listados, foram então estabelecidos os equipamentos e métodos a serem utilizados para construção do emulador e resolução do problema de geração de energia eólica. Dos itens questionados, os requisitados como "essenciais" foram: utilizar *Simulink/MATLAB* como linguagem para programação do controlador; capacidade de atuar de forma independente e manual; capacidade para atualizações futuras; utilizar porta USB para que o controlador possa ser conectado a qualquer computador; sinais de alerta visuais e/ou sonoros e proteção para usuários e equipamentos do sistema em qualquer situação de perigo ou emergência; possuir *display* para monitoramento e documentação final.

A maioria dos equipamentos utilizados neste trabalho já estava disponível no laboratório de sistemas elétricos de potência da própria universidade, como os motores, inversores, conversores, sensores de tensão e corrente, computadores com licença do *software Simulink/MATLAB* para programação do algoritmo, cabos para interconexões, dentre outros. Demais componentes, como os controladores Arduino (modelos Due e Uno), seus suportes de proteção, sensor de efeito Hall e *display* LCD foram adquiridos pelos orientadores do projeto exclusivamente para a construção do mesmo.

Após a decisão sobre os equipamentos e componentes a serem utilizados e em posse dos questionários de possíveis clientes do emulador, alguns parâmetros do projeto foram especificados, como: a frequência de operação em 60 Hz; alimentação dos motores e inversores entre 110 V e 380 V; tensão gerada em 60 V, corrente contínua; alerta visual e sonoro para fluxo de corrente superior a 6 A; desligamento do sistema caso a velocidade seja superior ou inferior aos limites máximo e mínimo de geração pré-definidos pelo usuário (simulando eventos reais nos quais a velocidade do vento é tão elevada que pode vir a danificar os equipamentos e eventos em que esta velocidade é tão baixa a ponto de não conseguir gerar eletricidade); etc.

3.4. Equipamentos, dispositivos e *software*

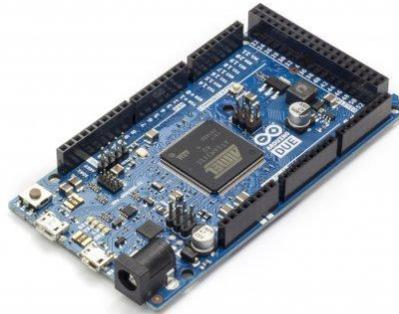
Os equipamentos e *software* utilizados para a construção, testes e análises do emulador são listados a seguir, bem como sua função dentro de cada área citada anteriormente.

- **Área de atuação:** Controle e monitoramento.

Equipamento: Arduino Due (1 unidade), representado na Figura 11.

Função: Controlador principal, responsável por executar o algoritmo criado no *software Simulink/MATLAB*; realizar os cálculos e enviar sinais de controle do gerador de energia elétrica e velocidade de rotação do simulador de turbina eólica para o conversor CA-CC; receber o *feedback* do Arduino Uno, proveniente dos sensores do sistema.

Figura 11 - Arduino Due, utilizado como controlador principal.



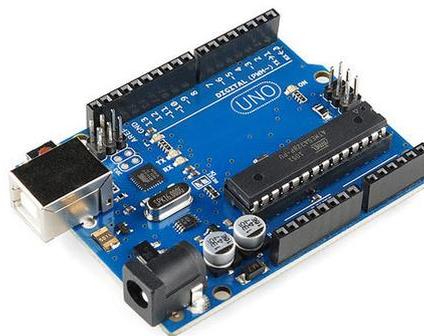
Fonte: <https://store.arduino.cc/product/A000062>

- **Área de atuação:** Controle e monitoramento.

Equipamento: Arduino Uno (1 unidade), representado na Figura 12.

Função: Controlador secundário, responsável por executar o algoritmo criado no próprio *software* Arduino (linguagem C/C++); receber os sinais medidos pelos sensores (sensor de efeito Hall, sensores de corrente e tensão) e enviá-los ao controlador principal; enviar ao visor LCD os valores medidos para fins de monitoramento.

Figura 12 - Arduino Uno, utilizado como controlador secundário.



Fonte: <http://www.filipeflop.com/pd-6b58d-placa-uno-r3-cabo-usb-para-arduino.html>

- **Área de atuação:** Controle e monitoramento.

Equipamento: Visor LCD 16x2 (1 unidade), representado na Figura 13.

Função: Receber do controlador secundário as informações sobre os valores medidos e apresentá-los ao usuário para fins de monitoramento.

Figura 13 - Visor LCD 16x2 usado para monitoramento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

- **Área de atuação:** Máquinas e inversores.

Equipamento: Motor de indução trifásico (1 unidade), identificado na Figura 14.

Função: Simular a rotação de uma turbina eólica real, acoplado ao gerador de energia elétrica.

- **Área de atuação:** Máquinas e inversores.

Equipamento: Gerador de corrente contínua (1 unidade) , identificado na Figura 14.

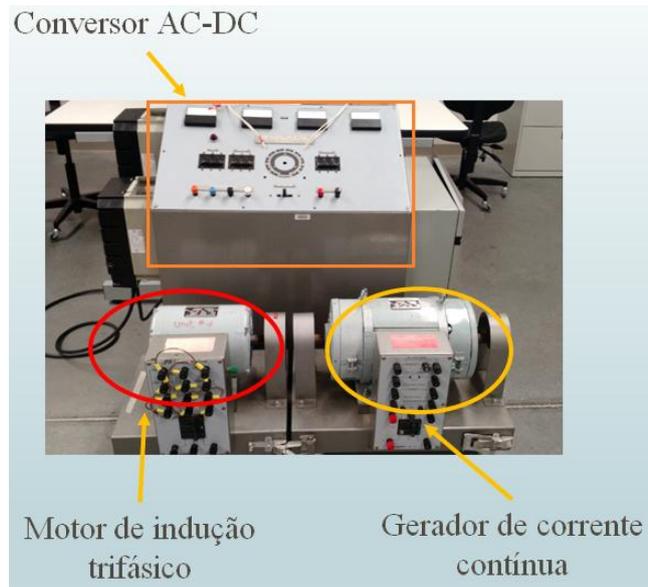
Função: Acoplado ao motor de indução trifásico, tem por objetivo gerar energia elétrica a partir dos valores de ventos incidentes sobre a turbina simulada.

- **Área de atuação:** Máquinas e inversores

Equipamento: Conversor CA-CC, identificado na Figura 14.

Função: Realizar a ligação e estabelecer a comunicação entre os controladores e sensores com os inversores de frequência, a fim de controlar e monitorar a geração de energia.

Figura 14 - Máquinas e conversor utilizados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

- **Área de atuação:** Máquinas e inversores

Equipamento: Inversores de frequência (2 unidades), identificado na Figura 15.

Função: Dar partida no motor de indução trifásico e no gerador de corrente contínua; regular a velocidade de rotação do motor de indução de acordo com os valores de velocidade dos ventos incidentes (dados pelo controlador principal); regular o campo magnético do gerador CC de acordo com a velocidade de rotação do motor de indução.

Figura 15 - Inversores utilizados para acionamento dos motores.



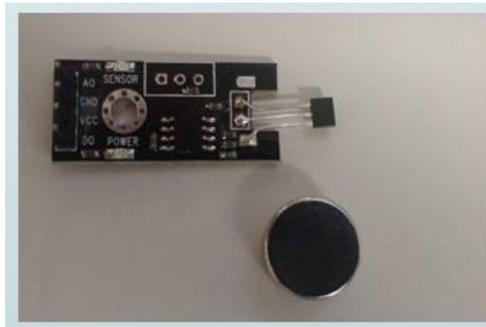
Fonte: Elaborado pelo autor.

- **Área de atuação:** Sensores e medidores.

Equipamento: Sensor de efeito Hall (modelo A3441) e ímã (1 unidade), apresentados nas Figuras 16 e 17.

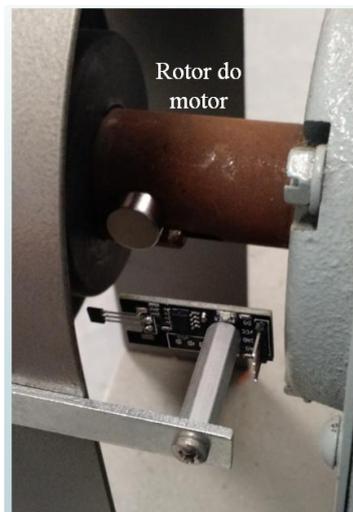
Função: Sensor utilizado para medição da velocidade de rotação do motor de indução trifásico (que simula a turbina eólica). Este sensor responde com uma tensão de saída quando percebe um campo magnético próximo. Acopla-se, então, um ímã ao rotor do motor e o sensor de efeito Hall responde a cada vez que percebe este ímã, tornando possível, assim, que o controlador secundário possa calcular a velocidade de rotação do motor de indução trifásico.

Figura 16 - Sensor de efeito Hall e ímã utilizados.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 17 - Sensor de efeito Hall e ímã acoplados ao rotor do motor de indução.



Fonte: Elaborada pelo autor.

- **Área de atuação:** Sensores e medidores.

Equipamento: Sensores de corrente e tensão, ilustrados na Figura 18.

Função: Sensores utilizados para medir, respectivamente, valores de correntes e tensões em diversas partes do emulador, como por exemplo: os valores gerados pelo gerador CC, os de alimentação do campo magnético do gerador CC, os de alimentação do motor de indução para diferentes velocidades de incidência de ventos, dentre outros.

Figura 18 - Sensor de correntes utilizado.



Fonte: <http://proesi.com.br/transformador-de-corrente-mes-30-tc-50-5a-trafo.html>

- **Área de atuação:** Controle e monitoramento.

Software: Simulink/MATLAB.

Função: Plataforma/linguagem de programação em que foram criados o código de diagramas de blocos utilizados pelo controlador principal para calcular e controlar a geração do gerador CC e a simulação da turbina eólica pelo motor de indução. O *software Simulink* possui poderosas ferramentas de teoria de controle, diagramas de blocos, análise de sinais, dentre outros. A compatibilidade deste programa com o controlador Arduino Due foi um fator primordial para sua escolha no desenvolvimento deste trabalho.

- **Área de atuação:** Controle e monitoramento.

Software: Arduino (C/C++).

Função: Plataforma/linguagem de programação baseada na linguagem de programação C++, possui bibliotecas próprias para configuração e utilização de leitura de dados (dos sensores) e demonstração em *displays* LCD, fator importante para a sua utilização no controlador secundário, Arduino Uno.

3.5. O papel do emulador de energia eólica

O emulador aqui apresentado traz uma nova proposta para tratar o problema da inconstância da geração de energia eólica, ao utilizar elementos de teoria de controle juntamente com máquinas elétricas, com o intuito de produzir energia elétrica de maneira constante mesmo com a presença da aleatoriedade dos ventos. Para tanto, o emulador recebe valores reais de incidências de ventos sob uma determinada região como um dado de entrada fornecido pelo usuário e os reproduz por meio de um motor de indução trifásico, representando o rotor de uma turbina.

Os Arduinos usados como controladores do sistema certificam-se que este motor respeite as variações do vento requeridas inicialmente pelo usuário, segundo os valores lidos pelos sensores. Para que a tensão gerada seja sempre a mesma, os controladores regulam (aumentando ou diminuindo) a corrente de armadura do gerador de corrente contínua com excitação independente: quando a velocidade de rotação da turbina eólica emulada é muito baixa, o Arduino eleva a corrente de excitação da armadura para que seu campo magnético seja maior e consiga, conseqüentemente, gerar uma tensão constante de 60 V, mesmo para um valor de velocidade de vento não tão elevado. A situação inversa também ocorre: quando a velocidade de rotação é alta o bastante, o controlador compreende que a corrente de excitação da armadura do gerador não precisa ser tão elevada e reduz seu valor, já que para esta velocidade de rotação a máquina elétrica não precisará de um campo magnético muito grande para que a tensão de saída de 60 V permaneça constante. O valor de 60 V para a tensão gerada foi definido pelos orientadores do projeto, em conjunto com seus autores, respeitando as especificações e características do gerador elétrico e do laboratório onde o protótipo foi construído e testado.

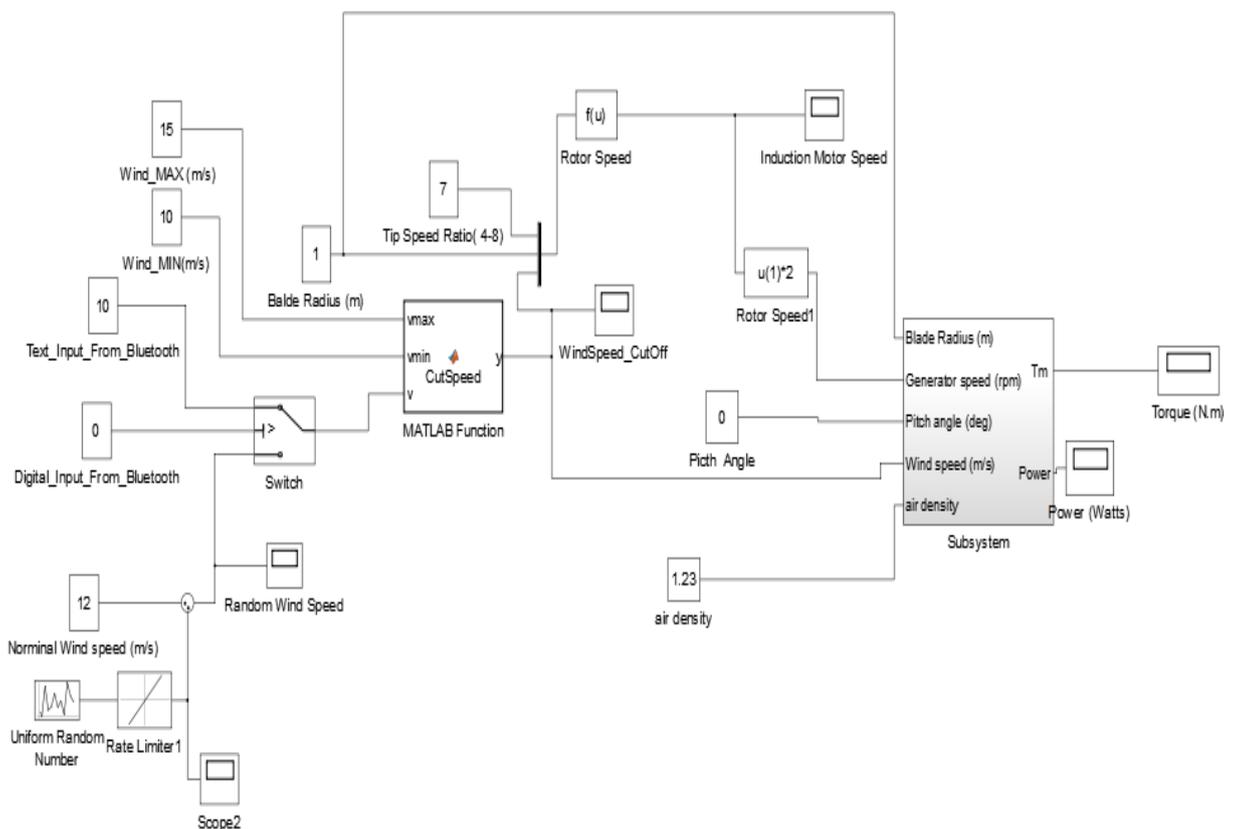
Por meio de outros sensores (de tensão e corrente), o controlador garante que a tensão gerada é sempre constante e também é responsável pelo monitoramento do sistema, verificando a todo momento se existe alguma irregularidade ou emergência e, em caso afirmativo, exerça os procedimentos de segurança necessários, como o desligamento das máquinas elétricas e demais equipamentos do circuito para proteção do sistema e de seus usuários. Desta forma é realizado o controle da energia gerada pelo emulador de energia eólica, bem como o seu monitoramento e proteção.

3.6. Desenvolvimento e aplicação do algoritmo do controlador

Uma das inovações deste projeto é a utilização do *software Simulink/MATLAB* para a criação do algoritmo de controle principal. Nenhum outro emulador avaliado emprega esta linguagem de programação, que é, por muitos, tida como uma linguagem com propósitos didáticos apenas. Isto se dá pelo alto custo deste *software* quando comparado a outros, como *Python* ou *C++*. Mesmo com estas implicações, o *Simulink/MATLAB* é também considerado uma linguagem poderosa, ideal para aplicações que necessitam de cálculos matemáticos rápidos, com alta taxa de confiabilidade e excelente para aplicações em sistemas de controle. Outro fator que levou à escolha desta linguagem é o fato de o controlador principal, Arduino Due, possuir uma biblioteca de pacotes de suporte para o *Simulink/MATLAB* e como a universidade já possuía a licença deste *software* em seus computadores, não foi necessário nenhum gasto extra para obtenção do mesmo.

A Figura 19 apresenta uma visão geral do diagrama de blocos construído no *software Simulink*, contendo as principais características do controlador do emulador.

Figura 19 - Diagrama do controlador, criado em *Simulink*.



Fonte: Elaborado pelo autor.

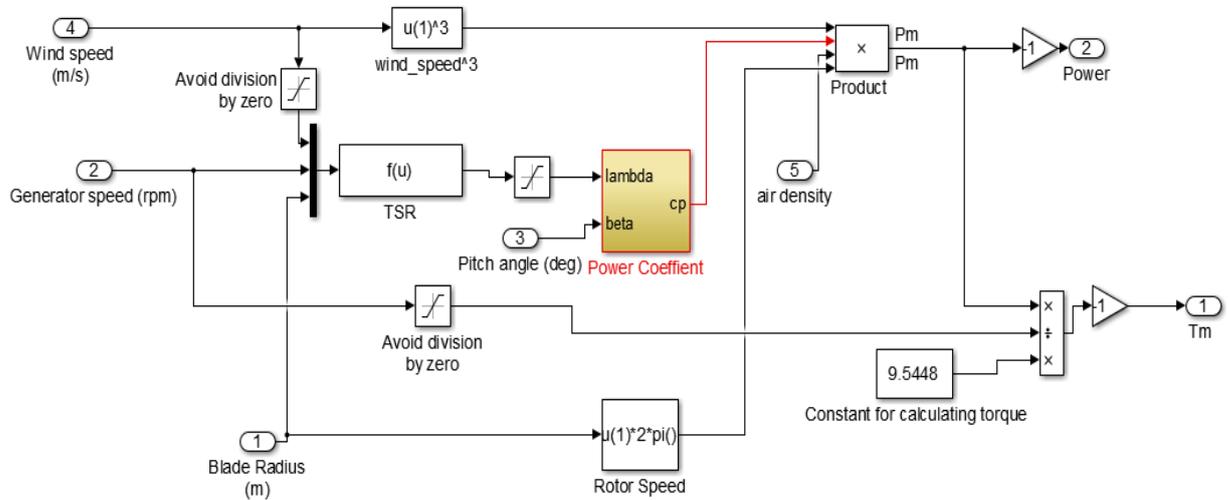
Este modelo apresentado é utilizado pelo controlador Arduino para controle da geração de energia elétrica. Ele também oferece diversas opções para testes, provendo a oportunidade de utilizar valores aleatórios (criados pelo próprio código) para a velocidade do vento.

O bloco "*digital_input_from_bluetooth*" é o responsável pela operação real do emulador, no qual o controlador recebe os valores de velocidades do vento por meio de um dispositivo conectado a um computador via *bluetooth* que envia estas informações, adquiridas diretamente em *websites* meteorológicos da região de aplicação da turbina. O bloco "*text_input_from_bluetooth*" é usado para os testes finais deste protótipo. Por meio dele, o usuário informa os valores de velocidades da incidência de ventos desejados. Existe ainda o bloco "*random_wind_speed*" que, como mencionado anteriormente, utiliza dados aleatórios de velocidades para testes, gerados pelo próprio algoritmo.

Os blocos "*wind_MAX*" e "*wind_MIN*" definem, respectivamente, as velocidades máxima e mínima toleráveis de incidência dos ventos. Ambos os valores são escolhidos pelo usuário a fim de definir a extensão de valores de operação do emulador. Dessa forma, o controlador irá interpretar valores de velocidade menores que o valor mínimo como aqueles nos quais a força extraída do vento é insuficiente para qualquer geração de eletricidade e valores acima do valor máximo como aqueles que possuem tanta força energética que serão prejudiciais para a segurança e proteção do sistema.

Todos estes blocos previamente explicados são conectados a um outro grande bloco, chamado na Figura 19 de "*MATLAB Function: CutSpeed*". Este bloco possui o algoritmo, escrito no *software* MATLAB, que define a velocidade do vento em cada instante de tempo, bem como a banda de largura desta velocidade. A sua saída vai direto a outro grande bloco, chamado de acordo com o diagrama de "*Subsystem*" e apresentado na Figura 20, no qual são feitos os cálculos para controle do motor de indução trifásico que simula a turbina eólica e o gerador de corrente contínua. Este bloco também recebe outros parâmetros, como o raio das pás e ângulo de inclinação da turbina (definidos pelo usuário), a densidade do ar e a velocidade do rotor do motor de indução, calculada de acordo com a velocidade do vento inserida.

Figura 20 - Detalhes do bloco "Subsystem".



Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando esta visão interior do bloco "Subsystem", percebe-se que ele recolhe os parâmetros do sistema, como velocidades do vento e do rotor da turbina simulada, densidade do ar, raio e ângulo das pás e calcula os valores de saída, que são enviados diretamente ao conversor CA-CC e, então, para os inversores, que traduzem estes valores calculados para valores reais. O bloco "Tm" controla a corrente que alimenta o motor que simula a turbina eólica, variando a velocidade de rotação de seu rotor, e o bloco "power" é o responsável pelo controle da corrente de armadura do gerador, que varia de acordo com a velocidade de rotação do rotor.

O controlador secundário do sistema, o Arduino Uno, executa um algoritmo criado na linguagem própria de sua plataforma, e é utilizado para leitura dos valores recebidos pelos sensores e transmissão dos mesmos para o controlador principal e para o *display* de monitoramento. As versões completas deste código e do algoritmo em *Simulink/MATLAB* usada no controlador principal podem ser verificadas no relatório final em anexo a este trabalho. Toda a programação deste emulador é feita de forma que o mesmo possa funcionar de maneira independente, ou seja, realizar sua função por si só, sem a necessidade de estar conectado a um computador ou outro dispositivo. Os códigos de programação são armazenados na memória interna dos controladores e estes também possuem sua própria fonte de alimentação, podendo ser usado, assim, para aplicações remotas.

3.7. Definição do sensor de velocidade de rotação

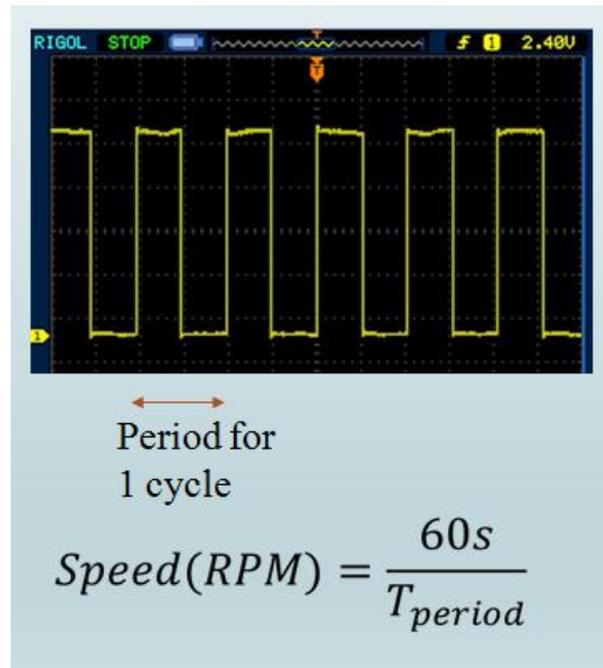
Após a definição dos equipamentos e programação do algoritmo de controle do sistema, ainda faltava a definição de uma questão muito importante: como seria feita a medição da velocidade de rotação do motor de indução, simulando a turbina eólica. Este valor de medição é importante pois o controlador utiliza-o para poder recalcular a corrente necessária para que o motor simule esta mesma velocidade de forma semelhante àquela predefinida pelo usuário, bem como a tensão de excitação do campo magnético do gerador de corrente contínua a fim de manter a tensão de geração constante.

Uma das possibilidades consideradas foi a de calcular a velocidade de rotação por meio da medição da tensão nos terminais do motor com um sensor de tensão, que é proporcional à rotação do rotor. Tal método não aparentava ser tão confiável para esta aplicação pois iria requerer que o controlador fizesse mais cálculos que a quantidade preestabelecida. Como nesta etapa ainda não se conhecia a dimensão total do projeto e quais outros parâmetros seriam necessários que o Arduino calculasse, optou-se por pesquisar e definir um sensor totalmente dedicado à aferição de velocidades rotacionais.

O tacômetro (dispositivo que mede rotações por minuto de motores) foi considerado como uma opção para esta aplicação. Porém, no laboratório onde foi desenvolvido o emulador, os únicos tacômetros disponíveis eram mecânicos e analógicos. Devido à dificuldade de encontrar-se um novo tacômetro com capacidade de leitura digital, descartou-se também este dispositivo e iniciou-se a pesquisa de um outro método: a medição com um sensor de efeito Hall.

Este sensor de efeito Hall é um dispositivo pequeno, medindo cerca de 5 cm, que retorna um sinal digital eletrônico sempre que detecta um campo magnético. Quando o Arduino Uno, o controlador secundário do emulador, recebe um sinal de nível "ALTO" significa que o sensor de efeito Hall percebeu o campo magnético do ímã acoplado ao rotor. A diferença entre os tempos de subida deste sinal detectado é usada pelo controlador para calcular a frequência em que esse fenômeno ocorre por segundo e, ao multiplicá-la por 60 segundos, encontra-se a velocidade rotacional do rotor do motor por minuto (ou rotações por minuto, RPM). O algoritmo com o equacionamento utilizado para encontrar esta velocidade encontra-se no relatório final em anexo a este trabalho. A Figura 21 demonstra este tempo de subida quando o sensor identifica um campo magnético, medido por meio de um osciloscópio.

Figura 21 - Medição dos tempos de subida do sensor de efeito Hall por meio de osciloscópio.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O sensor de efeito Hall se mostrou eficiente nos testes de medição realizados e foi, portanto, escolhido como o sensor de velocidade do projeto. Seus valores de leitura, após serem processados pelo controlador secundário, eram enviados para o LCD de monitoramento e para o controlador primário a fim de calcular os demais parâmetros para controle da tensão gerada.

3.8. Integração dos sistemas

Finalmente, com todos os equipamentos, sensores e controladores definidos, além da criação dos algoritmos necessários, os subsistemas do emulador de energia eólica podem ser integrados e conectados para a realização e avaliação dos testes de funcionamento.

Após os cálculos da velocidade de rotação do motor que simula a turbina eólica e da corrente de excitação do gerador por meio da comparação entre dos dados de entrada fornecidos pelo usuário e dos valores reais gerados medidos pelos sensores, os Arduinos enviam sinais de 0 V a 5 V para o inversor de frequência que controla o motor de indução. Os sinais são traduzidos pelo inversor, com valores de saída de até 230 V (tensão trifásica) e 70 Hz. O inversor referente ao gerador também recebe um sinal digital de 0 V a 5 V e entrega

uma corrente contínua de saída que pode chegar até 2,3 A. Esta corrente controla e varia o fluxo magnético na armadura do gerador CC, sendo primordial para a geração do valor constante de 60 V do sistema. Esta relação e interconexão entre todas as partes do emulador de energia eólica garantem que este protótipo simule com fidelidade uma aproximação dos valores de incidência de ventos, variando da mesma forma que uma aplicação real deste tipo de turbina, ao mesmo tempo que a tensão gerada é sempre a mesma, respeitando os limites de geração, sendo constante para qualquer velocidade de ventos incidente sobre suas pás. Assim é feito o controle da geração deste tipo de energia, podendo ser aplicado em campos eólicos ou em turbinas reais isoladas para a extração máxima de eletricidade desta fonte renovável.

O sistema de proteção também é integrado neste momento ao restante do emulador. Este sistema conta com disjuntores de 12 A, conectados à fonte principal de alimentação do projeto e aos inversores de frequência e máquinas elétricas. Desta forma, estes dispositivos isolam completamente o circuito da rede em casos de sobrecorrente ou curto-circuito. Existe também um botão liga-desliga que permite que o próprio usuário desative o sistema a qualquer momento.

O controlador também exerce uma função muito importante para a segurança e proteção do emulador em questão, diretamente relacionado aos parâmetros gerados. Ele é capaz de reduzir a velocidade do motor de indução trifásico para zero RPM (ou seja, desligá-lo) caso a velocidade simulada do vento seja maior do que o limite máximo suportado com o intuito de proteger o equipamento de danos externos. Caso o simulador da turbina esteja parado, portanto, o controlador também zera a corrente contínua de excitação do gerador CC e nenhum valor de tensão é gerado. O sistema também possui a habilidade de retomar seu funcionamento assim que a velocidade do vento retorna à margem que engloba os valores de operação. Um procedimento semelhante ocorre caso a velocidade seja menor que o limite mínimo, no qual o sistema se desliga automaticamente porque o gerador não é capaz de fornecer energia suficiente para a carga graças à baixa velocidade do vento.

3.9. Testes realizados

Finalmente, após o desenvolvimento do algoritmo, definição e integração de todos os equipamentos e componentes (motores, inversores, sensores, etc.), uma bateria de testes foi realizada para avaliar e validar o emulador construído. Alguns destes testes, como os de

controle do motor de indução, simulação do gerador CC, controle do inversor *versus* tensão gerada, dentre outros, foram tabelados e são demonstrados em anexo ao presente trabalho.

Primeiramente, foram realizados testes conectados ao computador para os quais o controlador principal, Arduino Due, conseguiu executar o código do *Simulink/MATLAB* de maneira independente (*stand-alone mode*) e pode trocar informações com o usuário em tempo real por meio de conexão serial. Este controlador lê e envia dados a uma taxa de 1 milissegundo, sendo considerado um dispositivo de rápida capacidade de controle. O Arduino Uno, juntamente com o sensor de efeito Hall, apresentaram uma excelente leitura e cálculo da velocidade de rotação do motor que simula a turbina eólica, apresentando um erro de no máximo 5 RPM (cerca de 0,002% da velocidade média alcançada dos testes realizados), o que é considerado uma faixa de erro aceitável e que não influencia no funcionamento do emulador.

Houveram alguns problemas no momento de transferência dos dados entre os dois controladores porque o Arduino Uno envia sinais analógicos por meio de pulsos com módulo (PWM) e o Arduino Due identifica apenas sinais digitais recebidos. Um filtro passa-baixa, formado por um resistor de 4,7 K Ω e um capacitor de 1 μ F, foi desenvolvido para converter esta saída do PWM do controlador secundário para seu sinal digital correspondente, permitindo assim que o controlador principal consiga ler esta informação.

Além destes fatores citados, a tensão gerada pelo emulador apresenta um erro máximo de cerca de 5% do valor constante gerado (60 V) durante os testes de geração. Demais testes com velocidades de ventos fixas também foram realizados para analisar a margem de possíveis amplitudes de tensão gerada que poderiam ser utilizadas no emulador. Os resultados destes testes são apresentados e discutidos na seção seguinte.

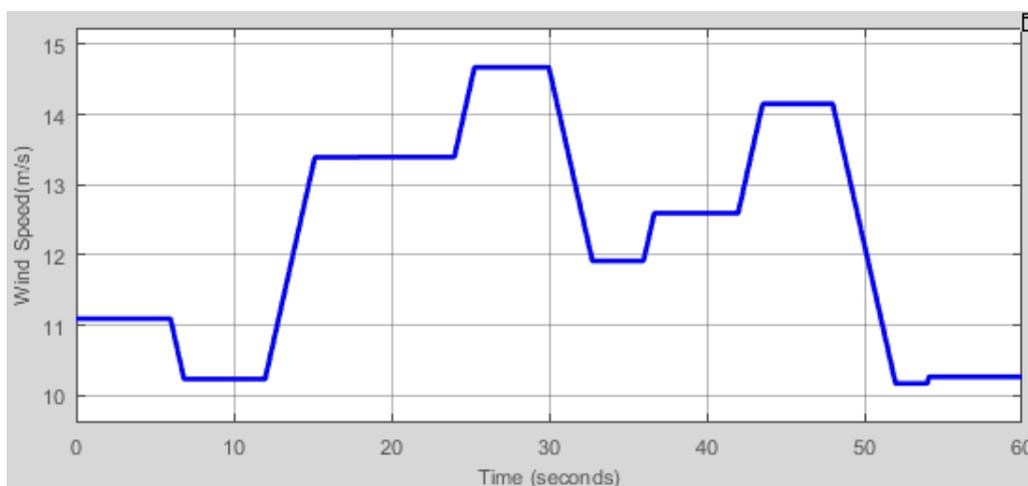
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Buscando a geração de uma tensão constante de 60 V (em corrente contínua), o emulador de energia eólica recebeu, como dados de entrada definidos pelo usuário, valores de velocidades de incidência de ventos capazes de produzir energia elétrica similares aos da região central da Pensilvânia (que engloba a cidade de Harrisburg), tendo uma abrangência de 10 m/s a 15 m/s para seu teste de funcionamento e apresentação finais. Foi utilizado um conjunto de lâmpadas para representar uma carga resistiva para o gerador e para melhor ilustrar a apresentação do projeto durante a conferência. Cerca de 5 lâmpadas de um conjunto de 12 foram acionadas com a energia produzida pelo gerador CC que apresentava uma corrente de saída de aproximadamente 1,8 ~ 2,0 A.

4.1. Resultados do emulador sem o controlador de geração

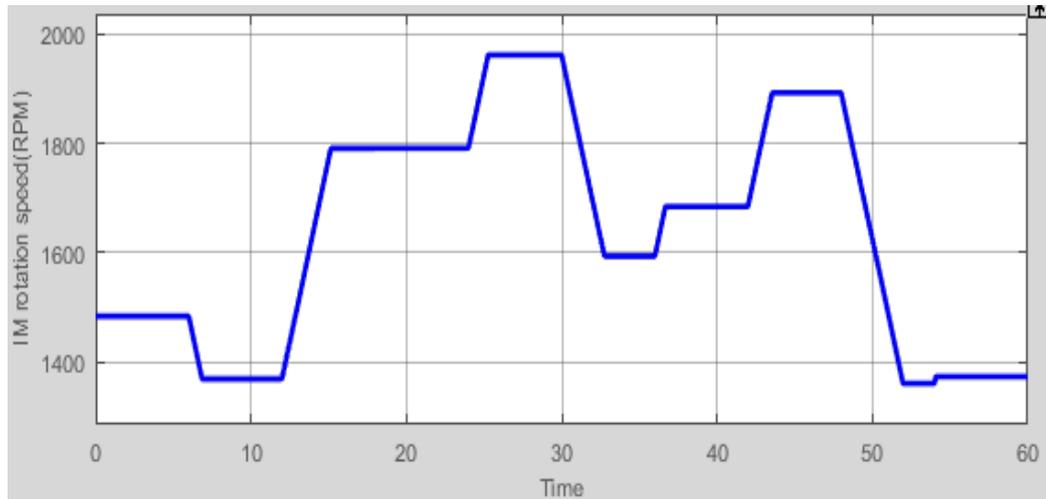
Primeiramente, o conjunto formado pelo motor de indução (simulando uma turbina eólica) e o gerador de corrente contínua foi testado sem nenhum controle do gerador, utilizando os Arduinos para controlar apenas a velocidade do motor, a fim de demonstrar como é a geração real de energia elétrica por meio de fonte eólica. A Figura 22 mostra os valores de velocidades de ventos utilizados neste teste, a Figura 23 ilustra o comportamento da turbina simulada de acordo com essa variação do vento e a Figura 24 demonstra essa geração sem o uso de controladores:

Figura 22 - Valores de velocidades de ventos aleatórios usados para teste do emulador.



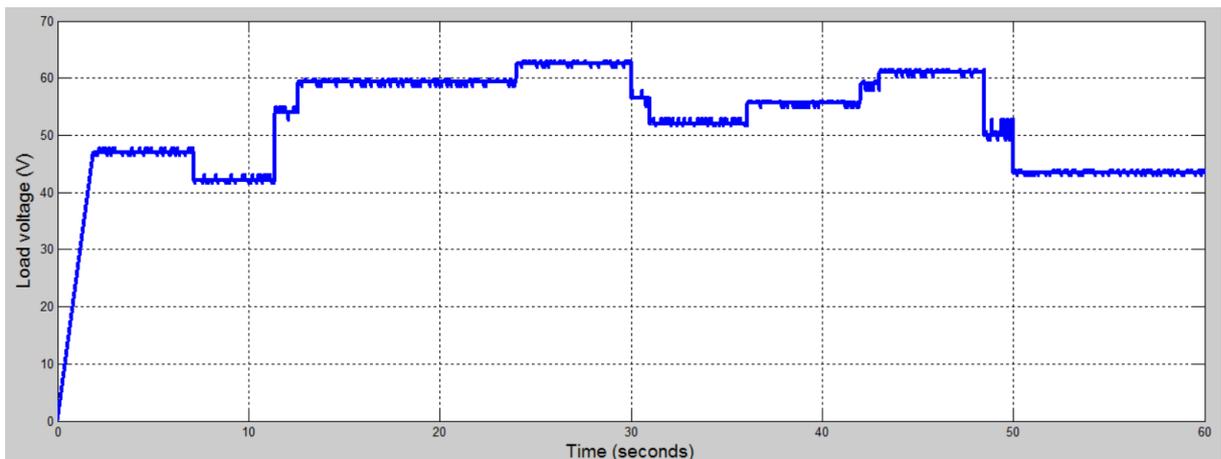
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 23 - Velocidade de rotação do motor de indução (turbina simulada) de acordo com os valores de incidência de ventos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 24 - Tensão gerada pelo emulador sem a utilização dos controladores.



Fonte: Elaborado pelo autor.

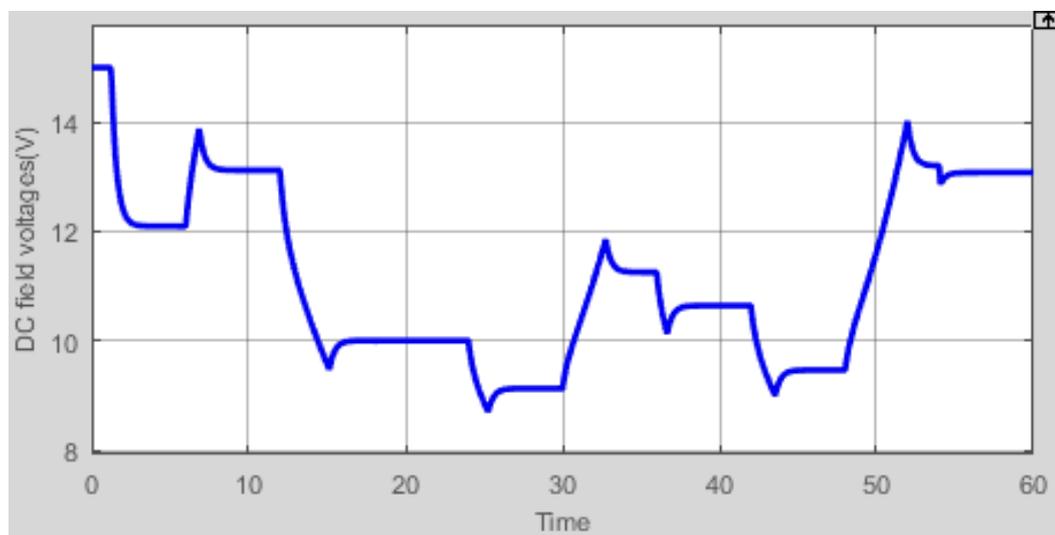
Como pode ser observado, os Arduinos do sistema conseguem controlar correta e prontamente a velocidade de rotação do motor de indução trifásico de acordo com os valores de ventos incidentes sobre a turbina. Ambos os gráficos apresentam comportamentos similares, da mesma forma que ocorre em situações reais. Para esta aplicação, a velocidade do vento varia aproximadamente de 10 m/s à 15 m/s, e a turbina simulada apresenta uma velocidade de rotação que varia entre cerca de 1300 RPM e 2000 RPM, de acordo com a incidência do vento. A tensão produzida pelo gerador de corrente contínua (sem o uso do controlador) também varia muito, pois diferentes valores de velocidades de ventos resultam

em diferentes tensões geradas. O comportamento da curva da Figura 24 é dependente da variação do vento e ilustra bem o problema da geração de eletricidade ao utilizar fontes eólicas. Tensões variadas entre cerca de 41 V e 64 V são geradas e as lâmpadas utilizadas como carga resistiva apresentam tons de brilho diferentes devido à aleatoriedade da geração.

4.2. Resultados do emulador com controle de geração

Em seguida, o mesmo teste é repetido, porém com a utilização do controlador do gerador. A ideia é utilizar o controle da corrente de excitação da armadura do gerador CC de acordo com as diferentes incidências de vento para que a tensão gerada seja sempre constante, mesmo com o comportamento variável e aleatório do vento. A Figura 25 apresenta a variação da tensão de alimentação do circuito de excitação independente do gerador de corrente contínua de acordo com a mesma variação da velocidade de rotação da turbina simulada, apresentada na Figura 23.

Figura 25 - Variação da tensão do circuito de excitação independente do gerador CC.



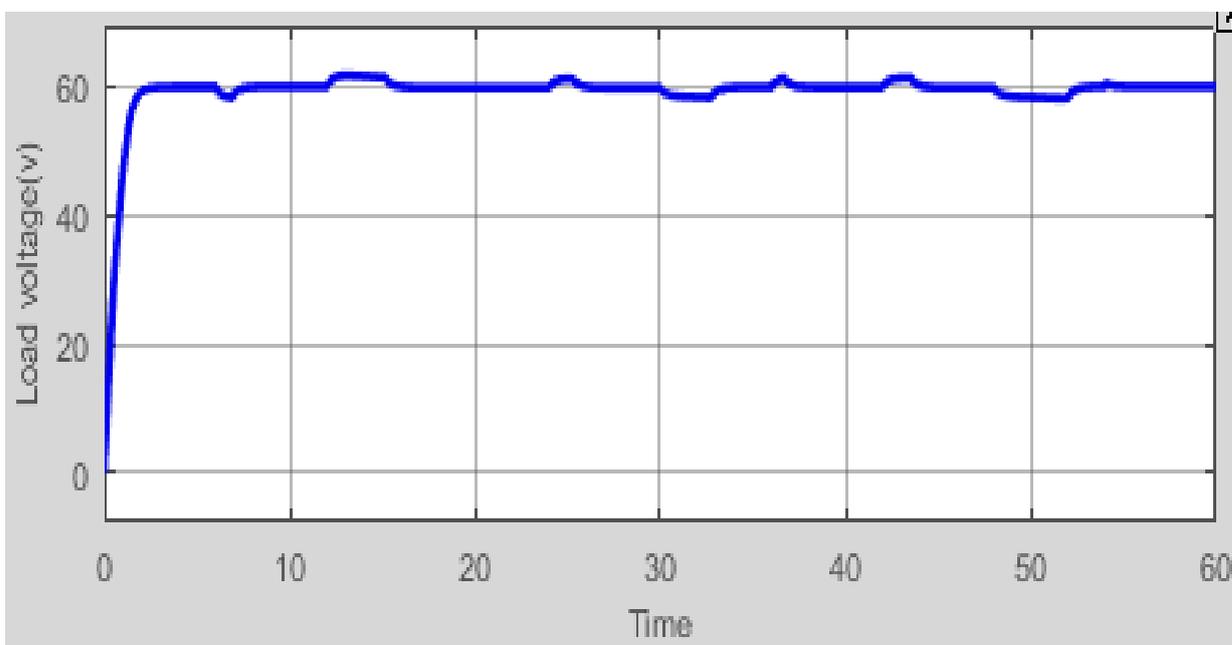
Fonte: Elaborado pelo autor.

Percebe-se que a tensão de excitação do circuito de armadura do gerador varia de forma quase que contrária à variação da velocidade rotacional da turbina. O controlador faz um balanço entre esses dois valores e entende que, caso a velocidade do vento incidente não

seja tão alta, a excitação do gerador deverá ser maior para que a tensão gerada permaneça constante. Conclui-se que mesmo para ventos que não possuam um valor energético elevado, a geração de energia é compensada devido ao aumento do campo magnético do gerador. O efeito inverso também ocorre: quando a velocidade do vento é elevada demais, o controlador compreende que a tensão de alimentação do circuito de excitação pode ser menor pois o próprio vento incidente já possui energia suficiente para manter a geração constante.

A Figura 26 mostra a tensão gerada constante (erros de cerca de até 5% são aceitáveis) em 60 V para o mesmo valor de incidência variável apresentado na Figura 22.

Figura 26 - Tensão gerada pelo emulador utilizando o controlador para geração constante.



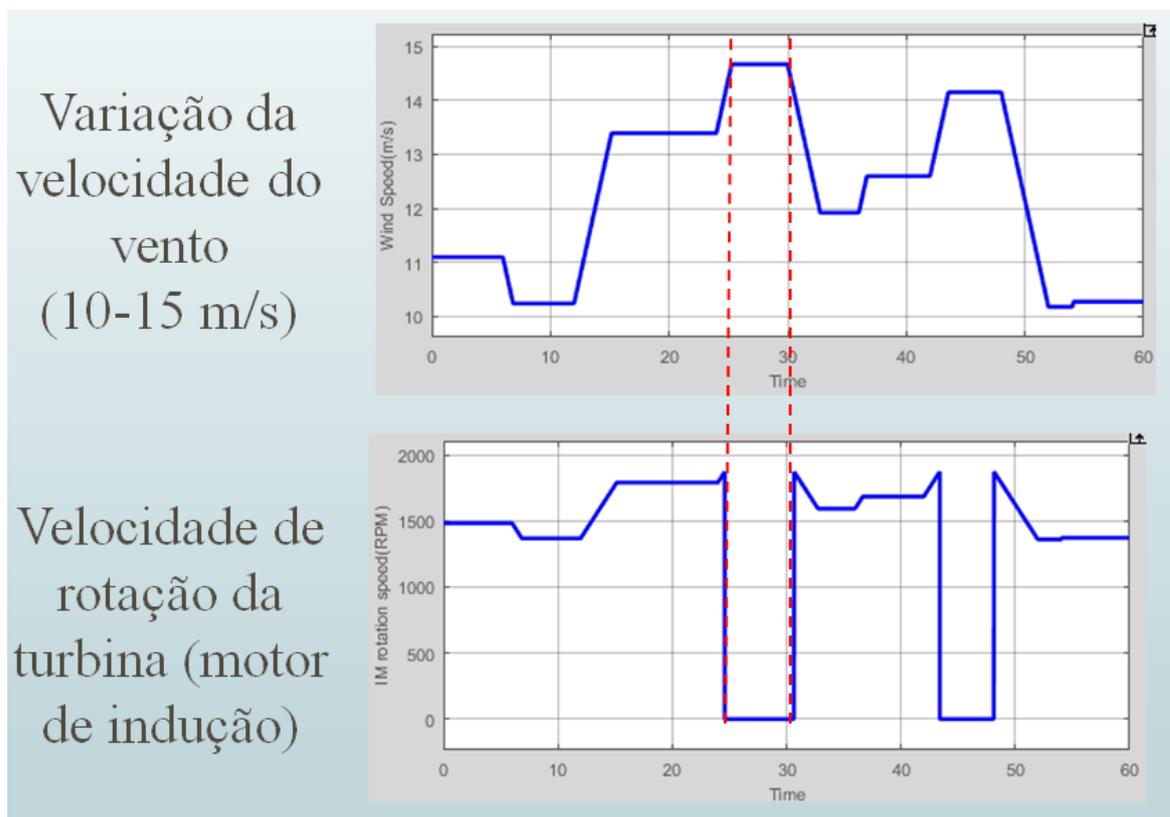
Fonte: Elaborado pelo autor.

Neste caso, as lâmpadas utilizadas como carga mantêm um brilho constante, mesmo com a perceptível mudança de velocidade do vento e consequentemente da turbina eólica simulada. Demonstra-se que a tensão constante gerada atende bem a sua carga e que o controlador consegue absorver o máximo de energia possível dos ventos incidentes.

4.3. Resultados do emulador com a inserção de limites de velocidade

Repete-se o mesmo teste anterior, com o controle de tensão constante feito pelos Arduinos, utilizando, porém, limites de velocidades para a geração de energia. Este teste avalia se o emulador respeita os valores mínimo e máximo de velocidades de ventos aceitáveis para seu funcionamento e se os controladores realmente desativam o sistema quando o vento incidente atinge valores excedentes à margem de operação predefinida e o reativam quando os valores de vento retornam à mesma margem. Para esse teste, o valor máximo de velocidade de incidência foi definido como 14 m/s. A Figura 27 apresenta os valores de vento incidentes definidos pelo usuário e a respectiva velocidade de rotação do motor de indução, respeitando o limite de 14 m/s.

Figura 27 - Velocidade de rotação da turbina simulada de acordo com a incidência do vento e do limite máximo de velocidade permitido.

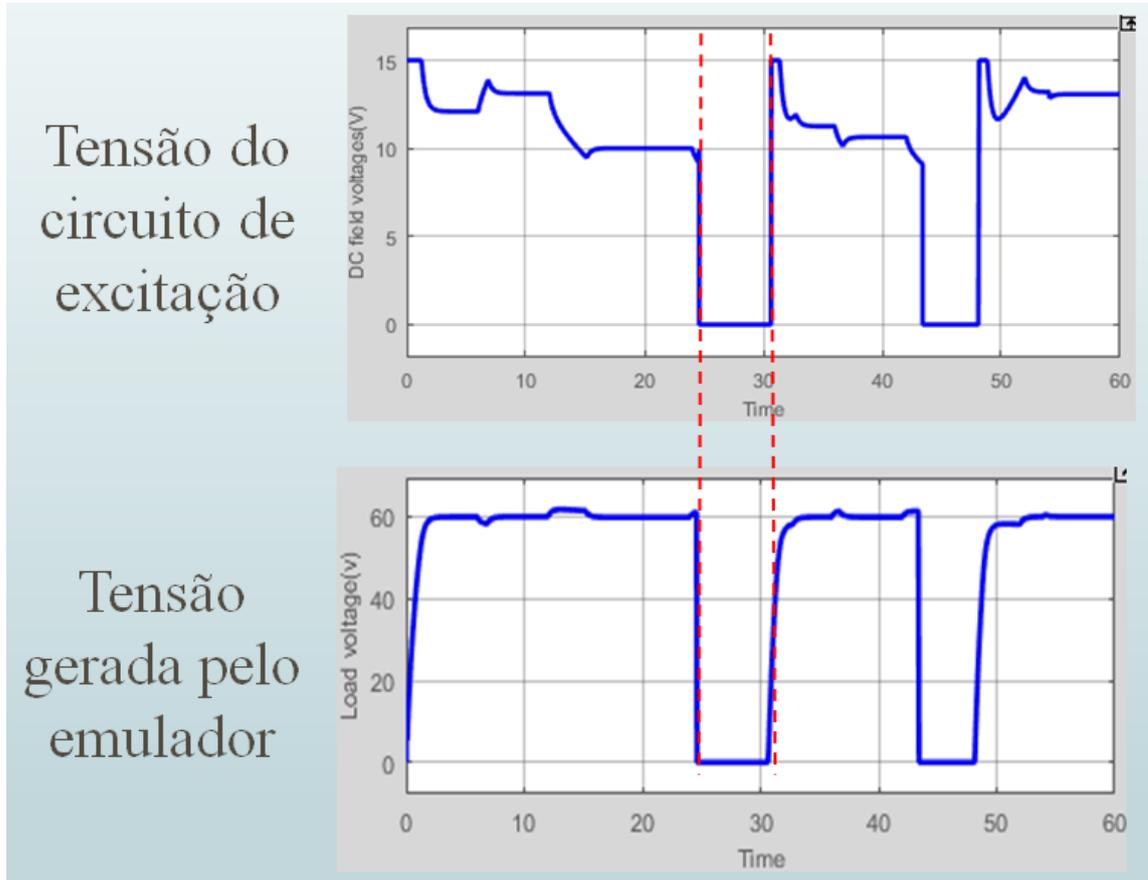


Fonte: Elaborado pelo autor.

Analogamente, a Figura 28 apresenta a variação da tensão do circuito de excitação referente à velocidade de rotação da turbina e respeitando o limite máximo de velocidade

predefinido. A mesma figura também demonstra a tensão gerada pelo gerador sob as mesmas condições descritas.

Figura 28 - Tensão do circuito de excitação do gerador CC e tensão gerada pelo emulador (com limitação da velocidade máxima).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota-se que, assim como ocorre na rotação do motor de indução trifásico, a tensão do circuito de excitação da armadura do gerador CC também é zerada quando a velocidade do vento é superior ao limite máximo definido, 14 m/s. A tensão gerada também é interrompida durante este momento já que a turbina estará parada a fim de proteger o emulador e o circuito de excitação do campo magnético estará desenergizado. Após o retorno da incidência do vento para valores inferiores ao limite máximo, o próprio sistema religa o motor de indução e a tensão de excitação do gerador, retornando também à geração constante em 60 V do gerador de corrente contínua.

O outro objetivo principal do emulador também foi satisfatório. Como as turbinas eólicas reais são muito grandes e requerem um investimento inicial elevado, este emulador

tem como missão, além do controle da energia gerada, possuir dimensões pequenas (comparadas às turbinas reais) para que diversos testes possam ser realizados em laboratório com o intuito de avaliar a viabilidade de implantação de turbinas eólicas antes que se faça um investimento inicial caro. Assim, usuários podem definir e analisar a sua implantação em uma determinada região, julgando-a satisfatória ou não, sem precisar gastar milhares de dólares em uma ideia ainda incerta. A Figura 29 apresenta o emulador no laboratório de sistemas elétricos de potência da *Penn State Harrisburg*, no dia da apresentação na conferência previamente citada. O equipamento possui dimensões aproximadas de 2,0 x 1,5 x 1,0 metros. Ao lado do mesmo, encontra-se o autor deste trabalho, Matheus Henrique.

Figura 29 - O emulador de energia eólica completo e seu autor, Matheus Henrique.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Ao término deste trabalho, após análise dos testes realizados e avaliação da apresentação final, concluiu-se, juntamente com os orientadores do projeto e demais profissionais avaliadores presentes na "*Capstone Design Conference*", que o emulador de energia eólica aqui apresentado é viável e atende as especificações para as quais foi desenvolvido, apresentando uma nova abordagem de métodos de controle deste tipo de geração.

Além disto, o referido emulador cumpre seus objetivos, sendo capaz de gerar uma tensão constante por meio de seu sistema de controle de malha fechada apesar da variação aleatória dos valores de incidência dos ventos, simulados pelo motor de indução trifásico. E, também, o objetivo de ser desenvolvido com dimensionamento menor que uma turbina eólica real, possibilitando sua aplicação em espaços reduzidos, como laboratórios ou até mesmo demonstrações em salas de aula, o que representa, adicionalmente, a capacidade de se realizar uma completa simulação de geração eólica de uma determinada região mesmo estando longe da mesma, não necessitando de uma aplicação em campo, inclusive quando as condições meteorológicas não são favoráveis.

Os resultados dos testes realizados com o protótipo construído foram satisfatórios e afirmados como suficientes para garantir o funcionamento deste emulador em aplicações reais, de maneira independente (ou seja, sem estar conectado a um computador ou outro dispositivo). A fácil instalação do controlador e sua possibilidade de atualização por uma simples conexão via cabo USB com qualquer computador agradou aos orientadores e possíveis usuários deste equipamento, bem como a capacidade de simulação remota de diferentes regiões. Outro fator que merece menção é a medição dos valores de saída por meio do sistema de malha fechada (*closed-loop*), no qual os sensores fornecem o *feedback* ao controlador e possibilitam o monitoramento do sistema pelo usuário, além de sua capacidade de compreender os limites de velocidades de ventos que podem ser danosas ou perigosas para os equipamentos e usuários ou velocidades muito baixas que não apresentam nenhum poder de geração, sendo o próprio controlador capaz de desativar o sistema automaticamente de acordo com estas condições.

Após o término deste trabalho, o emulador de energia eólica apresentado ainda deixa possibilidades para melhoramentos e testes futuros. Dentre eles, destacam-se a implementação

de um método para obtenção da velocidade do vento em cada região desejada via conexão *wireless* (conexão sem fio), por qual um computador com acesso à internet recolhe os dados de incidências de uma região em tempo real (em *websites* de mapeamento de velocidades de ventos, como por exemplo o www.earth.nullschool.net) e os transmite para o controlador por meio desta conexão sem fio. O emulador simula então esta incidência de vento coletada em tempo real. Também é considerado um trabalho futuro o teste deste emulador em turbinas reais de diferentes tamanhos e modelos, em situações reais de geração eólica, com o intuito de verificar seu comportamento diante diversos eventos naturais diretamente aplicados sobre ele e, conseqüentemente, realizar as adaptações necessárias. Destaca-se nesta proposta a necessidade de modificar o sistema de controle do gerador, pois em turbinas eólicas reais, geralmente, são utilizadas máquinas síncronas ou de indução (ou seja, que operam em corrente alternada) ao invés de máquinas de corrente contínua. A aplicação do emulador em campos eólicos, seja em individualmente em cada turbina ou no sistema como um todo, a fim de analisar seu funcionamento com a presença do efeito de desaceleração do vento devido à disposição das turbinas, também deve ser considerada para testes e análises futuras.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ARDUINO STORE. **Arduino Due**. Disponível em:

<<https://store.arduino.cc/product/A000062>>. Acessado em: 15.set.2016.

ARIFUJJAMAN, Md., IQBAL, M.T. e QUACIOE, J.E. **Development of an isolated small wind turbine emulator**. 2011. The open renewable energy journal. University of Newfoundland. 2011. Disponível em:

<<http://benthamopen.com/contents/pdf/TORAJ/TORAJ-4-3.pdf>>. Acessado em: 22.set.2016.

BANKS RENEWABLES. **Turbine efficiency/ Banks developments**. Disponível em:

<<http://www.banksgroup.co.uk/banks-group/banks-renewables/faqs/turbine-efficiency/>>.

Acessado em: 26.set.2016.

DICIONÁRIO PRIBERAM. **Significado/definição de emular**. Disponível em:

<<http://www.priberam.pt/dlpo/emular>>. Acessado em: 22.set.2016.

ECOTRICITY. **The end of fossil fuels**. Disponível em: <<https://www.ecotricity.co.uk/our-green-energy/energy-independence/the-end-of-fossil-fuels>>. Acessado em: 09.out.2015.

FILIFEFLOP. **Arduino Uno R3**. Disponível em: <<http://www.filipeflop.com/pd-6b58d-placa-uno-r3-cabo-usb-para-arduino.html>>. Acessado em: 15.set.2016.

HARDY, Trevor e JEWELL, Ward. **Emulation of a 1.5MW Wind Turbine with a DC Motor**. 2011. IEEE Power & Energy Society general meeting. 2011. Disponível em:

<http://soar.wichita.edu:8080/bitstream/handle/10057/5098/Jewell_2011.pdf?sequence=1>.

Acessado em: 09.out.2015.

INDÚSTRIA HOJE. **O que é um gerador eólico**. Disponível em:

<<http://www.industriahoje.com.br/o-que-e-um-gerador-eolico>>. Acessado em: 15.set.2016.

MAY, Philip. **Windpark - Wind farm**. Disponível em:

<<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/0f/Windpark-Wind-Farm.jpg>>.

Acessado em: 26.set.2016.

NO MINUTO. **20 perguntar: energia eólica.** Disponível em:
<<http://www.nominuto.com/noticias/brasil/20-perguntas-energia-eolica/43382/>>. Acessado em: 15.set.2016.

PAO, Lucy Y. e JOHNSON, Kathryn E. **A tutorial on the dynamics and control of wind turbines and wind farms.** 2009. American Control Conference - Hyatt-Regency Riverfront, St. Louis, MO, USA. Jun, 2009. Disponível em:
<http://ecee.colorado.edu/~pao/anonftp/PaoJohnson_ACC09.pdf>. Acessado em: 22.set.2016.

PROESI. **Transformador de corrente MES-30/ TC 50/ 5A.** Disponível em:
<<http://proesi.com.br/transformador-de-corrente-mes-30-tc-50-5a-trafo.html>>. Acessado em: 15.set.2016.

RIGHTER, Robert W. **Wind Energy in America - A History.** 1996. P. 44. University of Oklahoma Press: Norman and London. Disponível em:
<https://books.google.com.br/books?id=kGnGw7AEkAEC&pg=PA44&redir_esc=y&hl=pt-BR#v=onepage&q&f=false>. Acessado em: 15.set.2016.

ROSEN, Karen. **An assessment of potential for utility-scale wind power generation in Eritrea.** 1998. Dissertação (Mestrado) - San Jose State University, Ago. 1998. Disponível em: <<http://www.punchdown.org/rvb/wind/karen/thesis.html>>. Acessado em: 15.set.2016.

RÜNCOS, F. *et al.* **Geração de energia eólica - tecnologias atuais e futuras.** 2000. WEG Maquinas-GRUCAD-EEL-TET-UFSC, 2000. Disponível em:
<<http://catalogo.weg.com.br/files/wegnet/WEG-geracao-de-energia-eolica-tecnologias-atuais-e-futuras-artigo-tecnico-portugues-br.pdf>>. Acessado em: 05.set.2016

SALLES, Ana C. N. de. **Metodologia de análise de risco para avaliação financeira de projetos de geração eólica.** 2004. Tese de mestrado em planejamento energético. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Mar. 2004. Disponível em:
<<http://ppe.ufrj.br/ppe/production/tesis/acnsalles.pdf>>. Acessado em: 26.set.2016.

THE COURIER. **Renewable energy and role of Marykirk's James Blyth.** Disponível em:
<<http://web.archive.org/web/20120314025335/http://www.thecourier.co.uk/Community/Heritage-and-History/article/2332/renewable-energy-and-role-of-marykirk-s-james-blyth.html>>. Acessado em: 09.out.2015.

THE ENGINEERING TOOLBOX. **Wind power**. Disponível em:
<http://www.engineeringtoolbox.com/wind-power-d_1214.html>. Acessado em: 09.out.2015.

THE GUARDIAN. **The history of wind power**. Disponível em:
<<https://www.theguardian.com/environment/2008/oct/17/wind-power-renewable-energy>>.
Acessado em: 09.out.2015.

WESCOTT, Tim. **PID control: PID without a PhD**. 2000. FLIR Systems - EE Times-India, Out. 2000. Disponível em:
<<http://manuals.chudov.com/Servo-Tuning/PID-without-a-PhD.pdf>>. Acessado em:
22.set.2016.

WORLDPRESS. **Custo e rentabilidade - energia eólica**. Disponível em:
<<https://evolucaoenergiaeolica.wordpress.com/custo/>>. Acessado em: 13.set.2016.

WORLDPRESS. **Vantagens e desvantagens - energia eólica**. Disponível em:
<<https://evolucaoenergiaeolica.wordpress.com/vantagens-e-desvantagens/>>. Acessado em:
13.set.2016.

WWEA QUARTERLY BULLETIN. **World wind energy report 2014 - Special issue 2015**.
Disponível em: <<http://www.wwindea.org/wwea-bulletin-special-issue-2015/>>. Acessado em:
13.set.2016.

APÊNDICES

APÊNDICE A - Lista de equações.

➤ Gerador de corrente contínua (legendas ao final das equações listadas):

$$E_a = V_t + I_a * R_a = K_a * \Phi * \omega_m$$

$$V_t = E_a - I_a * R_a$$

$$V_f = R_F * I_f$$

$$K_a = \frac{Z * p}{2\pi * a}$$

$$E_a * I_a = T * \omega_m$$

E_a : tensão de armadura

V_t : tensão do terminal

R_a : resistência do circuito de armadura (obs.: a queda de tensão em $I_a * R_a$ é muito pequena)

Φ : fluxo magnético por pólo (vindo do circuito de excitação independente)

ω_m : velocidade do rotor (rotacionado pelo motor de indução trifásico)

V_f : tensão de campo (do circuito de excitação)

Z : número de condutores no enrolamento da armadura

p : número de pólos

a : número de caminhos paralelos

K_a : constante do circuito de armadura

➤ Motor de indução trifásico

$$T_{m e c h} = \frac{P_{m e c h}}{\omega_{m e c h}}$$

$$s = \frac{\eta_{s y n c} - \eta_{m e c h}}{\eta_{s y n c}}$$

$$\omega_{m e c h} = \frac{2 \pi * \eta_{m e c h}}{60}$$

$$\omega_{m e c h} = (1 - s) * \omega_{s y n c}$$

$$\eta_{s y n c} = \frac{120 * f}{p}$$

$$P_{m e c h} = 3 * \frac{(1 - s)}{s} * R_2 * I_2^2$$

$$T_{m e c h} = \frac{P_{m e c h}}{\omega_{s y n c}} = 3 * \frac{60}{2 \pi * \eta_{s y n c}} * \frac{R_2 * I_2^2}{s}$$

$T_{m e c h}$: torque mecânico

$\eta_{s y n c}$: velocidade síncrona do motor (em RPM)

$\eta_{m e c h}$: velocidade mecânica do motor (em RPM)

s : escorregamento

$\omega_{s y n c}$: velocidade síncrona (em rads/seg.)

$\omega_{m e c h}$: velocidade mecânica (em rads/seg.)

R_2 : resistência do circuito do rotor

I_2 : corrente do circuito do rotor

➤ Outras equações utilizadas pelo controlador *Simulink*:

$$P = \frac{1}{2} * \rho * A * \zeta * v^3$$

$$T = \frac{9.5488 * P}{V}$$

P : potência de geração eólica (W)

ρ ; densidade do ar (kg/m³)

A : área das pás da turbina, perpendicular à incidência do vento (m²)

ζ : eficiência da turbina eólica

v : velocidade do vento incidente (m/s)

T : torque do motor de indução (N*m)

V : velocidade do motor (RPM)

ANEXOS

ANEXO A - Modelo do questionário para possíveis clientes sobre características do sistema.

Thien Pham

Matheus Henrique Sousa

EE405

Sep 15, 2015

Wind Power Emulator - customer's survey

1. Please rate feature important to you:

Features	Essential	Desirable	Not necessary
Meter display	*		
Graphical User Interface	*		
External manual controller	*		
MATLAB controller	*		
Relay box controller	*		
AC prime mover/generator	*		
DC prime mover/generator			*
DC charging capability			
Independent Battery Bank			*
AC-DC converter			*
AC 3-phase output		*	
AC single phase output		*	
Upgrade capability	*		
User and equipment protection features	*		
Detailed documentation and operation manual, including blueprint	*		

What other features: ___ added above: _____

By: Dr. Peter Idowu

ANEXO 2 - Relatório sobre o emulador de energia eólica (realizado nos EUA.)

Wind Power Emulator

Matheus Henrique Sousa

Thien Pham

Instructor: Dr. Scott van Tonningen

Technical Advisor: Dr. Peter Idowu

Technical Report Submitted In Partial Fulfillment of the
Senior Electrical Capstone Design Course at Penn State Harrisburg

EE 406W

Spring Semester, 2016

May 2nd, 2016

ABSTRACT

This paper describes the developmental process of designing and building the Wind Power Emulator, an important equipment for developing wind energy conversion systems. The purpose of this project is to create a standalone control and diagnostic system that can be “plugged & played” to any windmill generation setup. In this emulator, users can model their wind power system with varying wind conditions; this gives more flexibility for users and researchers to study and analyze the system. For this Wind Power Emulator, Simulink is used as the main controller to develop a closed loop control, using feedback from a group of sensors, such as: voltage transformers (VTs), current transformers (CTs) and Hall Effect sensor. The system parameters are monitored through Simulink via external mode and LCD 16x2 display. The display allows users to monitor the system performance of the input desired by them. On/Off time essential for under/over load safety concerns is also considered. This paper shows the background history of wind power, engineering requirements, functional decomposition with two levels, a budget estimate, time management guidelines, and a conclusion for the project design.

Table of Contents

ABSTRACT	ii
Tables:	iv
Equations:	iv
CHAPTER 1: INTRODUCTION	1
A. Project Introduction	1
B. Technical History	1
C. Technical Research	2
D. Lifecycle of Similar Products	5
CHAPTER 2: EXPERIMENTAL METHOD	5
A. Engineering Requirements Development	5
I. Customer Requirements	5
II. Environmental and Safety Concerns	6
III. Legal, Ethical or Political Concern	7
IV. Sustainability	7
V. Constraints	7
VI. Standards	8
B. Engineering Requirements	8
C. Functional Decomposition	10
I. Design Trade-offs	10
II. Level 1 and 2 Decomposition	10
D. Subsystem Development and Results	13
E. System Integration, Test, and Results	18
CHAPTER 3: PROJECT MANAGEMENT	20
A. Project Work Breakdown Structure (WBS)	20
B. Project Schedule (Gantt Chart)	21
C. Project Budget	21
CHAPTER 4: SUMMARY AND CONCLUSION	22
References	23
Appendix – Code	24

Figures:

Figure 1 :Ecosense sustainable solutions wind power emulator.....	3
Figure 2: DC motor controller model	4
Figure 3: AC motor controller model.	4
Figure 4: Lifecycle of similar products.....	5
Figure 5: Objective tree	6
Figure 6: Level 1 functional decomposition	11
Figure 7: Level 2 functional decomposition.	11
Figure 8: Simulink Controller model.....	14
Figure 9: Subsystem block.....	15
Figure 10: Hall Effect sensor and magnet.....	16
Figure 11: LCD and sensor circuit.....	17
Figure 12: LCD display	17
Figure 13: Work breakdown chart	20
Figure 14: Project Gantt chart.....	21
Figure 15: Arduino code	25
Figure 16: Simulink model	26
Figure 17: Induction motor controller.....	277
Figure 18: DC field winding controller	277
Figure 19: Load voltage vs Field current.....	30
Figure 20: Hardware results.....	31
Figure 21: Output voltage controlled by Simulink	31
Figure 22: Random Wind Speed.....	322
Figure 23: Induction motor speed.....	322
Figure 24: DC field voltages.....	322
Figure 25: Hardware setup.....	333

Tables:

Table 1 - Categories comparison.	6
Table 2 - Engineering requirements development	9
Table 3 - Cost analysis for the wind power emulator.	22

Equations:

Equation 1 -Wind power.....	1
Equation 2 -Tip speed ratio.....	14
Equation 3 -Mechanical power from wind.	14
Equation 4-Torque.	14

CHAPTER 1: INTRODUCTION

A. Project Introduction

The Wind Power Emulator (WPE) allows users to simulate the model system with varying wind condition. The emulator uses user's input of certain parameters and a built in a stochastic algorithm developed in Simulink, and it outputs power signals compatible with the micro-grid equipment. It allows users and researchers study wind power by applying different scenarios of wind turbine speed. In addition, data collected from the emulator is used to maximize power efficiency since the wind speed varies randomly. The WPE can be applied to real hardware level simulations that can be used to charge a DC battery system.

B. Technical History

Wind power is acquired by extracting the mechanical energy from airflow and converting it into electricity. Wind power is an alternative energy source to fossil fuels and does not produce greenhouse gases during operation [1]. Thus, the effects on the environment are eliminated, and there is no waste produced.

Wind power generation started in Scotland, at the end of the 19th century, after the engineer James Blyth built the first windmill to produce electricity [2]. Also at this same period, the American inventor Charles Brush designed another wind turbine for the same purpose. His turbine operated until the early years of the 20th century, reaching the maximum power of 12kW. Brush used the energy generated by his wind turbine to charge batteries and to power the light bulbs of his laboratory [2].

Nowadays, wind power generators are used for a huge range of purposes, from battery charging at isolated residences to providing energy to national electrical networks.

Wind power is an open-air stream, thus being dependent on the wind speed to determine the power generated. For grid electricity, wind speed needs to be high enough for efficient generation. Therefore, the implementation of wind farms is unfeasible in regions where the wind speed cannot reach the necessary levels [3]. The emulator is a tool that can be used by researchers to manipulate this important parameter, wind speed, and simulate the generated power.

Wind power can be calculated by using equation (1), shown below [3]:

$$P = 1/2 \rho \xi A v^3 \quad (1)$$

Where

P = power (W)

ρ = density of air (kg/m³)

A = area perpendicular to the wind (m²)

ξ = efficiency of the windmill

v = wind velocity (m/s)

C. Technical Research

With the rate of oil consumption now, the oil reserve will only be sufficient to last 40 years [1]. Therefore, renewable energy is the key for the future. Many researchers have been interested in renewable energy for electricity production, such as wind power, solar cell, and natural gas because it is clean, renewable and economical for industry and government. In the last decade, investments in renewable energy increased, and wind generation was the fastest growing source [4]. To make the most out of wind power, researchers need to analyze the characteristic of a wind power system before they can start building the real model. The most effective way is experimenting with the model, using hardware or software simulation, in which the system can demonstrate its performance. Wind Power Emulator offers the flexibility for users to apply desired wind condition of testing, as well as to simplify complex calculation and provide real-time data for monitoring the system.

EcoSense Sustainable Solutions Pvt. Ltd produces a Wind Power Emulator that consists of a DC motor coupled with a self-excited induction generator, as shown in Figure 1 [5]. Its features consist of the following:

- 3-phase auto-transformer and a single-phase auto-transformer;
- Battery banks, inverters, filters and bidirectional converters;
- User interface and proprietary software;
- DC and AC voltmeters and ammeters.



Figure 1 :Ecosense sustainable solutions wind power emulator.

Hardy and Jewell [6], from Wichita State University, developed a project called “Emulation of a 1.5MW wind turbine with a DC motor”. Its features include:

- DC motor (acting as a wind turbine) and a dynamometer (acting as the generator)
- Software simulation implemented in LabVIEW
- Calculation of the mean-square error between the power calculated by the simulation and the real power produced by the DC motor.

In 2014, Martinez, Herrero and de Pablo [7], from the University of Valladolid, developed another emulator called “Open Loop Wind Turbine Emulator”. Its features are presented below:

- Does not use closed loop control system to acquire the power curves of the turbine;
- Utilizes a power resistor, a DC voltage source and an independent excitation DC motor;
- Open loop without a processor.

Other types of wind power emulator projects are described in the examples below:

Figure2 shows a DC motor controlled by a thyristor rectifier [7]. This thyristor is adjusted by the torque controller, using rotational and wind speeds as input parameters. The generator uses the mechanical force of the DC motor to generate power, and the torque sensor gives a feedback parameter used as reference for the torque control box. Generally, the software LabVIEW is chosen for this kind of emulator implementation.

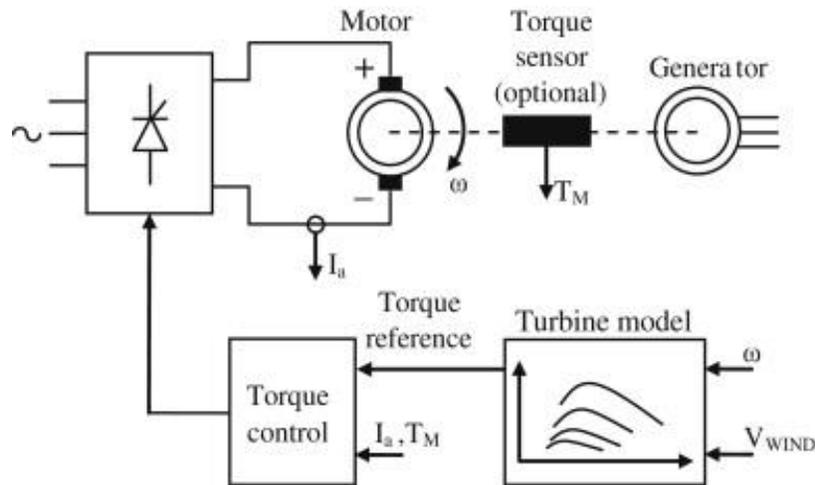


Figure 2: DC motor controller model

There are also wind turbine emulators that use AC motors. The turbine model sets the motor torque reference from the wind and speeds. The control system of AC motor makes the torque equal to the previous set reference, as shown in Figure 3 below [7].

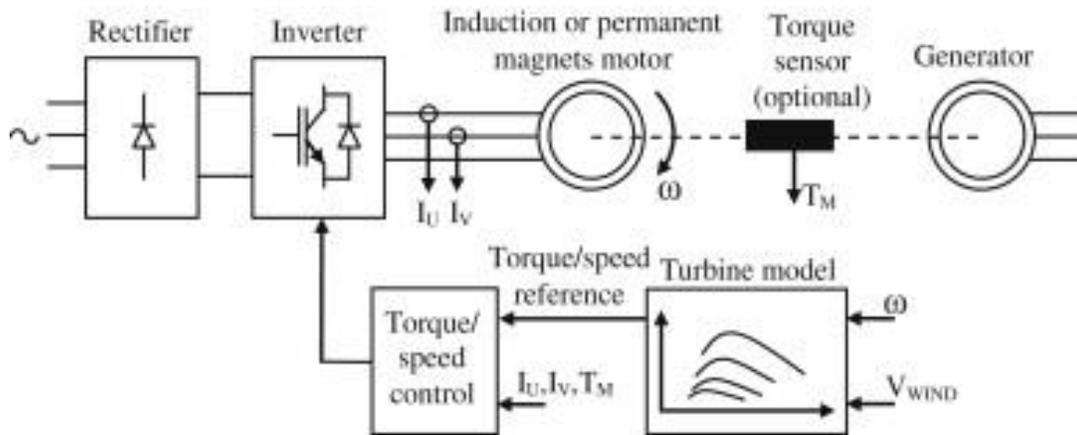


Figure 3: AC motor controller model.

All these types of wind turbine emulators use closed loop control, and they feedback the speed and torque of the motor to emulate the wind turbine and generate a new motor torque reference using a computer.

D. Lifecycle of Similar Products

Although there are not many projects nor products that are similar to the wind power emulator, we have some examples of companies that produce wind turbines. The lifecycle of the emulator shown in Figure 4 below is similar (and thus dependent) to the turbine lifecycle [8]. Taking, for example, the lifecycle of Siemens Wind Power Turbine: it encompasses raw material extraction, materials processing, manufacturing, installation, operation and maintenance, and dismantling and end-of-life [8]. The average phase currently of similar technologies is on maintain and improvement, which is the purple and blue state of the cycle in Figure 4 below.

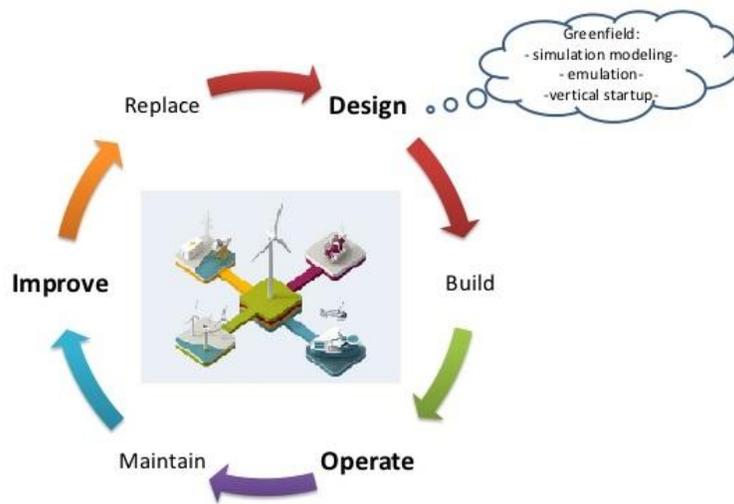


Figure 4: Lifecycle of similar products.

CHAPTER 2: EXPERIMENTAL METHOD

A. Engineering Requirements Development

I. Customer Requirements

It is important for the project to meet the customer's desires and requirements. Some items regarding these needs are following listed and rated as a required (R) or a desired (D) feature for the final project, as shown in Table 2. Its constraints are listed as well and considered together with the customer's requirements.

After knowing these requirements, the Table 1 and the objective tree in Figure 5 were built, relating categories of the project and rating their importance over each other. The higher the

number in a cell, the more important is the listed category in that row over the one cited in that column.

Table 1 – Categories comparison.

Categories	Ease of use	Hardware	Protection	Row total	Weight
Ease of use	1	2/3	3/2	3.17	0.33
Hardware	3/2	1	2	4.50	0.46
Protection	2/3	1/2	1	2.17	0.21
			Total	9.84	1.00

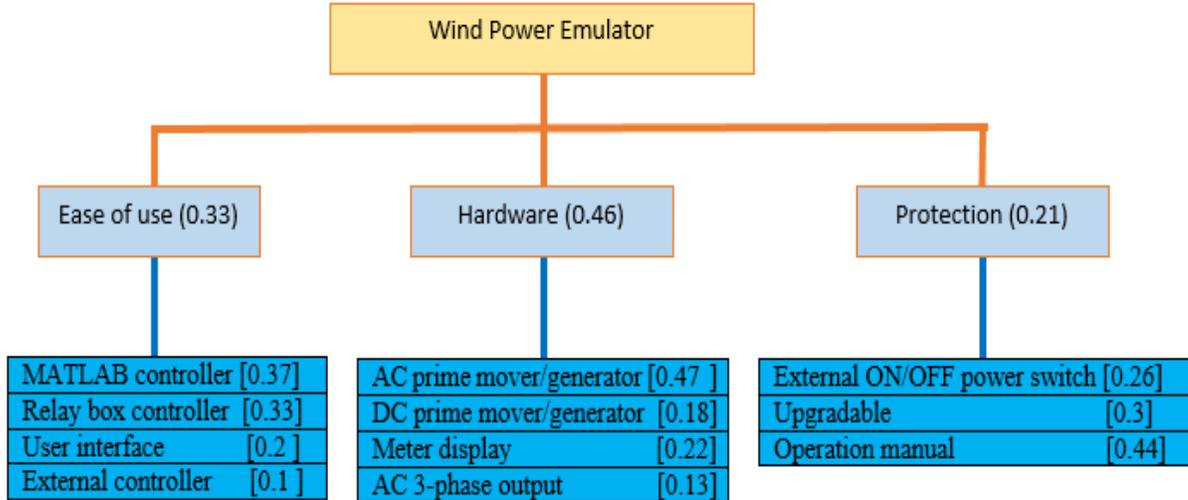


Figure 5: Objective tree

II. Environmental and Safety Concerns

As a project that is directly connected to natural resources, the concerns for environmental and safety are important factors to be considered. The protection of the system, equipment and users is one of the main topics required by the sponsor and customers of this project. The wire connections between the motors, inverters and the electric grid of the laboratory are enclosed, ensuring that the users do not have any direct contact with these wires while the system is operating. Other protective manners also restrict the amount of current and voltage generated, as well as the speed of the motor, in order to prevent any damage to the equipment in case that these

parameters exceed the maximum rated values. In addition, alarms and visual alerts are used to warn the users about any malfunction or danger.

The system is considered ‘environmentally friendly’, since the wind is a renewable resource of power. Thus, there is no pollution nor any other gas release into the environment. The only concerns it may have are the same as the ones of the wind turbines, generally related to the noise of these equipment, visual impacts, and avian/ bat mortality. For this project, since we are using an induction motor to simulate the wind, these last cited concerns are not applicable.

III. Legal, Ethical or Political Concern

The project does not incur any legal nor political concerns. All the power and voltage necessary agree with the energy supply of the laboratory and the standards used, IEEE 1547 and IEEE 1001-1988 (explained in the next section), ensuring that no law is violated during the implementation, testing and operation phases. Since the project uses the wind, a renewable resource, and no pollution is emitted, besides being in complete accordance with the standards used, there is no ethical concerns neither.

IV. Sustainability

Sustainability may be described as the ability to develop and fulfill the needs of the current generation without compromising the needs of the next generations. Since this project uses only renewable resources and there is no waste nor any kind of pollution at the end of its cycle, we are able, therefore, to call it a sustainable and green project. The system aims to help other customers to reach this same status by emulating actual conditions for the installation of wind generators in different areas, spreading the idea of sustainability.

V. Constraints

The design process of Wind Power Emulator must meet the following constraints:

- Cost constraints: budget is dependable on sponsor;
- Time constraints: the project must be completed by May, 2016;
- Course constraints: this project must meet requirements specified by EE 406 Capstone Design, at Penn State Harrisburg;
- Testing: all simulation will be done in the lab with the approval of the lab supervisor;
- System integration constraint:
 - Load and storage bus: 48V DC;
 - Total power capacity: 12kW;
 - Three electrical buses: 208V 60Hz;
 - Battery Storage: 48V Dc 180Ah

VI. Standards

The Wind Power Emulator project will be designed using two standards. The IEEE 1547 Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems is used to provide the necessary requirements for performance, operation, testing and safety. The IEEE 1001-1988 - Guide for Interfacing Dispersed Storage and Generation Facilities with Electric Utility Systems is used to alert electric utilities, manufacturers and generation equipment.

B. Engineering Requirements

Table 2 shows the requirements of the system. These requirements have to meet in order to attend the customer`s requirements. The engineering requirements make sure that the system operates satisfactory according to its constraints and still provides the experience and features that the customer demands.

As the customer`s requirements were based on the opinion of possible customers for this project, the engineering requirements are based on the customer`s one, translating them to a technical language that fits with the electrical engineering area, showing also aspects of how each feature is implemented in the system and justifying its utilization. Most of the requirements are already displayed with their estimated operational values and/or their operational method.

Table 2 - Engineering requirements development

Marketing Requirement	Engineering Requirement	Justification
2, 7, 8	On-Off main power switch rated at > 10A	Master On-Off switch
1, 10	Visual output – Real-time data: voltage (110~380V), current (0~10A), power efficiency (0~100%), motor speed, frequency (50~70Hz).	Allow user to monitor the system parameters when it is operating.
4, 5	Operating frequency: 60Hz, AC 120 Vrms	Standard operating grid power line in the USA.
7, 12	Visible LED warning if current flow is > 6A.	Visual warning if current overflows.
3	Manual/automatic controller by software	User can control the system through graphical interface controller
6, 7, 9	User manual, providing detail how to operate the system	Allow user to easily understand how the system works
7, 12, 13	Shut down the system if the wind is blowing under the cut-in speed or higher than the cut-out speed	Prevent mechanical damage when speed is unstable
4, 11, 12, 13	AC induction generator; AC or DC prime over motor TBD	Laboratory requirement for emulation
<p>Customer`s requirements:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Meter display to monitor voltage, current and power (R); 2. External manual controller (R); 3. Use MATLAB controller for the system (R); 4. Use AC prime mover/generator (R); 5. DC output (R); 6. Be able to upgrade the system`s hardware and software in the future (R); 7. User and equipment protection features (R); 8. External ON/OFF power switch (R); 9. Detailed documentation and operation manual, including blueprint (R); 10. Have graphical user interface (D); <p>Constraints:</p> <ol style="list-style-type: none"> 11. The project must be completed by May, 2016; 12. System integration constraints: load and storage bus: 48V DC; total power capacity: 12kW; three electrical buses: 208V 60Hz; battery Storage: 48V Dc 180Ah. <p>Standards:</p> <ol style="list-style-type: none"> 13. IEEE 1547 - Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems 		

C. Functional Decomposition

I. Design Trade-offs

In the process of development of the Wind Power Emulator, there have been two design trade-offs. The first trade-off was the method to extract power from the wind. There are two popular methods to do so: the first one is done by designing the rotation speed of the induction motor to be a constant value; the second method designs the induction motor speed to be changing linearly based on the wind speed. After reviewing and discussing with our sponsor, the design was based on the linear relationship because it allows the system to capture the maximum power available in the wind at any given wind speed.

The second trade-off was the addition of a second controller. At first, Arduino Due was used as the brain of the entire system to handle all the computation and data collection from sensors. However, in order to easily program and upgrade in the future, a second controller, Arduino Uno, is used as an isolated controller for the sensors. The Arduino Uno is perfect for reading feedback from sensors because it can tolerate analog voltage from 0v to 5v. This implementation of a second controller benefits the project because the Arduino Software has many building libraries that are compatible with sensors and displays. As the result of adding a second controller for the sensors, the system efficiency has been improved, since the computation in the main controller is faster.

II. Level 1 and 2 Decomposition

The following Figures 6 and 7 show the functional decomposition of the project in level 1 and level 2, respectively.

The level 1 functional decomposition is an overview of the entire system, starting with the input from the user to the controller to control the generator parameters through the driver. The sensors detect the real values generated and display them to the user in the monitoring box, as well as returning this feedback to the controller so it can adjust the generator. The level 2 functional decomposition is more detailed than the level 1. It examines closely each box of this level 1 decomposition and explains better their functionality, input and output.

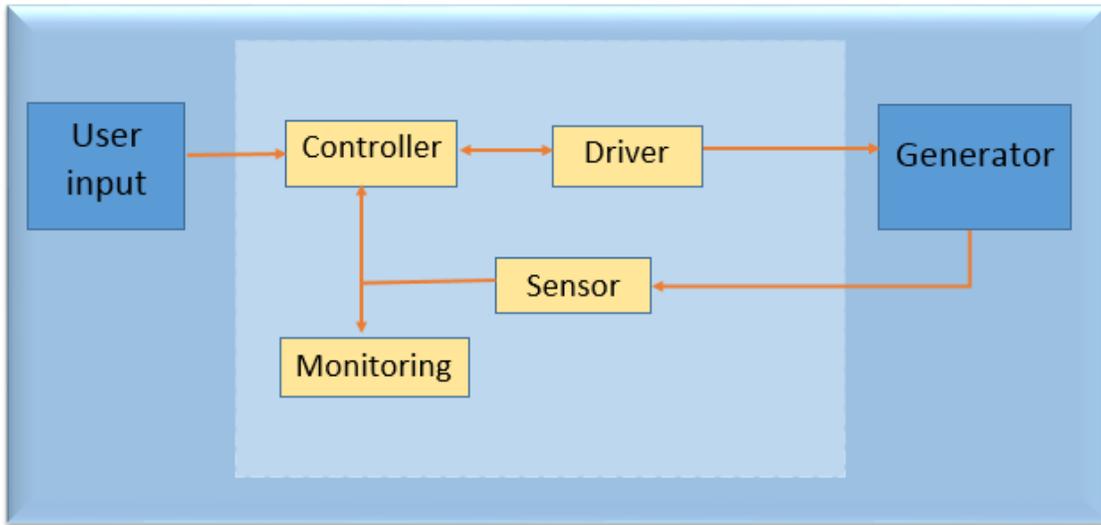


Figure 6: Level 1 functional decomposition

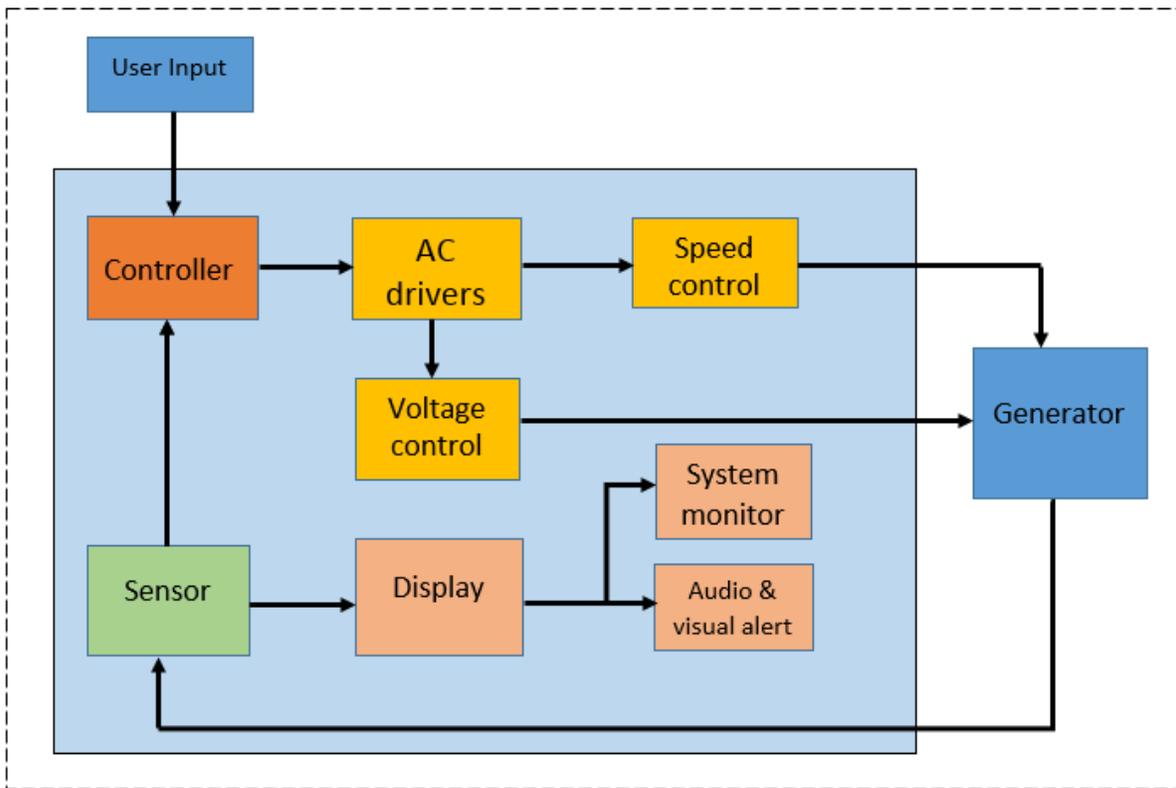


Figure 7: Level 2 functional decomposition

Module	Speed and Voltage Controller
Inputs	<ul style="list-style-type: none"> • User's input: desired speed, voltage and frequency; • Voltage and speed comparison values.
Output	<ul style="list-style-type: none"> • MATLAB's response to the compared data.
Functionality	<ul style="list-style-type: none"> • Controls the generated signal to be equal to the user's input data and specifications.

Module	Data comparison
Inputs	<ul style="list-style-type: none"> • Speed control feedback signal; • Voltage control feedback signal; • Voltage, current and frequency values detected by the sensors.
Output	<ul style="list-style-type: none"> • Compared data between generator's sensors and controlled parameters.
Functionality	<ul style="list-style-type: none"> • Compares controlled parameters (speed and voltage) from the AC driver with the real generated values detected by the sensors.

Module	Voltage, current and frequency sensors
Inputs	<ul style="list-style-type: none"> • Generator parameters (voltage, current and frequency) feedback signal.
Output	<ul style="list-style-type: none"> • Real generated values for data comparison/control and for user's display and monitoring.
Functionality	<ul style="list-style-type: none"> • The sensors detects the real values feedback by the generator and transmit them for the comparator and displayer blocks.

Module	AC driver
Inputs	<ul style="list-style-type: none"> • Controlled desired speed and voltage digital signals from MATLAB.
Output	<ul style="list-style-type: none"> • Speed and voltage required from the MATLAB controller box for the generator.
Functionality	<ul style="list-style-type: none"> • Actuator that receives the desired parameters and transmit these values to the generator.

Module	Speed Controller
Inputs	<ul style="list-style-type: none"> • Speed analog value created by the AC driver.
Output	<ul style="list-style-type: none"> • Speed that the generator shall use for the specific controlled values.
Functionality	<ul style="list-style-type: none"> • Controls the speed of the generator.

Module	Voltage Controller
Inputs	<ul style="list-style-type: none"> • Voltage analog value created by the AC driver.
Output	<ul style="list-style-type: none"> • Voltage that the generator shall generate for the specific controlled values.
Functionality	<ul style="list-style-type: none"> • Controls the voltage generated by the generator.

Module	Display
Inputs	<ul style="list-style-type: none"> • Real voltage, current and frequency generated, measured by the sensors.
Output	<ul style="list-style-type: none"> • Monitoring data for the user; • Alarm alerts.

Functionality	<ul style="list-style-type: none"> Shows the real values of the parameters generated to the user, as well as an alarm in case of overflow or any other emergency.
---------------	--

Module	Monitoring system
Inputs	<ul style="list-style-type: none"> Real parameters generated, measured by the sensors to the display block.
Output	<ul style="list-style-type: none"> Graphical real-time data display.
Functionality	<ul style="list-style-type: none"> Shows the real values of the parameters (voltage, current and frequency) generated to the user through the own computer screen.

Module	Audio and visual alerts
Inputs	<ul style="list-style-type: none"> Real parameters generated, measured by the sensors to the display block.
Output	<ul style="list-style-type: none"> Activation signal for an LED and/or speaker.
Functionality	<ul style="list-style-type: none"> Gives an alert through a flashing LED and a noise emitter in case of current overflow or any other irregularity or emergency that may happen to the system.

D. Subsystem Development and Results

1. Simulink program - written by Thien Pham

The Wind Power Emulator main controller is the Arduino Due Development kit. The controller program is developed in Simulink, using Simulink block and Arduino Hardware Support Packages. In Figure 8 below, it shows the overview of Simulink model control design for the Induction Motor. The program control allows users to manually input the wind speed or have Simulink block to generate wind speed randomly. In addition, users can set their desired parameter such as constant tip speed ratio (TSR), maximum and minimum wind speed, blade radius, air density and nominal wind velocity. These input values will be used to calculate the speed of the induction motor based on equation (2). Arduino maps the value of the induction motor speed to a signal voltage control from 0v to 5v. This control signal from the Arduino drives the AC inverter to make induction motor run at the desired speed calculated from user inputs.

Using the feedback signal from the Hall Effect sensor on the DC generator and the Arduino, the block Subsystem in Figure 9 below is used to calculate the power capture and torque available from the wind. The Subsystem block was designed based on MATLAB build-in wind turbine block [9], equations (3) and (4) below.

The controller for the induction motor and Dc generator model are shown in Figure 17 and Figure 18 in the Appendix.

The controller program in Simulink shown in Figure 16 can be flashed in the Arduino to make it a stand-alone system, running without computer power, or the users can choose to run Simulink program by an external option to interact in real-time with the Arduino through serial

communication port. By using external, users can modify and monitor the system parameters in real-time through Simulink Scope.

$$\lambda (TRS) = \frac{R * \omega_{motor}}{V_{wind}} \tag{2}$$

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p \tag{3}$$

$$Torque (N.m) = \frac{9.5488 * Power (kW)}{Speed(RPM)} \tag{4}$$

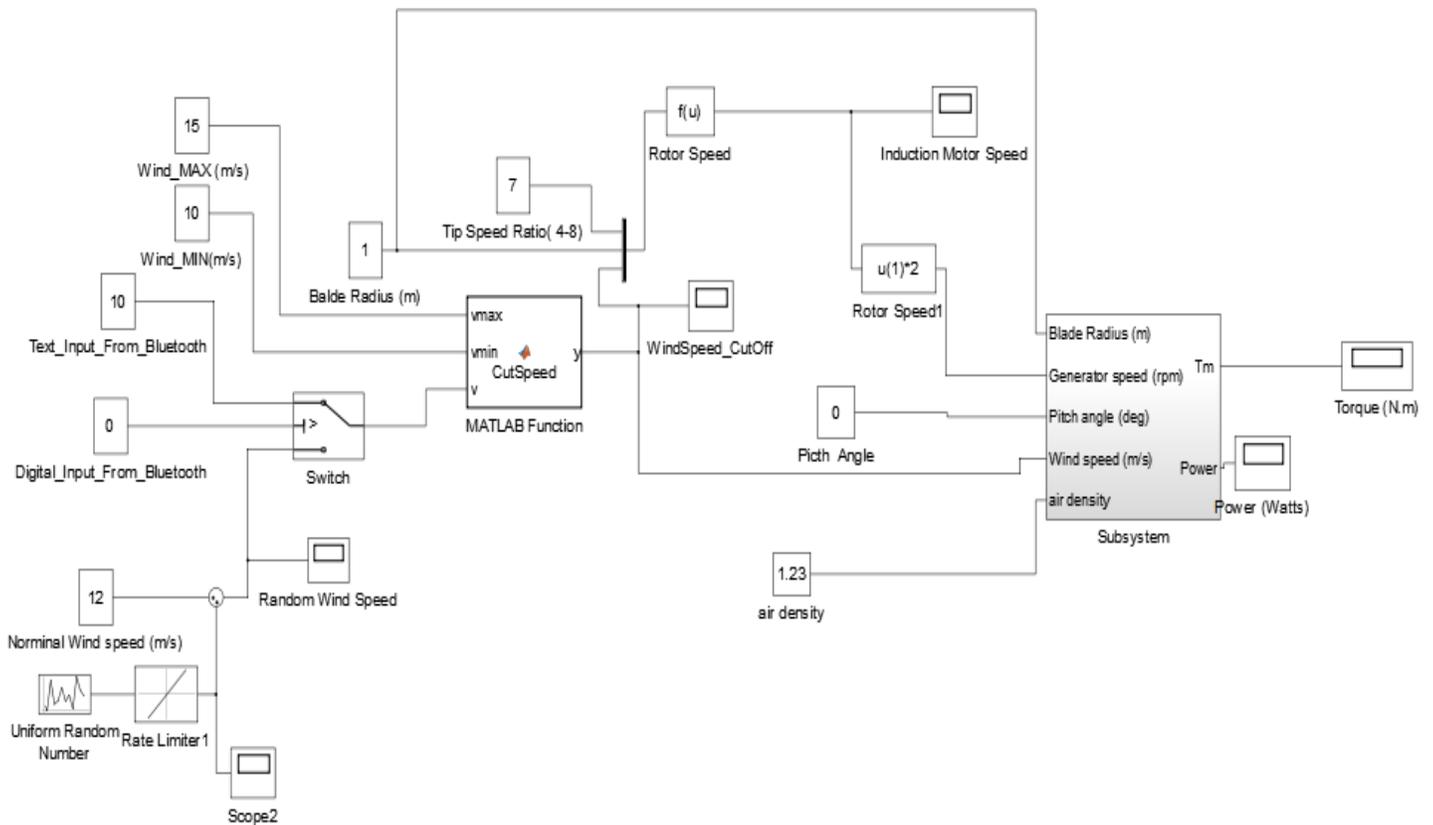


Figure 8: Simulink Controller model

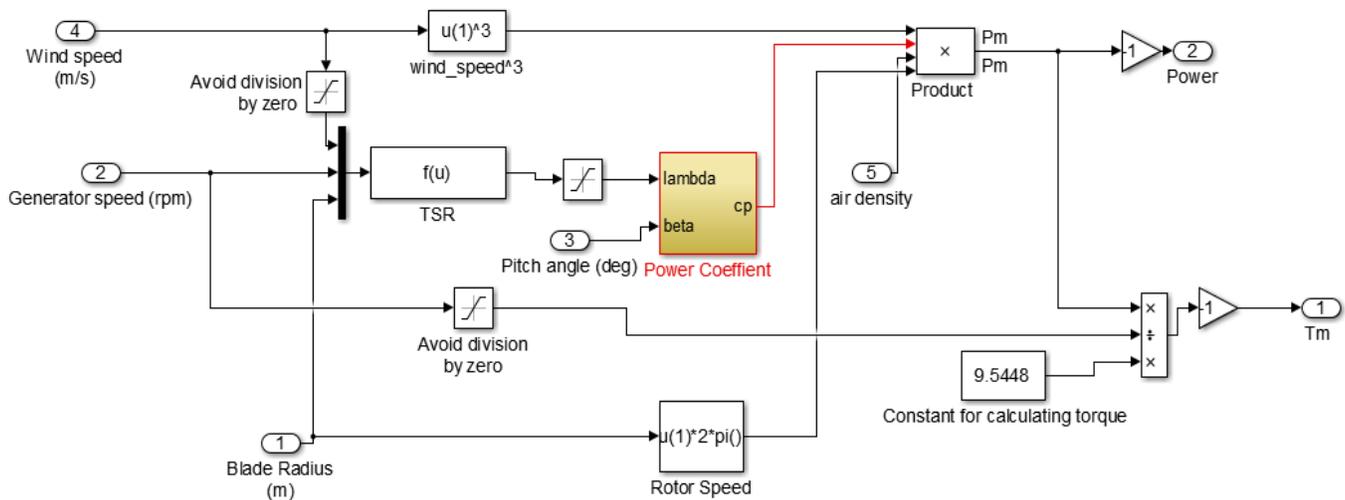


Figure 9: Subsystem block

2. Arduino Uno, sensors and LCD display - written by Thien Pham

The Hall Sensor (A3144) Module and Neodymium Disc Magnets, as shown in Figure 10 below, is used to capture the rotational speed of the induction motor. The circuit that senses this rotational speed is shown in Figure 11. The Hall Sensor outputs a digital (HIGH) logic in pin D0 whenever it detects a magnetic field. As shown in Figure 11, the digital output from Hall Sensor is connected to pin 6 of the Arduino. The code, shown in Figure 15 in the appendix, was written to calculate the RPM of the motor. In this code, the Arduino detects the rising edge of the Hall Effect sensor and calculate the time interval between each rising edge. This time, period is used to find the corresponding frequency and multiplies this frequency by sixty to get the rotational speed for one minute. Also, the Arduino will display this RPM value to the 2×16 LCD. The setup for the LCD connection is shown in Figure 11 as well. The LCD and Hall Effect sensor are powered by the Arduino (+5v and Ground). The "LiquidCrystal.h" library is used to establish the communication between the Arduino and the 2×16 LCD display. In the code, the user can define the max RPM speed and the LCD displays the rotational speed of the induction motor, as well as the percentage of the speed compared to the max speed value. In Figure 12 below, the first row shows the current read RPM and the second row shows the percentage.

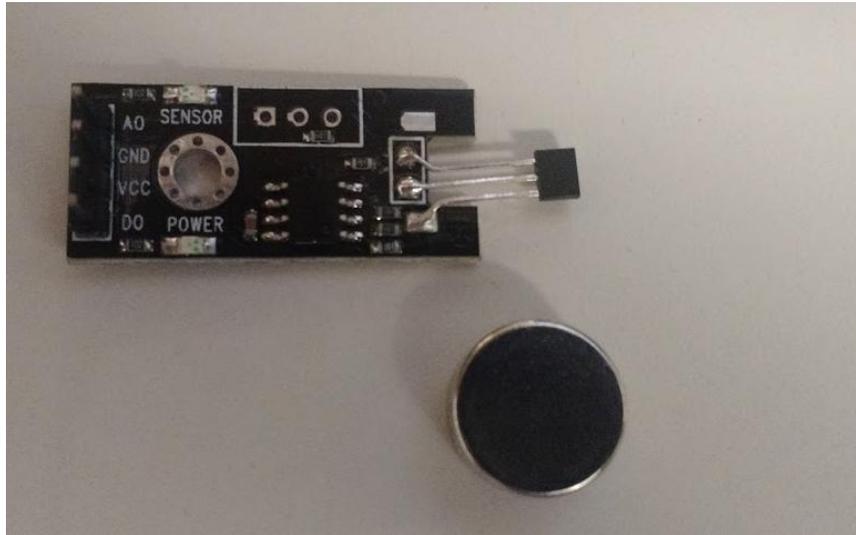


Figure 10: Hall Effect sensor and magnet.

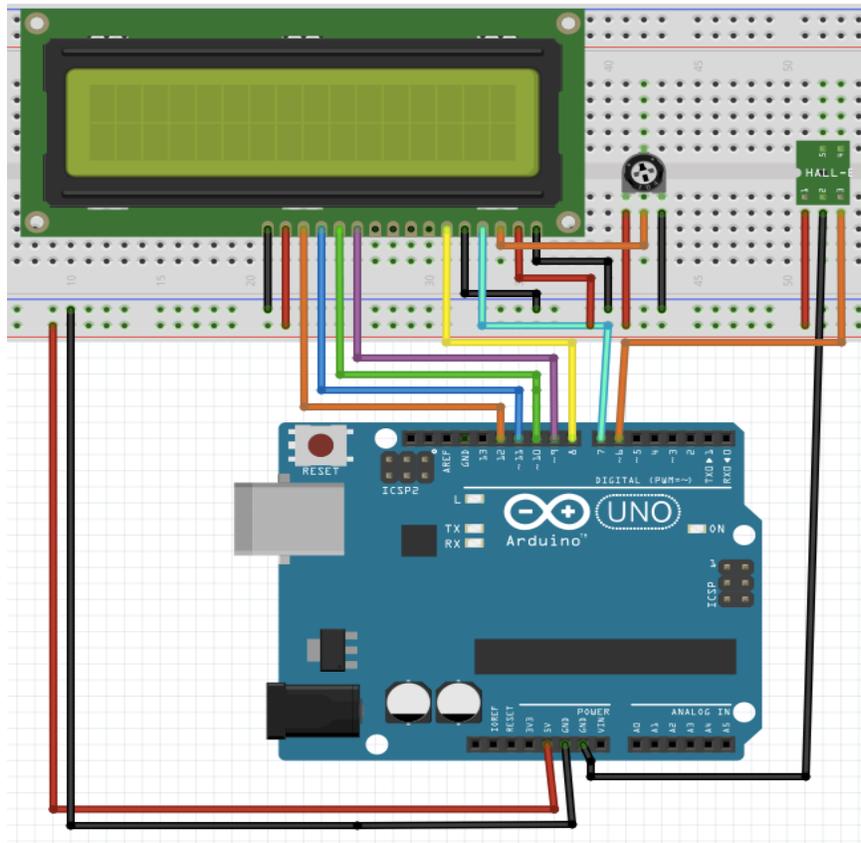


Figure 11: LCD and sensor circuit

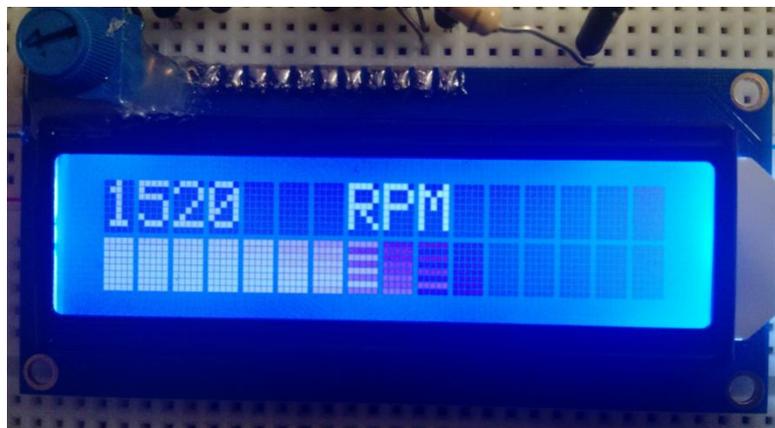


Figure 12: LCD display

3. AC Driver - written by Matheus Sousa

The AC driver is a subsystem composed of two AC inverters, model XFC-2007-5B, produced by TB Wood's. These equipment are responsible for 'translating' the parameters controlled by the controller subsystem to the external electric machines.

The Arduino controller, after calculating the speed and voltage parameters through the data comparison between the values of user wind speed inputs and the real measured values from the sensors, connects to both AC inverters in order to communicate the new calculated parameters to the induction motor (simulating a real wind turbine) and to the DC generator. In the first case, the controller sends a signal from 0V to 5V to the AC driver. The latter one, then, outputs the frequency to the motor, varying its rotational speed to the desired value given by the controller. The output of the inverter for this application is a 230 VAC (three-phase voltage) signal, up to 70 Hz. The second inverter also receives a 0V to 5V signal from the controller. For this application, though, it outputs a DC voltage that goes up to 60V and a maximum current of 2.3 A. This current controls the field flux of the DC generator, influencing, thus, in the voltage generated by the machine.

4. Protection and other sensors - written by Matheus Sousa

The protection subsystem is composed by a few circuit breakers (12 A), connected to the main power source and the AC inverters and the motor/ generator. Thus, they isolate and cut off the power of the whole system in case of overcurrent or short circuit. These breakers also allows the users to manually shut down the system, if desired.

The controller plays an important role in the protection of the system as well, directly related to the parameters generated. It is able to set the induction motor speed to zero if the input wind speed is higher than the maximum speed limit supported. The controller stops the motor that simulates the wind turbine, protecting the equipment from external damage. Since there is no wind motion anymore, the field voltage of the DC generator is automatically set to zero and no output voltage is generated. The system has also the ability to restart its operation as soon as the wind speed comes back to the range of operating values. A similar procedure happens if the wind speed is lower than the minimum speed limit allowed. In this occasion, the system shuts down because the generator is not able to supply enough power for the load due to low wind speed.

Other sensors used in this project are the LEM LA 55-P and LV 25-P, which are, respectively, a current and a voltage transducers, used for electronic measurement of currents and voltages throughout the whole system. Both types of sensor utilize the Hall Effect technology and are able to measure values up to 50 A and 500V.

E. System Integration, Test, and Results

The algorithm developed in Simulink and Arduino Software has been verified in computer simulation and real-time mode. The Arduino Due has success running Simulink code in stand-

alone mode and it can exchange information with the user in real-time by external-mode via serial connection. In the main controller, Arduino Due reads and sends data at the rate of 1ms. However, the Simulink Scope can only display information at the rate of 100ms. The sensors and display have worked as expected: the Arduino Uno reads the rotational speed of the induction motor with an error within the acceptable range of 5 RPM. There have been issues for transferring data from the Arduino Uno to the Arduino Due because the analog outputs of the first one are pulses with modulate (PWM). A low pass filter with 4.7K Ω resistor and 1 μ F capacitor was used to convert the PWM output from Arduino Uno to its corresponding DC voltage. By this low pass filter, the Arduino Due was able to read information from the Arduino Uno. In simulation mode, the proportional method has worked for the steady state error; the output voltage generated by the DC generator was within 5% error compared to the reference voltage as shown in Figure 21 in the Results section.

The wind speeds, induction motor speeds, and the DC field winding voltage in simulation mode are shown in Figure 22, Figure 23 and Figure 24.

The results of the system in simulation mode with constant RPM is also shown in Figure 19 in the results section. The output voltage and field voltage of the DC generator have a linear relationship as shown in Figure 19.

For the hardware side, the connection of the induction motor and the DC generator was completed as shown in Figure 25. There was power available for the two AC divers to run the initial test on both machines. The induction motor was running as expected in manual mode. The results of the output voltage with the induction motor speed at 812 RPM is shown in Figure 20.

CHAPTER 3: PROJECT MANAGEMENT

A. Project Work Breakdown Structure (WBS)

The Wind Power Emulator project development follows five primary stages as shown in the work breakdown chart, in Figure 13. The primary task in the first stage is to research and to develop the controller for the system. Additionally, the connection of sensors to the controller has established during this stage. The second stage deals with the assembly of the system: all components connection are established and the controller program is implemented to the system. The next phase is testing and evaluation. Within this stage, the overall performance of the Wind Power Emulator is tested. In the next one, the program is adjusted for accuracy and functionality with feedback that is collected from the testing section. Finally, the last stage is mainly focused on report writing, presentation, and demo preparation.

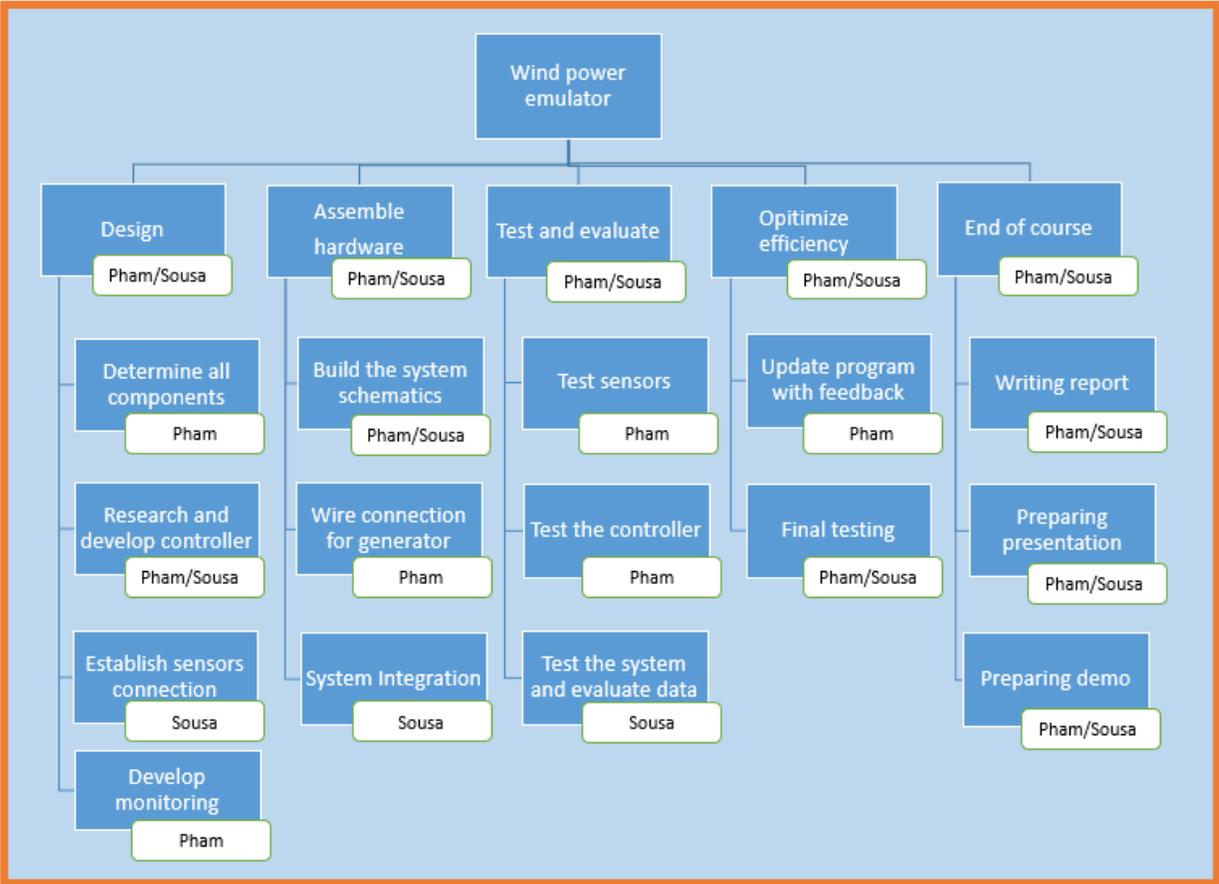


Figure 13: Work breakdown chart

B. Project Schedule (Gantt Chart)

Wind Power Emulator

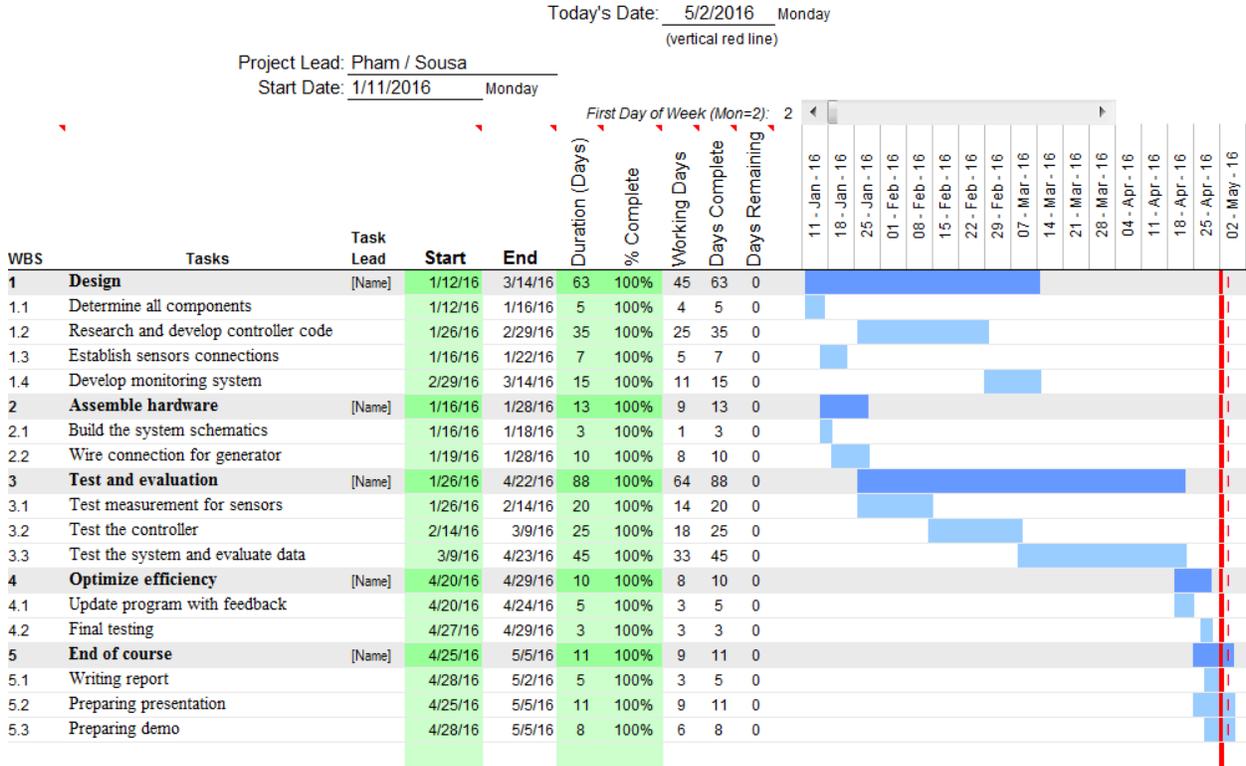


Figure 14: Project Gantt chart

C. Project Budget

The following table shows the costs of labor hours for this project and its total budget. Since it is a sponsored project, the cost calculations for equipment and parts are not included in the table; the group's sponsor provides these items. These equipment include AC driver, frequency transducer, CT, VT, IT, DC generator, induction motor, batteries, breakers, etc. The software license used for the implementation of the emulator is provided by the sponsor as well. Thus, the only costs besides labor hours for this project are the ones for consultation, as shown in Table 3 below:

Table 3 - Cost analysis for the wind power emulator.

Cost Analysis for Wind Power Emulator				
Item	Unit	Unit cost	# Units	Total cost
Modeling	hr	\$50	30	\$1,500
Information gathering	hr	\$50	35	\$1,750
Design	hr	\$70	80	\$5,600
Construction	hr	\$45	30	\$1,350
Testing	hr	\$50	40	\$2,000
Consultation	hr	\$30	30	\$900
Grand Total:				\$13,100

CHAPTER 4: SUMMARY AND CONCLUSION

Wind power systems have been recognized as one of the potential solutions for future renewable energy. The high demand for environment-friendly power generation has motivated researchers to concentrate on the integration of wind power to conventional systems. The wind power emulator is a real-time hardware simulator for the micro-grid power system, which makes possible the analysis, calculation, and development for industry, utility companies and/or researchers' implementation of real wind power generators.

This report shows the development of the wind power emulator, which follows the engineering and customers' requirements. Also, the project must meet the constraints and standards in order to attend the sponsor's specifications. By following the cost and work schedule, the Wind Power Emulator can be completed and presented by early May 2016.

References

- [1] Ecotricity.co.uk, 'The End Of Fossil Fuels - Our Green Energy - Ecotricity', 2015. [Online]. Available: <https://www.ecotricity.co.uk/our-green-energy/energy-independence/the-end-of-fossil-fuels>. [Accessed: 09- Oct- 2015].
- [2] The Guardian, 'Timeline: The history of wind power', 2008. [Online]. Available: <http://www.theguardian.com/environment/2008/oct/17/wind-power-renewable-energy>. [Accessed: 09- Oct- 2015].
- [3] Engineeringtoolbox.com, 'Wind Power', 2015. [Online]. Available: http://www.engineeringtoolbox.com/wind-power-d_1214.html. [Accessed: 29- Oct- 2015].
- [4] T. Petru and T. Thiringer, 'Modeling of Wind Turbines for Power System Studies', *IEEE Power Engineering Review*, vol. 22, no. 9, pp. 58-58, 2002.
- [5] Ecosenseworld.com, "Wind Turbine Emulator | Ecosense", 2015. [Online]. Available: <http://www.ecosenseworld.com/labs/wind-energy-labs/wind-turbine-emulator>. [Accessed: 14- Dec- 2015].
- [6] Soar.wichita.edu, 2015. [Online]. Available: http://soar.wichita.edu:8080/bitstream/handle/10057/5098/Jewell_2011.pdf?sequence=1. [Accessed: 14- Dec- 2015]
- [7] Sciencedirect.com, "Open loop wind turbine emulator", 2015. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148113004862>. [Accessed: 05- Nov- 2015].
- [8] Energy.siemens.com, 'Environmental Product Declarations - Siemens', 2015. [Online]. Available: <http://www.energy.siemens.com/hq/en/renewable-energy/wind-power/epd.htm>. [Accessed: 05- Nov- 2015].
- [9]"Implement model of variable pitch wind turbine - Simulink", Mathworks.com, 2016. [Online]. Available: <http://www.mathworks.com/help/phymod/sps/powersys/ref/windturbine.html;jsessionid=35af2d527a169878423ceb732c66>. [Accessed: 01- Apr- 2016].
- [10]"WEN Technology - Calculators", Wentec.com, 2016. [Online]. Available: http://www.wentec.com/unipower/calculators/power_torque.asp. [Accessed: 01- Apr- 2016].
- [11]"Using a Hall Effect sensor with an LCD screen (solved)", Forum.arduino.cc, 2016. [Online]. Available: <http://forum.arduino.cc/index.php?topic=234626.0>. [Accessed: 01- Apr- 2016].

Appendix – Code

```
*/
const int POT=0;
const int MOTOR = 5;
int val=0;
int full_rpm;
int Speed=0;
volatile byte half_revolutions;
unsigned int rpm;
unsigned long timeold;

// include the library code:
#include <LiquidCrystal.h>

//Lcd Display
LiquidCrystal lcd(7,8,9,10,11,12);
const int maxRPM = 2200;

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  attachInterrupt(0, magnet_detect, RISING); //Initialize the interrupt pin (Arduino digital pin 2)
  half_revolutions = 0;
  rpm = 0;
  timeold = 0;

  // Lcd
  lcd.begin(16, 2);
  // Print a message to the LCD.
  lcd.print("initializing");
  delay(100);
  lcd.clear();
}

void loop() //Measure RPM
{
  if (half_revolutions >= 10)
  {
    rpm = 30*1000/(millis() - timeold)*half_revolutions;
    full_rpm=rpm*2;
    timeold = millis();
    half_revolutions = 0;
  }
  displayRPM(full_rpm);
  displayBar(full_rpm);
  Serial.println(full_rpm);
  val=analogRead(POT);

  Speed=map(val,0,1023,0,255);
  analogWrite(MOTOR, Speed);
}
```

```

}
void magnet_detect()//This function is called whenever a magnet/interrupt is detected by the arduino
{
    half_revolutions++;
//    Serial.println("detect");
}

//LCD display

void displayRPM(int rpm)
{
    lcd.clear();
    // set the cursor to column 0, line 1
    lcd.setCursor(0, 0);
    // print the number of seconds since reset:
    lcd.print(full_rpm,DEC);
    lcd.setCursor(7,0);
    lcd.print("RPM");
}

void displayBar(int full_rpm)
{
    int numOfBars=map(full_rpm,0,maxRPM,0,15);
    lcd.setCursor(0,1);
    if (full_rpm!=0)
    {
        for (int i=0; i<=numOfBars; i++)
        {
            lcd.setCursor(i,1);
            lcd.write(1023);
        }
    }
}
}

```

Figure 15: Arduino code

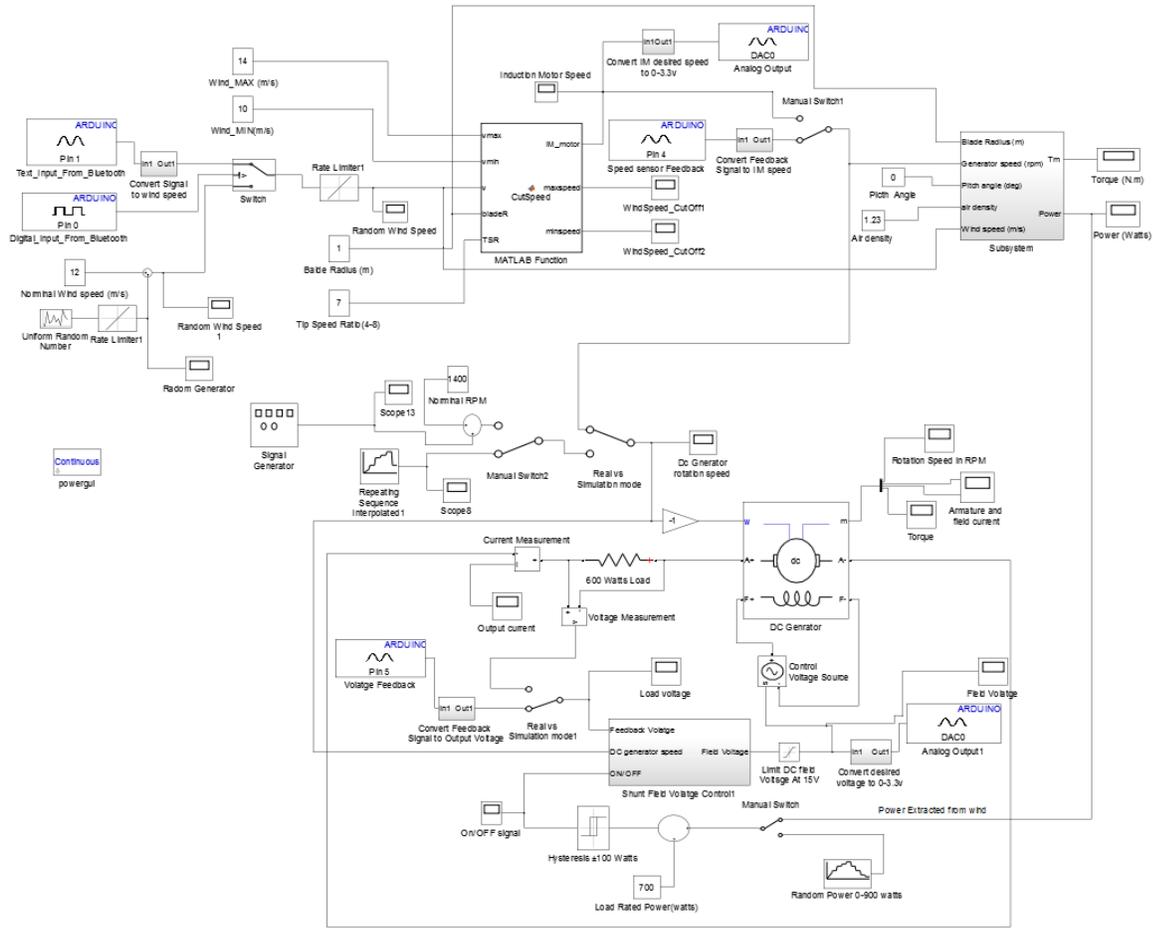


Figure 16: Simulink model

Results section

Test Author:	Dr. Peter Idowu			
Test Name:	Induction motor controller	Test ID #: 1	IM	
Description:	Determine the induction motor rotation speed based on the wind speed	Test Type:	<input type="checkbox"/> Component <input checked="" type="checkbox"/> Subsystem <input type="checkbox"/> System	
Name of Tester:	Thien Pham	Date:	4/15/2016	
Hardware/Software Version:	Arduino, Simulink	Time:	2:15 pm	
Test Setup: Simulate random speed in Simulink and determine Induction motor speed base on wind speed				
	INPUTS	OUTPUTS	P F Z	COMMENTS
Test	Wind Speed	Motor Speed Measure	x	
1	7m/s	468 RPM	x	
2	9m/s	602 RPM	x	
3	11m/s	735 RPM	x	
4	13m/s	869 RPM	x	
Test Summary: The induction motor speed and wind speed has a linear relationship because the tip speed ratio(TSR) was a constant value.				

Test Name:	DC generator - Simulation mode	Test ID #: 2	DC	
Description:	Determine the output voltage with varying wind speed (10-15m/s)	Test Type:	<input type="checkbox"/> Component <input checked="" type="checkbox"/> Subsystem <input type="checkbox"/> System	
Name of Tester:	Thien Pham	Date:	4/15/2016	
Hardware/Software Version:	Arduino, Simulink	Time:	2:15 pm	
Test Setup: Simulate random speed in Simulink and determine output voltage.				
	INPUTS	OUTPUTS	P F Z	COMMENTS
Test	Wind Speed	Dc Output voltage(V)	x	
1	7m/s	0	x	
2	9m/s	0	x	
3	11m/s	60	x	
4	13m/s	60.5	x	
Test Summary: The output voltage is only operation in the range of 10-14m/s wind speed condition.				

Test Name:	Load voltage vs Field voltage	Test ID #: 3	Vt vs Vf
Description:	Determine the relationship between the output voltage and the field voltage	Test Type:	<input type="checkbox"/> Component <input type="checkbox"/> Subsystem <input checked="" type="checkbox"/> System
Name of Tester:	Thien Pham / Matheus Sousa	Date:	4/29/2016
Hardware/Software Version:	Arduino, Simulink	Time:	3:45pm
Test Setup: Run the induction motor at 800 RPM and vary the DC field voltage to obtain the output voltage			
	INPUTS	OUTPUTS	COMMENTS
Test	Field voltage (V)	Output voltage (V)	
1	30.3	18.35	
2	42.1	25.6	
3	59.2	35.7	
4	80.6	46.8	
5	82.3	51.5	
Test Summary: The output voltage and the DC field voltage have a linear relationship.			

Test Name:	AC inverter vs DC output	Test ID #: 4	
Description:	Determine DC output of the AC-to-DC converter	Test Type:	<input checked="" type="checkbox"/> Component <input type="checkbox"/> Subsystem <input type="checkbox"/> System
Name of Tester:	Thien Pham / Matheus Sousa	Date:	4/29/2016
Hardware/Software Version:	Arduino, Simulink	Time:	3:45pm
Test Setup: Vary the control signal to the AC driver to obtain the DC output voltage from the AC-to-DC converter.			
	INPUTS	OUTPUTS	COMMENTS
Test	AC driver (Hz)	AC-to-DC converter(V)	
1	11	32.3	
2	20	54.6	
3	26	70.4	
4	32	84.0	
5	34	89.3	
Test Summary: The output voltage of the AC-to-DC converter is controlled by the frequency of the AC driver			

Ra(ohms)	200		Ra(ohms)	200		Ra(ohms)	200	
rpm	1000		rpm	1000		rpm	1200	
Vf(v)	If(amps)	Vt(v)	Vf(v)	If(amps)	Vt(v)	Vf(v)	If(amps)	Vt(v)
10.00	0.05	33.00	10.00	0.05	36.50	10.00	0.05	39.80
11.00	0.06	37.00	11.00	0.06	40.20	11.00	0.06	43.55
12.00	0.06	39.55	12.00	0.06	43.55	12.00	0.06	47.70
13.00	0.07	43.10	13.00	0.07	47.40	13.00	0.07	51.55
14.00	0.07	46.45	14.00	0.07	51.10	14.00	0.07	55.55
15.00	0.08	49.50	15.00	0.08	54.70	15.00	0.08	59.70
16.00	0.08	53.05	16.00	0.08	58.30	16.00	0.08	63.55
17.00	0.09	56.35	17.00	0.09	62.00	17.00	0.09	67.62
18.00	0.09	59.70	18.00	0.09	65.70	18.00	0.09	71.60
19.00	0.10	63.00	19.00	0.10	69.30	19.00	0.10	75.60
20.00	0.10	66.30	20.00	0.10	72.90	20.00	0.10	79.60

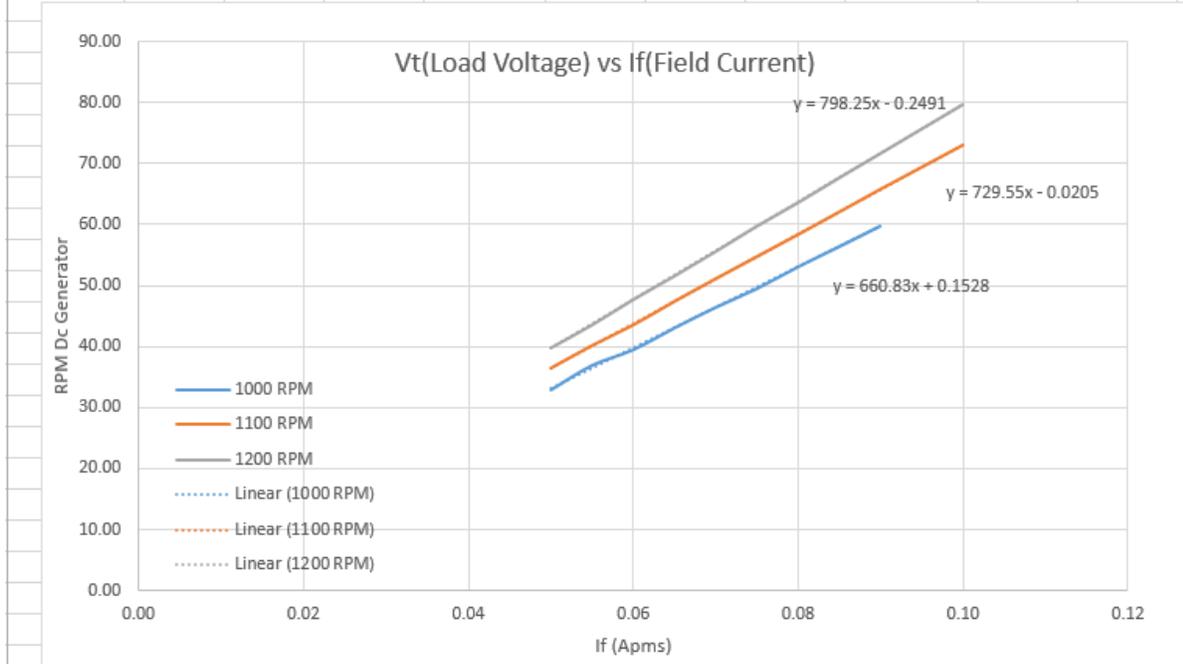


Figure 19: Load voltage vs Field current

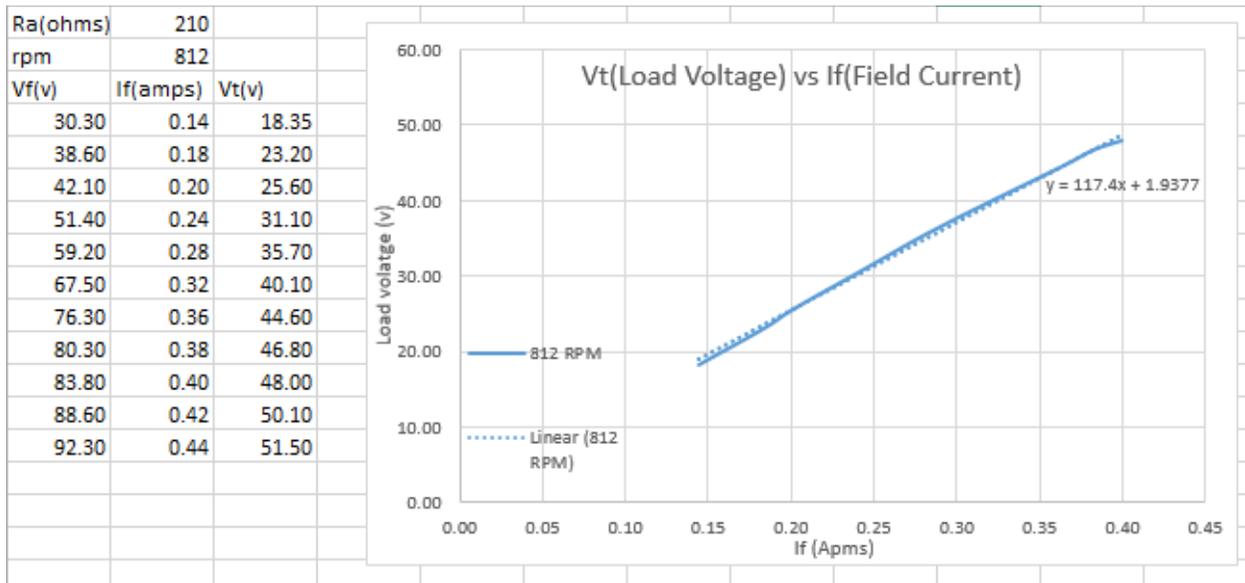


Figure 20: Hardware results

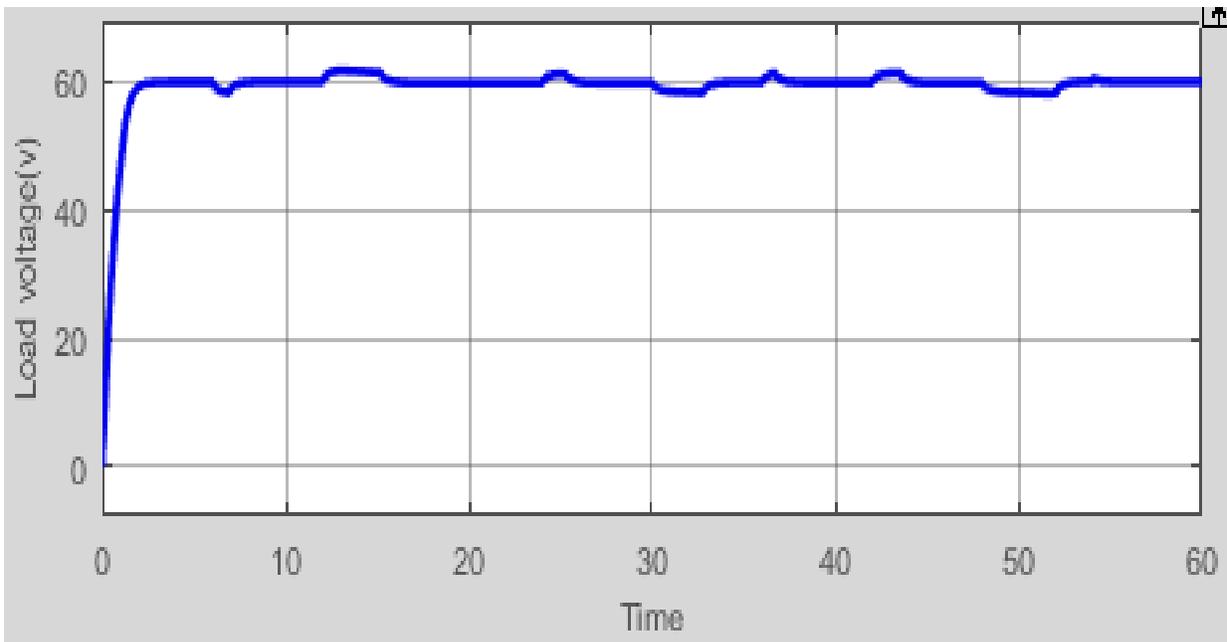


Figure 21: Output voltage controlled by Simulink

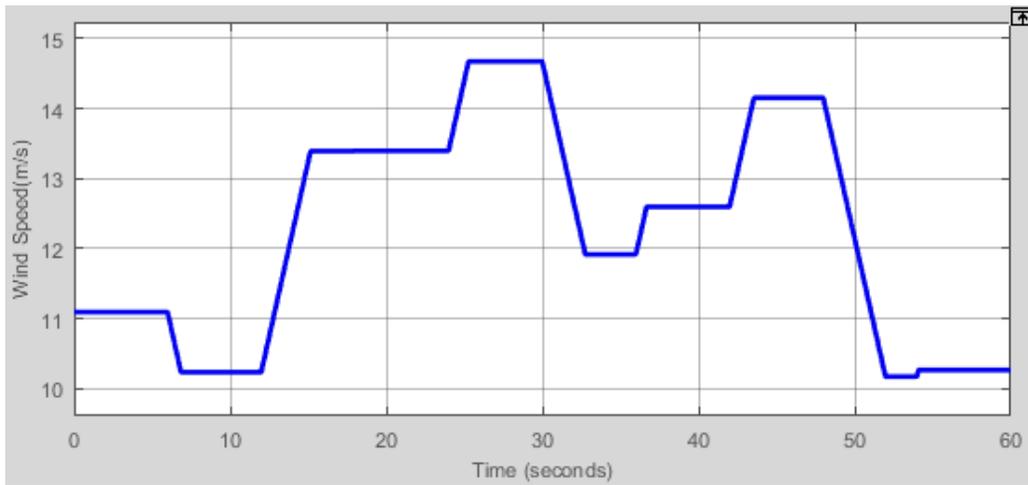


Figure 22: Random Wind Speed

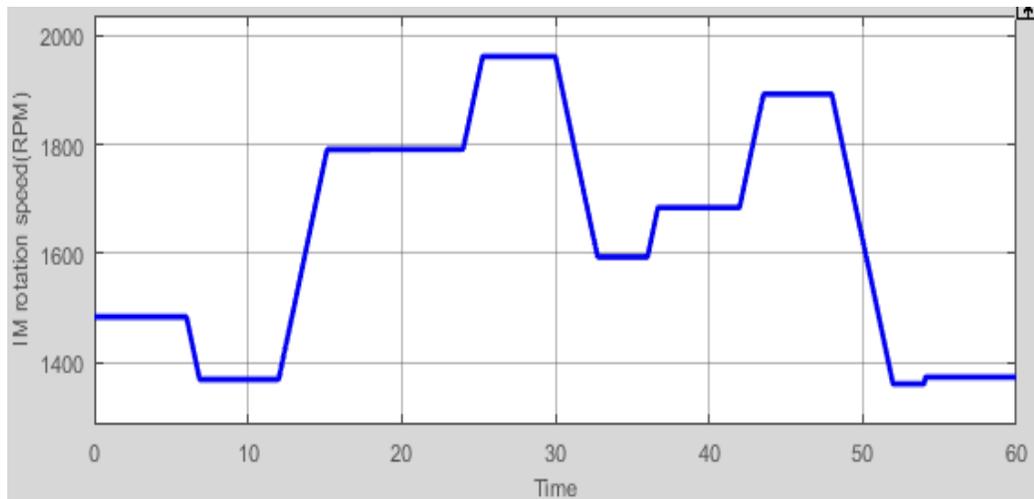


Figure 23: Induction motor speed

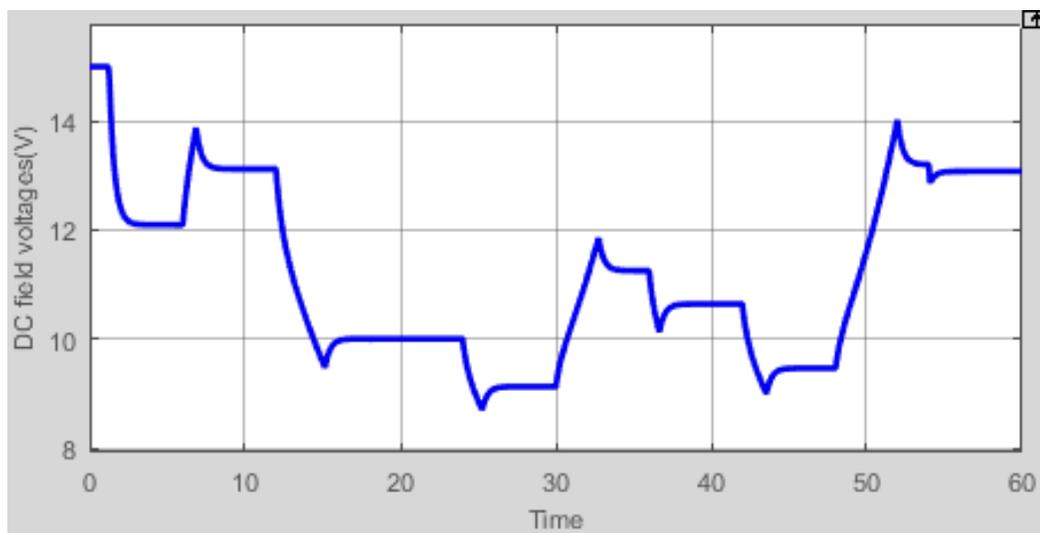


Figure 24: Dc field voltage

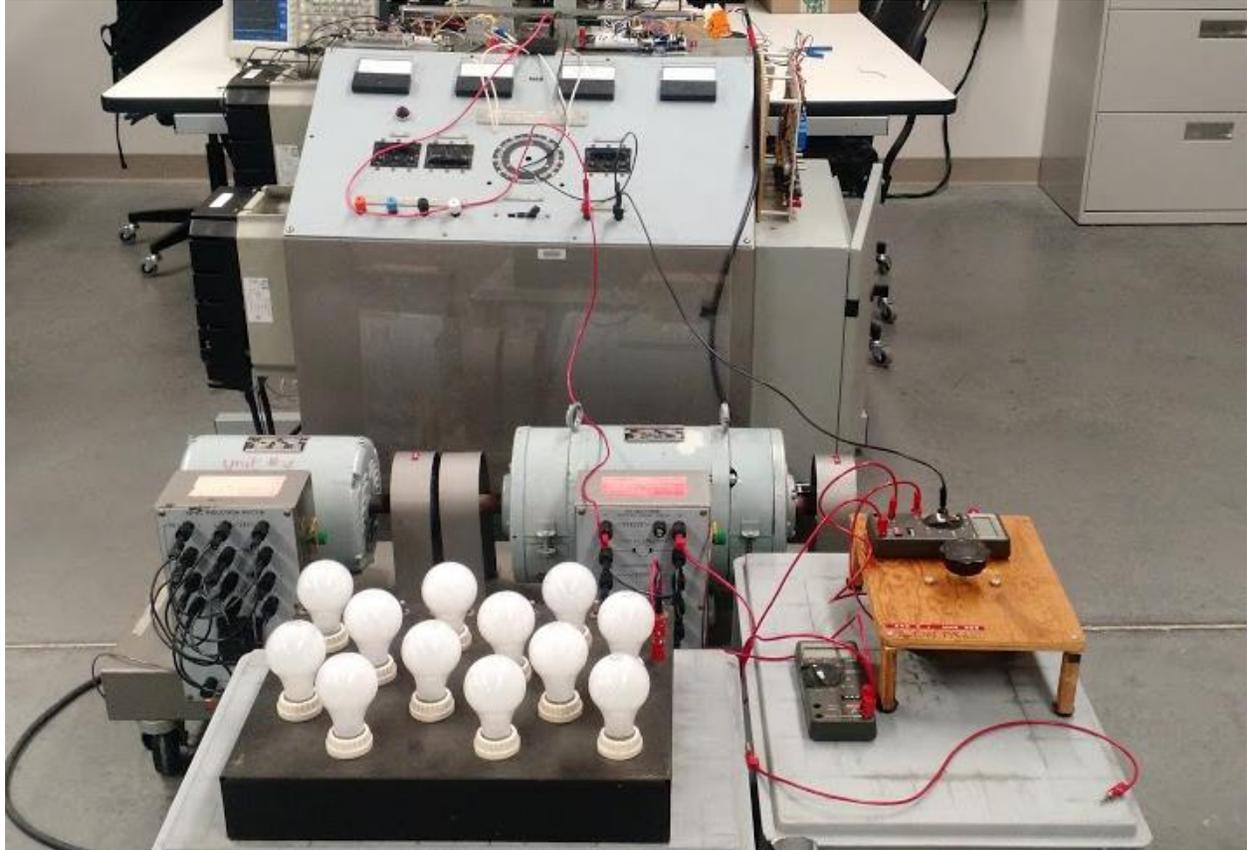


Figure 25: Hardware setup