

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS E
PROCESSOS INDUSTRIAIS – MESTRADO
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO DE CONTROLE DE PROCESSOS INDUSTRIAIS**

Imar de Souza Soares Junior

**DESENVOLVIMENTO DE TURBINA PARA REAPROVEITAMENTO DE ENERGIA
ELÉTRICA EM TUBULAÇÕES DE AR**

Santa Cruz do Sul

2014

UNIVERSIDADE DE SANTA CRUZ DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO SISTEMAS E
PROCESSOS INDUSTRIAIS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**DESENVOLVIMENTO DE TURBINA PARA REAPROVEITAMENTO DE ENERGIA
ELÉTRICA EM TUBULAÇÕES DE AR**

IMAR DE SOUZA SOARES JUNIOR

ORIENTADOR: Prof. Dr. Leonel Pablo Tedesco

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Adilson Ben da Costa

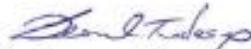
SANTA CRUZ DO SUL

2014

Imar de Souza Soares Júnior

DESENVOLVIMENTO DE TURBINA PARA REAPROVEITAMENTO DE ENERGIA
ELÉTRICA EM TUBULAÇÕES DE AR

Esta Dissertação foi submetida ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas e Processos Industriais – Mestrado – Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Sistemas e Processos Industriais.



Dr. Leonel Pablo Tedesco
Professor Orientador



Dr. Adilson Ben da Costa
Professor Coorientador



Dr. Rolf Fredi Molz
Examinador - UNISC



Dr. Ademair Michels
Examinador - FAHOR

Dedico este trabalho a todo pesquisador que almeja alcançar realizações maiores do que o próprio destino possivelmente reservou, fazendo com que seu trabalho sirva de inspiração e motivação a quem necessite deste alimento para o corpo e para o espírito.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família, em especial, avó, que deixou saudades quando partiu e a amada esposa, pelos dias em que suportaram o mau humor advindo das dificuldades enfrentadas no trabalho e fazem de minha existência um motivo para seguir em frente.

Agradeço aos meus amigos por me fazerem enxergar além do horizonte de dificuldades e perceber que a vida pode ser tão interessante quanto queiramos que ela seja, bastando encarar os desafios e superá-los, um a um, no tempo correto.

E, por fim mas não menos importante, agradeço a Deus por, constantemente, ensinar-nos a ter fé e suportarmos os dias difíceis sabendo que melhores sempre surgem quando mais precisamos.

"Se te contentas com os frutos ainda verdes,
toma-os, leva-os, quantos quiseres.
Se o que desejas, no entanto, são os mais saborosos,
maduros, bonitos e suculentos, deverás ter paciência.
Senta-te sem ansiedades.
Acalma-te, ama, perdoa,
renuncia, medita e guarda silêncio.
Aguarda.
Os frutos vão amadurecer."

Prof. Hermógenes

RESUMO

O consumo de energia proveniente de processos industriais cada vez mais automatizados, somados a demanda de energia necessária para atender grandes centros urbanos, impulsiona a sociedade e órgãos públicos a exigirem de empresas soluções que contribuam para minimizarem o impacto causado ao ambiente pelos modelos atuais de produção, seja em forma de pesquisa científica, seja, em caráter de desenvolvimento de tecnologias ambientalmente sustentáveis. Apoiado por estas considerações e, concomitante a descrição dos principais tipos de turbinas hidráulicas e eólicas utilizadas para a geração de energia elétrica e que serviram como base para a concepção do protótipo, foi desenvolvido o projeto de um modelo de turbina eólica para posteriormente ser confeccionada e ensaiada. Este equipamento possui como finalidade principal o de reaproveitar a energia desperdiçada em sistemas de ventilação ou de geração de vácuo. De forma a atingir os objetivos propostos, foi utilizado um equipamento denominado de impressora 3-D que permitirá a confecção dos elementos que servirão como base para a construção da turbina. Logo após esta etapa, utilizando de instrumentos de precisão eletrônicos que permitam mensurar parâmetros como velocidade do vento e pressão estática e dinâmica, foi analisado o comportamento da turbina para, posteriormente, analisar a eficiência da mesma. Após os ensaios e utilizando de cálculos específicos foi estimado a eficiência da turbina, obtendo valores de reaproveitamento energético da ordem de 34,81% e perda de carga de 12,75%, servindo como referências para análise de custo/benefício e contribuindo para a implantação de uma cultura focada na sustentabilidade.

Palavras-chave: Reaproveitamento de energia, turbina eólica, perda de carga.

ABSTRACT

The energy consumption from increasingly automated industrial processes in addition to the power required to meet major urban centers, drives the society and public agencies to require business solutions that contribute to minimize the environmental impact caused by current production models, whether in the form of scientific research or in character development of environmentally friendly technologies. Backed by these considerations, and the concomitant description of the main types of hydraulic and wind used to generate electricity and that served as the basis for the design of the prototype turbine was developed to design a model wind turbine to be manufactured and subsequently tested. This equipment has the main purpose of reusing the wasted energy in ventilation or vacuum generation systems. To achieve the proposed objectives, we use a device called a 3 - D printer that will allow the fabrication of the elements that serve as the basis for the construction of the turbine. Shortly after this step, using precision electronic instruments that allow measuring parameters such as wind speed and static pressure and dynamic was analyze the behavior of the turbine to subsequently analyze the efficiency of the same. After testing and using specific calculations was estimated turbine efficiency, obtaining values of energy reuse of approximately 34.81% and pressure drop of 12.75%, as references to assess the cost / benefit and contributing to implement a culture focused on sustainability.

Keywords: Reuse of energy, wind turbine, loss of pressure.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Investimentos do BNDES em energia eólica no país entre 2005 e 2011 ..	18
Figura 2 - Mapa de geração de energia eólica e valores previstos para 2014 no Brasil	20
Figura 3 - Potência eólica instalada acumulada por ano no mundo	20
Figura 4 – Perfil de velocidades de deslocamento do ar em tubulações.....	26
Figura 5 – Experimento realizado para comprovar a existência de vácuo de Otton Guerick.....	35
Figura 6 - Aplicação dos tipos de turbinas hidráulicas	40
Figura 7 - Variação de uma roda d'água	40
Figura 8 - Esquemático de funcionamento de roda d'água	38
Figura 9 - Roda d'água do tipo sobre axial.....	42
Figura 10 - Roda d'água do tipo sub axial	43
Figura 11 - Turbina Pelton.....	44
Figura 12 - Turbina Pelton em operação.....	44
Figura 13 - Turbina Pelton e bico injetor	45
Figura 14 - Rotor turbina do tipo Francis.....	46
Figura 15 - Rotor de turbina do tipo Kaplan	47
Figura 16 - Turbina do tipo Darrieus.....	49
Figura 17 - Turbina eólica do tipo Savonius	50
Figura 18 - Turbina Tripás	51
Figura 19 - Campo de aplicação de turbinas relacionando vazão e altura de queda	52
Figura 20 - Campo de aplicação de compressores relacionando a vazão e pressão	53
Figura 21 - Ciclo PDCA utilizado para orientar as etapas do projeto	56
Figura 22 - Ciclo PDCA com as atividades desenvolvidas em cada etapa	58
Figura 23 - Estrutura utilizada em ensaio da turbina	59
Figura 24 - Perspectiva isométrica do protótipo da turbina projetada	61
Figura 25 - Perspectiva isométrica da estrutura externa da turbina projetada	62
Figura 26 - Perspectiva isométrica da carcaça do rotor da turbina	62
Figura 27 - Perspectiva isométrica da engrenagem central	63
Figura 28 - Perfil de pá da turbina impressa.....	63
Figura 29 - Rolamento de esferas com dupla proteção.....	64
Figura 30 - Vista explodida da turbina projetada	65

Figura 31 - Máquina de impressão 3-D utilizada para fabricação da turbina	68
Figura 32 - Turbina Fabricada em impressora 3-D.....	69
Figura 33 - Tubulação e exaustor posicionados para ensaio	69
Figura 34 - Tubulação, exaustor e tubo de pitot posicionados para ensaio	70
Figura 35 - Tubo de Pitot utilizado para medir a variação de pressão no sistema	70
Figura 36 - Relação entre a pressão dinâmica e a relativa sem turbina.....	71
Figura 37 - Suporte da turbina instalada no final da tubulação	72
Figura 38 - Relação entre pressão dinâmica e relativa com a turbina no final da tubulação.....	73
Figura 39 - Relação entre pressão dinâmica e relativa com tubulação posterior a turbina	74
Figura 40 - Relação entre as diferentes posições da turbina ensaída.....	74
Figura 41 - Rendimento (C_p) em função do modelo da turbina.....	76

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Dados obtidos em ensaio sem a presença da turbina.....	71
Quadro 2 - Dados obtidos com turbina no centro da tubulação	72
Quadro 3 - Ensaio realizado com tubulação posterior a turbina.....	73

LISTA DE ABREVIATURAS

3-D	3 dimensões
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CAD	Desenho Assistido por Computador
PDCA	Ferramenta da Qualidade que segue a metodologia: planejar, fazer, checar e agir
PVC	Policloreto de Polivinila
UNISC	Universidade de Santa Cruz do Sul

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1 Tema.....	21
1.2 Hipótese	21
1.3 Justificativa	21
2. OBJETIVOS	23
2.1 Objetivo Geral.....	23
2.2 Objetivos específicos	23
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
3.1 Conceituação.....	24
3.1.1 Perda de Carga:	25
3.1.2 Escoamento de Fluidos:.....	29
3.1.3 Número de Reynolds:	30
3.1.4 Viscosidade:.....	31
3.1.5 Densidade:.....	32
3.1.6 Potência Eólica em Turbinas:	33
3.1.7 Geração de Vácuo:	34
3.2 Histórico da Utilização da Energia Eólica	35
3.3 Máquinas de Fluxo Geradoras	38
3.4 Conceitos Relativos a Turbinas	38
3.4.1 Turbinas Hidráulicas.....	38
3.4.1.1 Roda d'água:	39
3.4.1.2 Sobre Axial:.....	42
3.4.1.3 Sub Axial:	42
3.4.1.4 Pelton:	44
3.4.1.5 Francis:.....	45

3.4.1.6	Kaplan:	46
3.4.2	Turbinas Eólicas	47
3.4.2.1	Darrieus:	48
3.4.2.2	Savonius:	49
3.4.2.3	Hélice (Multipás):	50
3.5	Tubulações Industriais	54
4.	METODOLOGIA	55
4.1	Procedimentos Metodológicos	55
4.1.1	Etapa 1 – Planejamento	56
4.1.2	Etapa 2 – Fabricação	57
4.1.3	Etapa 3 – Verificação	57
4.1.4	Etapa 4 – Ensaios	58
5.	PROJETO PROPOSTO	59
5.1	Materiais e equipamentos	59
5.2	Procedimento de Fabricação	60
5.2.1	Protótipo da Turbina Eólica	60
5.2.1.1	Projeto em CAD	61
5.2.2	Procedimentos de Montagem	66
6.	Ensaios em Laboratório e resultados obtidos	67
7.	CONCLUSÃO	80
	REFERÊNCIAS	81
	APÊNDICE A - Montagem	86
	APÊNDICE B – Suporte Superior	87
	APÊNDICE C – Pino da Dobradiça	88
	APÊNDICE D – Suporte Inferior	89
	APÊNDICE E – Tubo de Ar	90
	APÊNDICE F - Rotor	91

APÊNDICE G – Anel de Fixação dos Rolamentos	92
APÊNDICE H – Tampa Superior	93
APÊNDICE I - Polia	94

1. INTRODUÇÃO

O consumo de energia proveniente de processos industriais cada vez mais automatizados, somados a demanda de energia necessária para atender grandes centros urbanos, impulsiona a sociedade e órgãos públicos a exigirem de empresas soluções que contribuam para minimizarem o impacto causado ao ambiente, podendo ser através de novos modelos de produção, seja em forma de pesquisa científica, seja em caráter de desenvolvimento de tecnologias ambientalmente sustentáveis. Eventuais ameaças de apagões ou de políticas de racionamento de energia põem à prova todo um sistema de geração, distribuição e fornecimento, bem como a capacidade industrial para encontrar meios de contornar estes problemas através de soluções criativas e sem comprometimento do ecossistema.

De acordo com Sguarezi *et al.* (2012), os diferentes sistemas geração de energias renováveis tem atraído o interesse e esforços de vários governos ao redor do planeta em oposição a outras fontes energéticas que aumentam a emissão de CO₂ ou causam graves impactos ambientais.

Neste contexto social, político e ambiental, onde o foco está na sustentabilidade, o aproveitamento de energia eólica tem sido utilizado como alternativa para impulsionar o desenvolvimento de projetos e equipamentos capazes de prover energia a custos competitivos e servir como uma referência para outras linhas de pesquisa, como transcreve em seu trabalho Suprinyak (2009) onde cita relatos históricos das descobertas relacionadas ao ar e suas propriedades que, oportunamente, definiram marcos históricos para a evolução do conhecimento relacionado a este tema, abrindo caminhos para inúmeras outras descobertas.

Caleffi (2003) observa que por muitos séculos a humanidade não teve avanços significativos na área de geração de energia associada ao ar. Em meados do século XVII, em meio a revolução industrial, com as descobertas de pensadores e cientistas como Galileu Galilei, Otto Von Guericke, Robert Boyle, Francis Bacon e outros, que passaram a observar as leis naturais sobre compressão e expansão dos gases. Na história da ciência, Gottfried Wilhelm Leibniz, Christian Huygens, Denis Papin e Thomas Newcomen são considerados os pais da Física Experimental, pois suas pesquisas baseadas em metodologias que deram início ao modelo atual de procedimentos adotados no meio científico, nortearam, a partir de suas épocas, as

ações dos demais cientistas e pesquisadores. No que se refere ao estudo do ar e dos fenômenos físicos que o cercam, Denis Papin e Thomas Newcomen consideravam a pressão atmosférica como uma força considerável contra os efeitos do vácuo, o que era objeto das Ciências Naturais, Filosóficas e da Especulação Teológica desde Aristóteles até o final da época Escolástica. Encerrando esse período histórico, encontra-se Evangelista Torricelli, o inventor do barômetro. Com a invenção da máquina a vapor de Watt, tem início a era da máquina. No decorrer dos séculos, desenvolveram-se várias maneiras de aplicação do ar, desenvolvendo-se pesquisas que resultaram em novas descobertas e impulsionaram o desenvolvimento tecnológico desta área.

Nas últimas décadas a energia eólica, ou seja, a energia oriunda das correntes de ar, vem surgindo como importante alternativa econômica para suprir parte do déficit energético que tem se evidenciado entre consumidores e fornecedores, bem como a necessidade de desenvolvimento de fontes renováveis de energia que não comprometam o ecossistema de uma região. Contribuem de forma significativa para estas pesquisas acordos internacionais objetivando a redução na emissão de poluentes na atmosfera firmados entre países com grande representação no cenário mundial e focados no tema sustentabilidade.

De acordo com (Barbieri, 2007), citado por Nascimento, Mendonça e Cunha (2012), as matrizes energéticas utilizam de forma acentuada os combustíveis fósseis e minerais há muitas décadas, fazendo com que este padrão de produção e consumo interfiram diretamente no meio ambiente. (Goldemberg e Lucon, 2007) relacionam o consumo desenfreado de recursos naturais com as emissões de poluentes na atmosfera e, com isto, ocasionando o denominado efeito estufa.

Procurando nortear alguns dos principais encontros e acordos internacionais, serão destacados os que tiveram significado expressivo para traçar o desenvolvimento sustentável a nível mundial, baseando-se em relatos de (Melo Neto e Froés, 2001) foram o relatório de Brundtland. Documento que recebeu o nome de “Nosso Futuro Comum” e publicado em 1987, tendo sido criado pelas Nações Unidas para discutir e propor meios de harmonizar dois objetivos: o desenvolvimento econômico e a conservação ambiental.

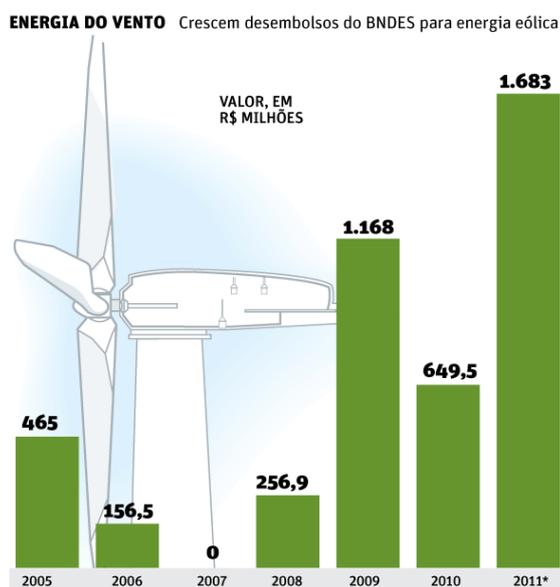
Também é possível citar a Eco-92, sendo esta uma conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e o Desenvolvimento, realizada em junho de 1992 no Rio de Janeiro. Resultou no documento conhecido como Agenda 21, em que se

estabeleceu a importância de cada país se comprometer a refletir, global e localmente, sobre a forma pela qual os governos, empresas, organizações não governamentais e todos os setores da sociedade poderiam cooperar no estudo de soluções para os problemas socioambientais.

O protocolo de Kyoto foi um encontro realizado em 1997 com o objetivo de firmar acordos e discussões internacionais para estabelecer metas que venham reduzir a emissão de gases que favoreçam a geração do efeito estufa na atmosfera, principalmente por parte dos países industrializados, além de criar formas de desenvolvimento de maneira menos impactante àqueles países em pleno desenvolvimento.

A reportagem “*Modelagem de Usinas Eólicas para Estudos de Confiabilidade*” elaborada por Leite, Borges e Falcão (2006), publicada em revista de circulação no meio técnico (Controle e Automação, 2006) expõe considerações a respeito da energia eólica, classificando a mesma como uma das fontes alternativas de energia com exploração mais bem sucedida atualmente, o que pode ser observado pelas Figura 1.

Figura 1 - Investimentos do BNDES em energia eólica no país entre 2005 e 2011



Fonte: Adaptado de (Skyscrapercity, 2013).

A mesma reportagem define que uma razão para este fato é a política de incentivo feita por vários países, assegurando a compra da energia eólica produzida, ainda que ela não ofereça preços competitivos. A Alemanha e a Dinamarca foram pioneiras neste procedimento, seguido por vários países, inclusive pelo Brasil, com a

criação do PROINFA (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica). Além disso, pode-se destacar o avanço tecnológico, tanto em pesquisa quanto em desenvolvimento, fazendo com que ocorra uma rápida redução no custo de utilização desta forma de geração.

Martins *et al.* (2008) cita que a conversão da energia cinética dos ventos em energia mecânica vem sendo utilizada pela humanidade há mais de 3000 anos. Os moinhos de vento utilizados para moagem de grãos e bombeamento de água em atividades agrícolas foram as primeiras aplicações da energia eólica. O desenvolvimento da navegação e o período das grandes descobertas de novos continentes foram propiciados em grande parte pelo emprego da energia dos ventos. Empresas que trabalham com transporte de produtos via “geração de vácuo” são acometidas do baixo rendimento em seu processo devido à eficiência destes equipamentos.

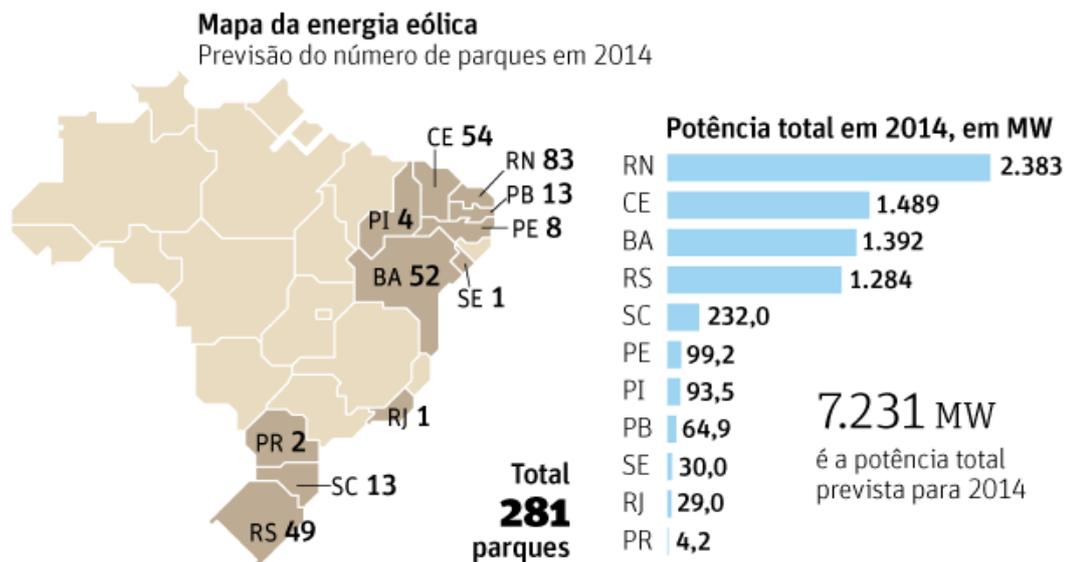
A análise da eficiência energética de grandes geradores de vácuo nos remete para cálculos relacionados a perdas de carga oriundas do transporte de fluido que ocorre na tubulação, possibilitando a definição de valores quantitativos que servirão para fundamentar projetos e adequações que objetivem minimizar estes fatores prejudiciais à eficiência, recuperando parte da energia desperdiçada. O Banco Nacional de Desenvolvimento Social – BNDES nos últimos anos, incentiva e investe na utilização de energias ditas alternativas quando comparadas as formas tradicionais de obtenção da mesma. A Figura 1 evidencia parte do montante repassado a empresas para a difusão e implantação da tecnologia eólica.

Para o ano de 2014, a estimativa de geração de energia eólica segue o apresentado na Figura 2, ressaltando a tendência de atingir mais de 7,2 GW em produção de energia.

Algumas empresas encontram na pressão de ar gerada por equipamentos de grande porte uma solução para seu processo produtivo. Tais equipamentos podem vir a ser utilizados no transporte de matéria prima ou mesmo produto final acabado, servindo como alternativa para inúmeras aplicações no contexto industrial. Analisando, por exemplo, uma empresa na área de fabricação de cigarros, este transporte auxilia na separação do caule da folha de fumo, visto que a densidade de ambos é diferente e este fato favorece a rápida segregação destes elementos para compor as diferentes misturas que constituirão o produto final.

A questão a ser analisada está diretamente relacionada à possibilidade de reaproveitar, de forma a não comprometer a eficiência do processo, parte da energia liberada para o meio ambiente nas tubulações industriais que trabalham com transporte por geradores de vácuo ou ventiladores industriais. A Figura 2 apresenta uma estimativa da geração de energia eólica previstos para 2014 no Brasil.

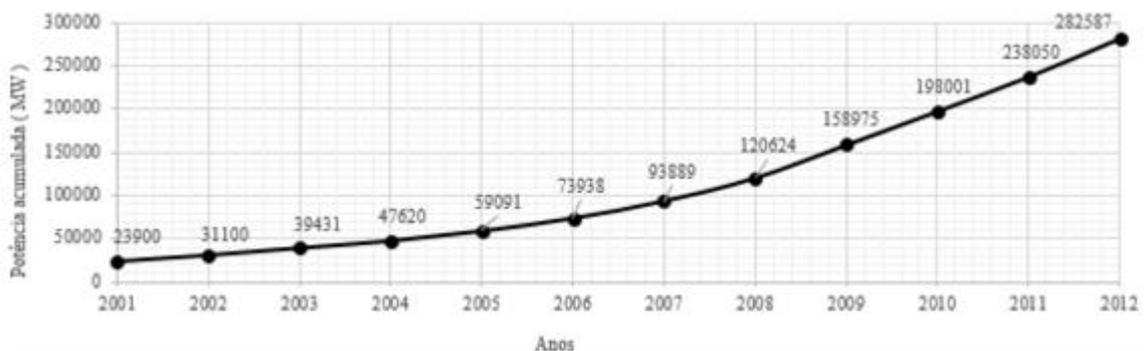
Figura 2 - Mapa de geração de energia eólica e valores previstos para 2014 no Brasil



Fonte: Adaptado de (Skyscrapercity, 2013).

Paulo (2013) apresenta a potência eólica total instalada acumulada no mundo no final de 2012. A mesma era de 282587 MW e a nível mundial, a potência eólica instalada acumulada vem subindo, conforme pode ser observado na Figura 3.

Figura 3 - Potência eólica instalada acumulada por ano no mundo



Fonte: Adaptado de (PAULO, 2013).

1.1 Tema

Estudo e fabricação de um gerador de energia eólica em dutos de ventilação forçada no meio industrial objetivando o reaproveitamento da energia gerada e mensurando o comprometimento da eficiência do mesmo através da perda de carga imposta pela mesma no sistema.

1.2 Hipótese

A hipótese deste estudo aborda os seguintes questionamentos:

É possível reaproveitar a energia excedente do processo de transporte de materiais por ar pressurizado através de uma turbina eólica especificamente projetada para este fim?

Qual será a perda de carga originada por esta turbina depois de instalada na tubulação?

1.3 Justificativa

A grande competitividade existente entre empresas de um mesmo segmento industrial impulsiona pesquisas e avanços tecnológicos, por vezes, de grande relevância para uma região, estado, ou mesmo, nação.

Diversos são os estudos desenvolvidos por pesquisadores ao redor do mundo sobre energia eólica. Alguns abordam o assunto de forma genérica, se limitando a procurar compreender o comportamento dos ventos em diversas regiões do país (GABRIEL FILHO *et al.*, 2011) enquanto outros direcionam suas pesquisas para o desenvolvimento de novos modelos de turbinas e análise de parâmetros de confiabilidade de usinas eólicas (LEITE *et al.*, 2006).

Todavia, dentre os estudos relacionados a esta área, poucos são os direcionados para aplicações da energia eólica em ambientes industriais, muito devido a forma de armazenamento da energia estar limitada tecnicamente a características técnicas dos acumuladores de energia.

A busca por formas criativas e ecologicamente sustentáveis de reduzir o valor gasto em energia permeiam o cotidiano da pesquisa e da inovação em novas tecnologias, abrindo portas para um promissor campo de estudos. Esta Dissertação apresenta o dimensionamento, fabricação e ensaio de um protótipo de turbina eólica capaz de reaproveitar parte do excedente da energia dissipada por equipamentos que desenvolvem grandes vazões de ar em tubulações industriais.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Este trabalho objetiva desenvolver um estudo dos principais perfis de turbinas hidráulicas e eólicas utilizados para a geração de energia elétrica e propor um protótipo que possibilite o reaproveitamento da energia excedente oriunda do processo de transporte de materiais por meio de ar pressurizado, com o mínimo de perda na eficiência do equipamento.

2.2 Objetivos específicos

- Realizar revisão bibliográfica de conceitos relacionados a desempenho de turbinas hidráulicas e eólicas, bem como do comportamento dos fluídos em tubulações;
- Estudar modelo de turbina viável de ser confeccionado e compatível com sua aplicação;
- Modelar, através de software CAD, perfil das pás e de turbina, de acordo com projeto elaborado;
- Imprimir protótipo em poliuretano utilizando tecnologia de impressão 3-D;
- Avaliar o comportamento do modelo e levantar dados de sua funcionalidade;

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão de literatura abordada nesta pesquisa está dividida em tópicos. Inicia-se esta revisão com uma breve conceituação acerca do foco dado a este projeto, passando a seguir para um breve histórico da evolução da pesquisa sobre energia eólica nas últimas décadas. Na sequência o enfoque será direcionado para o estudo sobre máquinas de fluxo geradoras onde serão revisados alguns dos principais conceitos físicos e matemáticos, conceitos relativos a turbinas eólicas e hidráulicas e estudo sobre perdas de carga em tubulações que sustentarão a base teórica do projeto de uma turbina que satisfaça o proposto por este trabalho.

3.1 Conceituação

De acordo com Henn (2010), há séculos o homem tem buscado controlar a natureza, seja através do simples ato de carregar água através de baldes ou conchas ou mesmo através do desenvolvimento de rodas d'água. Atualmente podemos afirmar que utilizamos de várias máquinas de fluxo para obtenção da energia necessária para a manutenção de nosso modo de vida.

Martins *et al.* (2008) definem vento como sendo o movimento de parcelas de ar na atmosfera planetária, especificamente, a parcela de vento que se desloca em direção horizontal, paralelo a superfície do planeta e não a componente vertical, que pouco influencia na geração de energia.

Segundo Nascimento *et al.* (2012) as fontes eólicas estão entre as que produzem reduzidos impactos a natureza, além de despontarem como uma das mais interessantes formas de obtenção de energia no que se refere a produção, segurança de fornecimento e sustentabilidade ambiental. Martins *et al.* (2008), citados por Nascimento *et al.* (2012) complementam justificando o investimento em parques eólicos na crença de que os avanços tecnológicos do setor e a crescente demanda por esse tipo de energia também tem gerado implicações socioeconômicas.

Brasil (2006) observa que em um dia típico, obtem-se água pressurizada de uma torneira, utilizase secadores de cabelos, dirigem-se carros nos quais máquinas de fluxo operam os sistemas de lubrificação, refrigeração e direção, e trabalha-se em ambientes providos de circulação de ar.

Com o propósito de introduzir alguns dos principais conceitos necessários para uma melhor compreensão dos fenômenos físicos que cercam o universo das máquinas de fluxo e, em específico as relacionadas a turbinas eólicas, são abordados na sequência o significado de alguns termos técnicos utilizados neste meio.

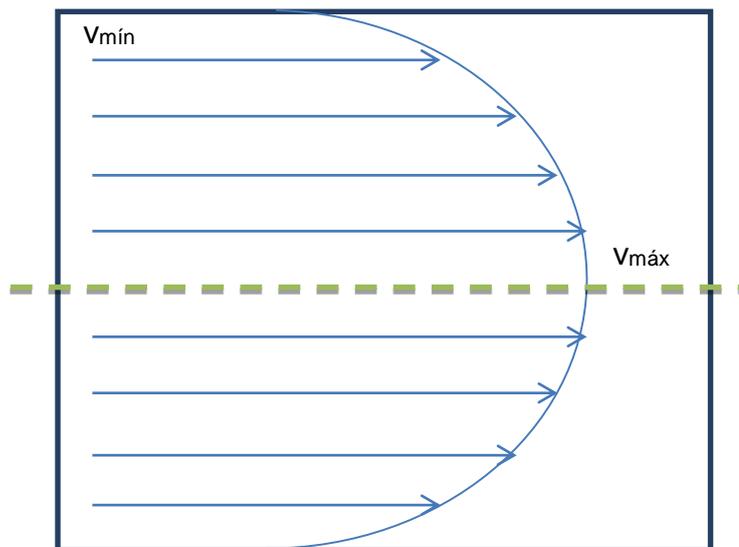
3.1.1 Perda de Carga:

Martins *et al.* (2008) observa que todo fluido em movimento sofre ações de fricções internas que resistem ao seu escoamento, comumente denominadas de força de atrito. A rugosidade de uma superfície ocasiona a redução da velocidade do ar e pode fazer com que o vento se desloque de forma paralela as paredes de uma tubulação.

O deslocamento de um fluido em uma tubulação gera, principalmente devido ao atrito existente entre as partículas do mesmo entre si e deste para com as paredes em contato do duto, aquecimento e vibração. Se for analisado o comportamento de um fluido sem levar em consideração o atrito existente entre o mesmo e as paredes de uma tubulação, visualizaríamos o mesmo se deslocando de forma homogênea, mas como o mesmo acaba tendo seu movimento resistido pela superfície interna da tubulação, é necessário direcionar mais energia para que o fluido se mova. Sem energia, a tendência do fluido será a de permanecer em repouso. Desta maneira, a perda de carga (perda de energia) que o fluido sofre é consequência direta da viscosidade do mesmo e do acabamento interno da tubulação.

Outra importante consequência desta análise é a formação de um “perfil” de velocidades ao longo da seção transversal, conforme a Figura 4, pois, se o fluido tem velocidade zero junto às paredes, deverá ter máxima velocidade no centro da tubulação.

Figura 4 – Perfil de velocidades de deslocamento do ar em tubulações



Fonte: Adaptado de Henn (2006).

Durante o escoamento do fluido através de um duto, ocorre uma perda de pressão (mais comumente denominada de “perda de carga”) que é devido a vários fatores.

Para encontrarmos, através de cálculos, o valor da perda de carga em uma tubulação onde escoar fluido é muito comum utilizarmos-nos da equação de Darcy-Weisbach (VON BERNUTH, 1988; BAGARELLO *et al.*, 1995; SONNAD e GOUDAR, 2006), expressa pela Equação (1):

$$hf = f \cdot \frac{L \cdot V_0^2}{d \cdot 2 \cdot g} \quad (1)$$

Onde:

hf – Perda de carga [m];

f – fator de fricção (atrito), dependente do n° de Reynolds e da aspereza da tubulação;

L – Comprimento total da linha ($L = L_1 + L_2$) [m];

L₁ – Comprimento retilíneo [m];

L₂ – Comprimento equivalente [m];

d – Diâmetro interno da tubulação [m];

g – Aceleração da gravidade [m/s²];

Na equação (1) temos no fator de fricção como sendo um dos dados e, conseqüentemente, trazendo informações mais importantes em um projeto hidráulico. Historicamente tivemos grandes contribuições nesta área da ciência no século XIX, conforme apresentado por Cardoso, Frizzone e Rezende (2008), sendo citados em diversos trabalhos científicos e acadêmicos como, por exemplo, o trabalho de Yoo e Singh (2005). Na equação de Darcy-Weisbach, conhecer o fator de atrito é essencial para conhecermos as perdas envolvidas em um processo de transmissão de energia hidráulica. Ele é responsável por acrescentar ao modelo matemático os conceitos relativos a resistência gerada pelas paredes do duto ao escoamento do fluido.

O fator “f” pode ser estimado através do diagrama de Mood ou, considerando-se regime laminar, pela Equação (2):

$$f = \frac{X}{Re} \quad (2)$$

Onde:

f – fator de fricção (atrito), dependente do n° de Reynolds e da aspereza da tubulação;

X – Constante que depende do tipo de tubulação e pode assumir os seguintes valores:

64 → para tubos rígidos e temperatura constante;

75 → para tubos rígidos e temperatura variável (ou vice-versa);

90 → para tubos flexíveis e temperatura variável.

R - N° de Reynolds, que pode ser calculado pela Equação (3):

$$Re = \frac{v.d}{\nu} \quad (3)$$

Onde:

Re – N° de Reynolds [adimensional];

v – velocidade de escoamento do fluido [m/s];

d – Diâmetro interno da tubulação [m];

ν – Viscosidade cinemática [m²/s];

Em um meio de transmissão de fluido gasoso, a Equação (1) assume a forma da Equação (4):

$$\Delta P = \frac{10^2 \cdot 1,663785 \cdot Q^{1,85} \cdot L}{d^5 \cdot P} \quad (4)$$

Onde:

ΔP – Perda de carga [bar];

Q – Vazão de fluido na tubulação [m³/h];

L – Comprimento total da linha ($L = L_1 + L_2$) [m];

L_1 – Comprimento retilíneo [m];

L_2 – Comprimento equivalente [m];

d – Diâmetro interno da tubulação [mm];

P – Pressão de regime [bar];

Desta forma, é possível estimar, teoricamente, a perda de pressão que um determinado equipamento pode vir a estar sujeito e, conhecendo estes valores podemos vir a especificar melhor os elementos de geração e transporte de fluido, minimizando os desperdícios e aumentando a eficiência do equipamento.

O cálculo das perdas envolvidas em um processo de geração de energia e transporte de fluido é imprescindível para podermos trabalhar com a eficiência que os atuais projetos exigem e tornam-se, muitas vezes, obstáculos para atingirmos a eficácia esperada dos profissionais que necessitam calcular ou estimar os diversos parâmetros envolvidos, por muitas vezes, em simples sistemas de transmissão de energia, como, por exemplo, um sistema de poço artesiano e a retirada da água do mesmo e elevação até uma residência.

Em projetos hidráulicos ou pneumáticos sustentados por cálculos embasados em fundamentos teóricos já comprovados cientificamente, pode-se garantir segurança, longevidade e eficiência ao sistema desenvolvido, resultando, por fim, em sustentabilidade econômica.

3.1.2 Escoamento de Fluidos:

Vertchenko *et al.* (2009) registram que a dinâmica dos fluidos é um dos ramos mais antigos da física, marcando sua importância histórica no século XVIII com Leonhard Euler e Daniel Bernoulli.

Tiedemann (1998) conceituou os estados físicos através das forças de atração e repulsão entre as moléculas de uma substância e a energia existente entre elas. No estado sólido as moléculas mantem-se unidas pelo efeito cooperativo de várias moléculas, enquanto em um líquido ou gás podemos considerar forças de interação bimolecular, ou seja, entre duas moléculas, apenas.

Zechim (2009) relatou, ainda, que na natureza, a matéria apresenta-se nos estados sólido, líquido ou gasoso. Nos estados líquido ou gasoso, a matéria é denominada fluido. Um fluido pode ser definido como toda e qualquer substância capaz de assumir a forma do recipiente que a contém, e, desta maneira, podemos caracterizá-lo como substâncias que encontram-se no estado líquido ou gasoso.

De acordo com Martins *et al.* (2004) em uma tubulação, onde a pressão é diferente da atmosférica, seja ela hidráulica ou pneumática, pode se denominar o fluxo de fluido como sendo o escoamento sob pressão ou escoamento em condutos forçados. Também é possível definir os regimes de escoamento de um fluido de três formas distintas: em regime turbulento, turbulento liso (transitório) ou em regime laminar. O regime turbulento pode ser caracterizado pelo movimento caótico e desordenado das partículas do fluido, causando grande agitação e conseqüente atrito deste com as paredes internas do duto e entre suas partículas. O regime laminar pode ser caracterizado como um movimento suave e ordenado, com mínimas perdas decorrentes do contato direto do fluido com a tubulação, sendo, normalmente, o objetivo a ser alcançado em um projeto que envolva a geração, distribuição e consumo da energia oriunda de substâncias líquidas ou gasosas. O regime chamado de turbulento liso ou transitório pode ser considerado um estado intermediário entre os dois comentados acima. Em alguns momentos o fluido possui comportamento laminar e em outros momentos possui comportamento turbulento, tornando esta condição pouco favorável em um projeto, pois além das perdas de carga originadas, a turbulência que, em alguns momentos surge, pode ser reduzir significativamente a vida útil do equipamento.

3.1.3 Número de Reynolds:

Vertchenko *et al.* (2009) postularam que o número de Reynolds é definido como sendo uma razão adimensional entre as forças de inércia e as forças viscosas que atuam durante o escoamento de um fluido.

Já Vasconcelos (2013) conceituou o número de Reynolds como sendo um número adimensional usado em mecânica dos fluidos definido pelo engenheiro hidráulico e físico Irlandês Osborne Reynolds (1842 - 1912) no final do século XIX. Sua determinação torna-se importante na escolha do melhor perfil aerodinâmico, uma vez que a eficiência na geração de sustentação e arrasto está intimamente relacionada a este elemento. Para fluidos gasosos como, por exemplo, na aeronáutica, o Número de Reynolds define o comportamento do fluido em laminar se ficar abaixo de 2×10^5 e turbulento se ficar acima de 5×10^5 .

Inicialmente este número foi definido para fluidos líquidos e pode ser calculado através da Equação (5):

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \quad (5)$$

Onde:

Re – Número de Reynolds [adimensional];

ρ – Massa específica do fluido [kg/m^3];

v – Velocidade média do fluido [m/s];

D – Diâmetro interno da tubulação [m];

μ – Viscosidade dinâmica do fluido [$\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$];

Posteriormente, este conceito pode ser estendido a fluidos gasosos, sendo utilizado em larga escala na aeronáutica e marinha, servindo como parâmetro fundamental para prever o comportamento aerodinâmico ao qual estarão sujeitos os diferentes projetos antes mesmo de os fabricarmos. O cálculo do Número de Reynolds para fluidos gasosos pode ser observado pela Equação (6):

(6)

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot c}{\mu}$$

Onde:

Re – Número de Reynolds [adimensional];

ρ – Massa específica do fluido [kg/m^3];

v – Velocidade média do fluido [m/s];

c – Corda média aerodinâmica do perfil [m];

μ – Viscosidade dinâmica do fluido [kg/m.s];

3.1.4 Viscosidade:

Chopard e Droz (1998) definiram a viscosidade como a tensão que acontece entre duas camadas de fluido que possuem movimento relativo entre si com velocidades diferentes. Fluidos mais viscosos produzem uma força de arrasto maior e fluidos menos viscosos possuem forças de arrasto fracas ou mesmo inexistentes.

É possível definirmos viscosidade de outras formas, como, por exemplo, sendo a resistência ao escoamento de um fluido, que está intimamente relacionada ao atrito existente entre as partículas deste e as paredes da tubulação que o conduzem. Outra maneira de ser conceituada a viscosidade é relacionando a mesma com a velocidade que o fluido se desloca, possuindo uma relação direta entre estes elementos e significando que a alteração em um destes fatores ocasiona variação em seu valor final. Podemos quantificar a viscosidade cinemática através da equação (7), a qual relaciona a viscosidade dinâmica com a massa específica de um fluido:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (7)$$

Onde:

ν – Viscosidade cinemática [m^2/s];

μ – Viscosidade dinâmica [kg/m.s];

ρ – Massa específica [kg/m^3];

Em líquidos, a viscosidade diminui com a temperatura, observando-se pequeno espaçamento entre as moléculas, ocorrendo, juntamente, redução da atração molecular com o aumento da temperatura. Em gases ocorre fenômeno inverso ao dos líquidos, aumentando a viscosidade em decorrência do aumento da temperatura, fazendo possível observarmos um grande espaçamento e aumento do choque entre as moléculas do fluido em questão.

A viscosidade possui grande influência na perda de carga total a qual está acometido um processo no qual ocorra o escoamento de fluido, sendo fundamental para uma análise mais eficiente dos resultados a serem obtidos em modelamentos teóricos de um sistema.

3.1.5 Densidade:

É uma propriedade importante quando analisamos as características físico-químicas de uma substância, podendo ser obtida ao relacionarmos a massa “m” com o volume “V” ocupado por esta mesma quantidade de material. A equação (8) apresenta esta relação.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (8)$$

Onde:

ρ – Densidade ou massa específica [kg/m³];

m – Massa de fluido [kg];

V – Volume de fluido [m³];

Quando falamos em densidade normalmente nos deparamos com outro conceito que é o de peso específico. Esta propriedade é encontrada através da razão entre o peso da substância em módulo e o seu volume ou simplesmente multiplicando a densidade pela aceleração da gravidade.

$$\rho_{esp} = \rho \cdot g \quad (9)$$

Onde:

ρ_{esp} – Densidade específica [N/m³];

ρ – Densidade ou massa específica [kg/m³];

g – Aceleração da gravidade [m/s²];

3.1.6 Potência Eólica em Turbinas:

Para podermos estimar a potência que pode ser obtida de uma turbina eólica, utilizamos de conceitos físicos relacionados a energia cinética e energia potencial disponibilizada pelo fluxo de ar. Agrega-se a este conceito um fator chamado Limite de Betz, que define a eficiência de determinado perfil de turbina, que, teoricamente, não ultrapassa 59,3%. Afonso (2010) conceitua o coeficiente de Betz como o máximo valor teórico de coeficiente de potência (C_p) possível de ser aproveitado por uma turbina eólica.

Desta forma, a Equação 10 apresenta uma maneira de obtermos o valor da potência possível de ser obtida utilizando uma turbina eólica.

Como desenvolver um perfil de turbina não está, diretamente, entre os objetivos deste estudo mas, todavia, interfere diretamente nos resultados, procurou-se, empiricamente, definir um modelo que melhor se adequasse as condições de ensaio, onde seria possível aproveitarmos a força de arrasto (menor torque inicial) do fluxo de ar e também a força de sustentação (maior eficiência) do mesmo.

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \cdot C_p \quad (10)$$

Onde:

P – Potência eólica disponível [W];

ρ – Densidade do fluido [kg/m³];

S – Área de varredura [m²];

v – Velocidade do fluxo de fluido [m/s];

C_p – Limite de Betz [adimensional];

3.1.7 Geração de Vácuo:

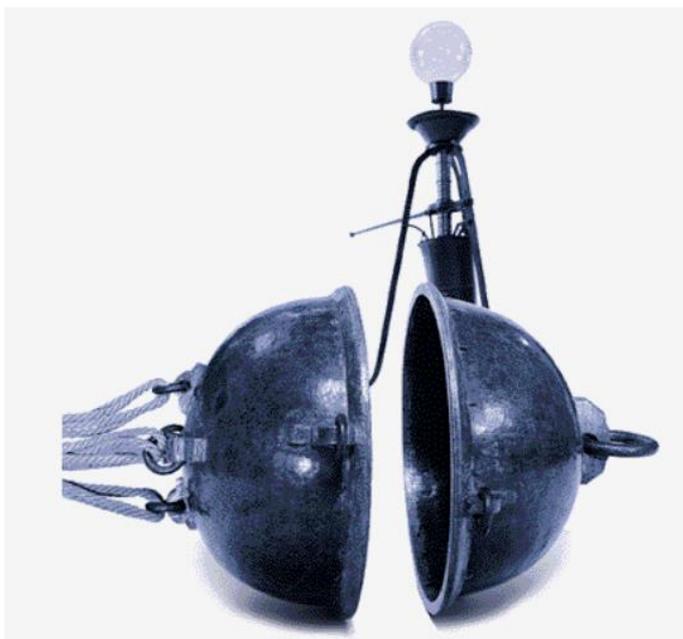
Um breve histórico descrito por Paiva (2010) elucida alguns breves relatos históricos a respeito da tecnologia do vácuo, iniciando com Aristóteles (322 – 384 aC) ao definir o vácuo como sendo o vazio ou uma espécie de espaço privado de corpo como uma impossibilidade da natureza, uma vez que filósofos e gregos antigos acreditavam na matéria como uma substância contínua (SAUNDERS & BROWN, 1991).

Paiva (2010) ainda refere-se a Aristóteles (322 – 384 aC) que postulou a idéia de existirem substâncias inalteráveis na natureza, sendo estes os quatro elementos do reino da terra (ar, terra, fogo, água) e, desta forma, afastou o conceito de vácuo por cerca de 1900 anos. Devido a esta filosofia repassada rigorosamente por Jesuítas e acadêmicos durante séculos, a percepção da variação da densidade de gases com a pressão tornou-se difícil de ser percebida.

Gasparo Berti, em 1641, construiu um barômetro de água sem êxito por não compreender os resultados obtidos (REDHEAD, 1993). Em 1643, Torricelli demonstrou a existência do fenômeno físico denominado vácuo através de seu histórico experimento utilizando um tubo contendo mercúrio e, ao emborcá-lo em um recipiente contendo o mesmo fluido, o mesmo apresentou a existência do vácuo após deslocar cerca de 760 mm da coluna de mercúrio devido a pressão atmosférica. Em 1648 Pascal e Perier (GAMA, 2002) confirmaram o experimento de Torricelli tornando este um valor utilizado até os dias atuais.

Dentre todos os acontecimentos históricos envolvendo a ciência do vácuo, um dos mais importantes foi o famoso experimento dos hemisférios de Magdeburg apresentado por Otton Von Guericke (1602 – 1686 dC), em 1654 (RYANS & ROPER, 1986). Utilizando uma rudimentar bomba de vácuo constituída por um cilindro contendo um pistão acionado manualmente por uma alavanca, Guericke reduziu a pressão existente dentro de uma esfera bi-partida (Figura 5) e selada com tiras de couro e molhadas com mistura de cera e terebentina (GAMA, 2002) e, mesmo através da força gerada por duas parelhas de oito cavalos, a esfera não foi aberta. Somente após a abertura de uma torneira de entrada de ar os hemisférios da esfera puderam ser separados e, assim, ficou comprovado a ação da força da atmosfera externa em relação a interna criada.

Figura 5 – Experimento realizado para comprovar a existência de vácuo de Otton Guerick



Fonte: Adaptado de (Física, 2013).

3.2 Histórico da Utilização da Energia Eólica

Dutra (2008) observa que o primeiro registro histórico da utilização da energia eólica para bombeamento de água e moagem de grãos através de cata-ventos é proveniente da Pérsia, por volta de 200 a.C.. Esse tipo de moinho de eixo vertical veio a se espalhar pelo mundo islâmico sendo utilizado por vários séculos. Acredita-se, todavia, que antes da invenção dos cata-ventos na Pérsia, a China (por volta de 2000 a.C.) e o Império Babilônico (por volta 1700 a.C.) já se utilizavam de cata-ventos rústicos para irrigação.

Ainda conforme Dutra (2008), em meados do século X podia ser observada a disseminação dos cata-ventos na Europa, principalmente, no retorno das Cruzadas. Os cata-ventos foram largamente utilizados e seu desenvolvimento bem documentado. As máquinas primitivas persistiram até o século XII quando começaram a ser utilizados moinhos de eixo horizontal na Inglaterra, França e Holanda, entre outros países. Os moinhos de vento de eixo horizontal do tipo “holandês” foram rapidamente disseminados em vários países da Europa.

Além do bombeamento de água, Dutra (2008) relata que os moinhos de vento na Holanda tiveram uma grande variedade de aplicações. O primeiro moinho de vento

utilizado para a produção de óleos vegetais foi construído em 1582. Com o surgimento da imprensa e o rápido crescimento da demanda por papel, foi construído, em 1586, o primeiro moinho de vento para fabricação de papel. Ao fim do século XVI, surgiram moinhos de vento para acionar serrarias para processar madeiras provenientes do Mar Báltico.

Dutra (2008) comenta que, por volta do século XIX, aproximadamente 9000 moinhos de vento existiam em pleno funcionamento na Holanda, cerca de 3000 na Bélgica, 10000 na Inglaterra e cerca de 650 na França. A utilização de cata-ventos de múltiplas pás destinados ao bombeamento d'água desenvolveu-se de forma efetiva, em diversos países, principalmente nas suas áreas rurais. Acredita-se que desde a segunda metade do século XIX mais de 6 milhões de cata-ventos já teriam sido fabricados e instalados somente nos Estados Unidos da América.

Alves (2010) cita que o início da adaptação dos cata-ventos para geração de energia elétrica teve início no final do século XIX. Em 1888, Charles F. Brush, um industrial voltado para eletrificação em campo, ergueu na cidade de Cleveland, Ohio, o primeiro catavento destinado a geração de energia elétrica. Tratava-se de um catavento que fornecia 12 kW em corrente contínua para carregamento de baterias as quais eram destinadas, sobretudo, para o fornecimento de energia para 350 lâmpadas incandescentes Brush utilizou-se da configuração de um moinho para o seu invento.

A roda principal, com 144 pás, tinha 17 metros de diâmetro em uma torre de 18m de altura. Todo o sistema era sustentado por um tubo metálico central de 36 centímetros de diâmetro que possibilitava o giro de todo o sistema acompanhando, assim, o vento predominante. Esse sistema esteve em operação por 20 anos sendo desativado em 1908. Sem dúvida, o cata-vento de Brush foi um marco na utilização dos cataventos para a geração de energia elétrica. Um dos primeiros passos para o desenvolvimento de turbinas eólicas de grande porte para aplicações elétricas foi dado na Rússia em 1931. O aerogerador Balaclava era um modelo avançado de 100 kW conectado, por uma linha de transmissão de 6,3 kV de 30 km, a uma usina termelétrica de 20 MW. Essa foi à primeira tentativa bem sucedida de se conectar um aerogerador de corrente alternada com uma usina termelétrica. A energia medida foi de 280 MWh ao longo do ano. Após o desenvolvimento desse modelo, foram projetados outros modelos mais ambiciosos de 1 MW e 5 MW (DUTRA, 2008).

A Segunda Guerra Mundial (1939-1945) contribuiu para o desenvolvimento dos aerogeradores de médio e grande porte uma vez que os países em geral

empenhavam grandes esforços no sentido de economizar combustíveis fósseis. Os Estados Unidos desenvolveram um projeto de construção do maior aerogerador até então projetado. Tratava-se do aerogerador Smith-Putnam cujo modelo apresentava 53,3 metros de diâmetro, uma torre de 33,5 metros de altura e duas pás de aço com 16 toneladas. Na geração elétrica, foi usado um gerador síncrono de 1250 kW com rotação constante de 28 rpm, que funcionava em corrente alternada, conectado diretamente à rede elétrica local. Esse aerogerador iniciou seu funcionamento em 10 de outubro de 1941, em uma colina de Vermont chamada Grandpa's Knob. Em março de 1945, após quatro anos de operação intermitente, uma das suas pás (que eram metálicas) quebrou-se por fadiga.

Durante o período entre 1955 e 1968, a Alemanha construiu e operou um aerogerador com o maior número de inovações tecnológicas na época. Os avanços tecnológicos desse modelo persistem até hoje na concepção dos modelos atuais mostrando o seu sucesso de operação. Tratava-se de um aerogerador de 34 metros de diâmetro operando com potência de 100 kW, a ventos de 8 m/s. Operou por mais de 4.000 horas entre 1957 e 1968. As pás, por serem feitas de materiais compostos, aliviaram os esforços em rolamentos diminuindo assim os problemas de fadiga (DUTRA, 2008).

Nas últimas décadas houve grandes discussões acerca de sustentabilidade energética e produção de energia limpa, focando ações no que diz respeito à minimização dos danos causados ao ecossistema de uma região e afete, indiretamente, o clima global. Estudos direcionados ao comportamento dos ventos, em regiões estratégicas ao redor do planeta, passaram a ser realizado com frequência e interesse maiores, permitindo-nos chegar a uma condição tecnológica que nos possibilite definir, com, certa precisão, os locais mais indicados para a instalação de centros de captação de energia e, por consequência, aperfeiçoar a eficiência obtida, tornando o projeto economicamente viável.

3.3 Máquinas de Fluido Geradoras

De acordo com Henn (2006), máquinas de fluido são equipamentos que trabalham com a transformação da energia de um fluido qualquer, líquido ou gasoso, em trabalho mecânico ou vice-versa.

As máquinas de fluido podem ser divididas em dois tipos básicos:

- Máquinas de fluxo: São aquelas que operam com a transformação da quantidade de movimento do fluido em trabalho, ou seja, existe sempre uma transformação intermediária para energia cinética.
- Máquinas de deslocamento positivo: São aquelas que operam diretamente a transformação de energia.

3.4 Conceitos Relativos a Turbinas

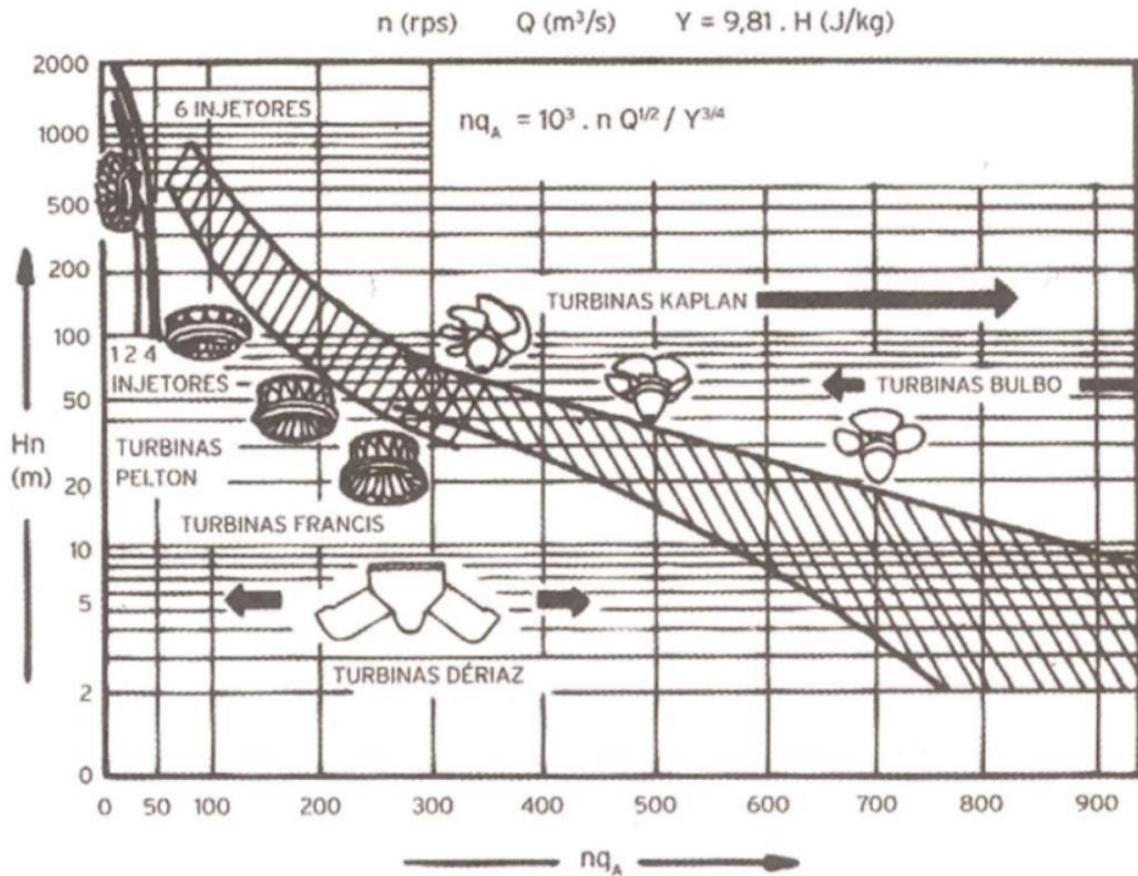
Cada modelo de turbina existente foi desenvolvida focando uma determinada aplicação. Por vezes o objetivo foi o de otimizar a geração de energia possível em se obter através de grandes vazões de fluido, em outras, através de grandes alturas manométricas (queda de fluido). O objetivo sempre será o de maximizar a relação custo/benefício na escolha de um determinado modelo de turbina, onde fatores como custo de fabricação, durabilidade e eficiência ganham destaque nesta análise.

3.4.1 Turbinas Hidráulicas

De acordo com Macintyre (1983) uma usina hidrelétrica funciona dependente do equipamentos eletromecânicos que fazem parte do grupo responsável pela geração de energia. Compreender os fenômenos físicos que permeiam o universo do comportamento dos fluidos é fator primordial para conseguirmos avançar nesta área de estudo, todavia, tais fenômenos são difíceis de serem mensurados ou mesmo previstos, visto que o número de variáveis que pode vir a compor um modelo matemático tende a ser estimada através do empirismo de especialistas e normalmente não engloba todo o universo de fenômenos que circundam o meio.

A Figura 6 apresenta um gráfico comumente utilizado para definirmos qual o melhor modelo de turbina a ser implementada em determinada condição disponível.

Figura 6 - Aplicação dos tipos de turbinas hidráulicas



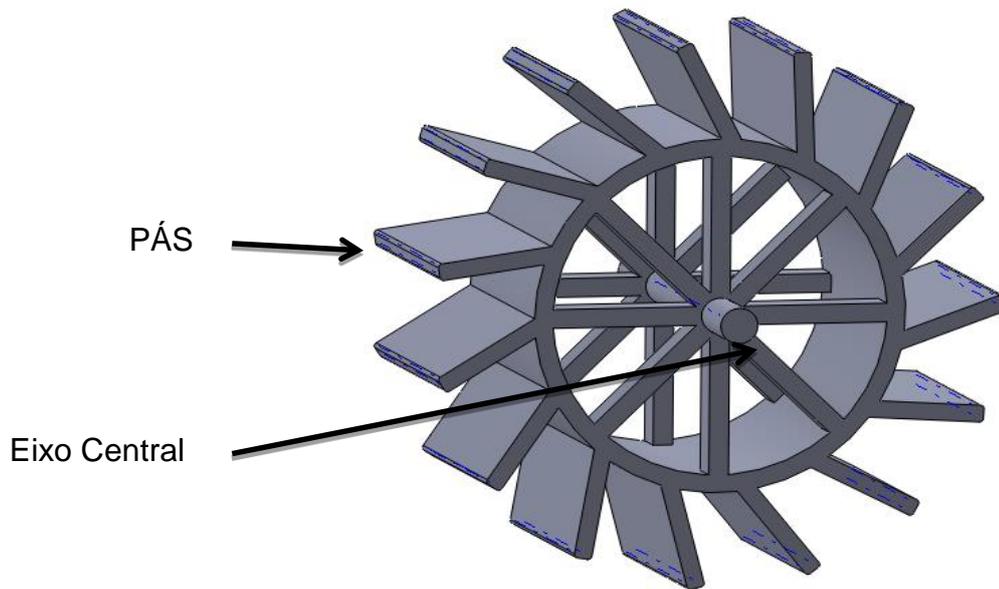
Fonte: Adaptado de (Reis, 2011).

Dentre os tipos mais comuns de turbinas utilizadas no meio hidráulico encontram-se:

3.4.1.1 Roda d'água:

Dentre as primeiras máquinas de fluxo hidráulicas, ou seja, dispositivos capazes de transformar a energia que nos é oferecida pela natureza em energia mecânica, estão as rodas d'água (Figura 7).

Figura 7 - Variação de uma roda d'água



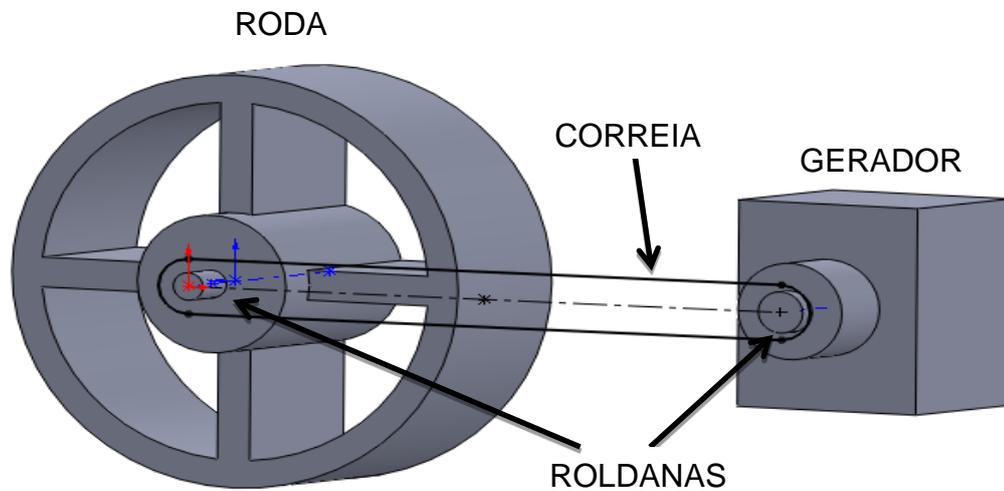
Fonte: Do Autor.

Dentre as primeiras rodas d'água da história humana que se tem registro, cita-se as que foram construídas pelos gregos nos primeiros séculos antes de Cristo, eram horizontais e foram substituídas pelas verticais, já que estas últimas podiam ser maiores e produzirem maior quantidade de energia. Muito antes de conseguir utilizar a energia calorífica, porém, o homem, cansado de tentar controlar os ventos, experimentou a utilização e o controle da energia das águas. Como estas tem um caminho certo e mais ou menos invariável, era mais fácil seu uso constante (PLANETSEED, 2013).

Brasil (2006) elucida que evidências históricas atestam que os egípcios utilizavam a energia da corrente dos rios por meio de rodas d'água, em cerca de 2500 a.C. Estas máquinas eram rodas d'água, que consistiam em um eixo horizontal e uma série de pás radiais imersas na corrente do rio, podendo funcionar em pequenos riachos e gerar até aproximadamente 0,5 hp.

Após avanços tecnológicos na área elétrica e desenvolvimento de mecanismos capazes de realizarem a integração entre as áreas mecânica e elétrica, surgiram novas formas de aproveitar a energia oriunda da natureza, como apresentado na Figura 8.

Figura 8 - Esquemático de funcionamento de roda d'água



Fonte: Do Autor.

No último século antes de Cristo, diversos estudiosos romanos de mecanismos, dentre os quais se destacou Marcus Vitruvius Pollio, projetaram e instalaram rodas d'água horizontais (um eixo horizontal conectado a uma roda de pás vertical), onde um segmento inferior da roda fica imerso na corrente do rio, desta maneira, aproveitando apenas a energia cinética da água. Este tipo de máquina, chamada "undershot", ainda possuía eficiência muito baixa e podia, nas melhores máquinas da época, gerar uma potência de cerca de 3 hp (BRASIL, 2006).

Por volta do século II d.C., um tipo de roda mais eficiente começou a ser utilizado em regiões montanhosas. Neste tipo de máquina, chamada "overshot", a água era conduzida por uma canaleta e despejada sobre as pás superiores, que possuíam uma forma levemente curva. Assim sendo, eram aproveitados, tanto a energia cinética da água como sua energia potencial gravitacional. Na idade média, a potência máxima alcançada por este tipo de roda, ainda construída em madeira, era em torno de 50 hp (BRASIL, 2006).

As rodas d'água são encontradas, atualmente, em engenhos de pequenos sítios e desempenham importante papel, desde os séculos passados, em relação a todos os processos de produção de farinha e de açúcar.

As aplicações mais frequentes para as rodas d'água estão na agricultura, mais especificamente em pilões, moinhos ou mesmo gerção de energia elétrica.

Teoricamente, as rodas d'água podem ser classificadas em três tipos: Sobre axial, Sub axial, (de Eixo Horizontal) e de Eixo Vertical.

3.4.1.2 Sobre Axial:

As rodas do tipo sobre axial (Figura 9) possuem pequenos blocos vazados em forma de pequenas caixas montadas diagonalmente na roda. A água é conduzida por um canal (tubulação) e derramada na parte alta da roda, de modo a encher esses compartimentos à medida que estas passam pela parte alta da roda, isso faz com que um dos lados da roda fique com maior massa e, conseqüentemente, a faça girar. Este tipo de roda extrai, principalmente, a energia potencial da água uma vez que faz o aproveitamento do deslocamento da água de um ponto mais alto para um ponto mais baixo.

Figura 9 - Roda d'água do tipo sobre axial



Fonte: Adaptado de (Tonsdomato, 2013).

3.4.1.3 Sub Axial:

Nas rodas do tipo sub axial (Figura 10) a água passa por baixo do eixo da roda, a qual possui aletas que ficam em contato com a água da corredeira de um rio ou de

um canal, por exemplo. As rodas sub axiais extraem principalmente a energia cinética, uma vez que aproveita a velocidade da água que passa por sobre ela.

As rodas d'água tiveram sua origem na antiguidade, nas antigas civilizações do Egito, China e Pérsia. Com o avanço tecnológico, houve a necessidade de significativo aumento na potência destes equipamentos, o que gerou aumento de tamanho e, conseqüentemente, tornando as mesmas pouco práticas. Em pouco tempo começaram a ser substituídas pelas turbinas à vapor para, posteriormente, na França do século XIX, serem ultrapassadas pelas modernas turbinas hidráulicas .

A eletrificação também foi um fator que contribuiu para a desativação destas antigas rodas d'água, pois tornaram-se de baixa eficiência no que diz respeito a geração deste tipo de energia, além de serem de difícil armazenagem devido ao custo elevado dos acumuladores atuais.

Figura 10 - Roda d'água do tipo sub axial



Fonte: Adaptado de (Alterima, 2013).

3.4.1.4 Pelton:

A turbina que possui “conchas” realizando a função de pás é denominada de Pelton (Figuras 11 e 12) e foi criada pelo americano Allan Lester Pelton. Em 1878 este estudioso da engenharia hidráulica iniciou experimentos envolvendo rodas d’água e, após algumas conclusões, o conduziram a invenção de um novo conceito de equipamentos responsáveis pela geração de energia baseadas no chamado “splitter”.

Figura 11 - Turbina Pelton



Figura 12 - Turbina Pelton em operação



Fonte: Adaptado de (Alterima, 2013).

Fonte: Adaptado de (Alterima, 2013).

Mello (2000) caracterizou a turbina Pelton, assim como um equipamento que possui em sua estrutura um distribuidor e um rotor. O distribuidor possui um formato de bocal injetor tipo agulha (Figura 13) que guia o fluxo de água proporcionando um jato cilíndrico sobre a pá do rotor, contribuindo para minimizar as perdas comuns nesta forma de geração de energia. O Rotor, por sua vez, tem um determinado número de pás. Estas possuem formato de concha e são presas na periferia (diâmetro externo) de um disco que gira em torno de um eixo central. As turbinas Pelton são aplicadas geralmente em usinas hidrelétricas com quedas elevadas para qual a vazão não é muito elevada. Possui como característica ser de fácil fabricação, instalação e regulagem básica, além de serem empregadas em usinas de grande potência, como o Sistema Canastra da companhia CEEE no RS.

Construtivamente e convencionalmente podem possuir até cinco ou seis jatos d'água e serem fabricadas em eixo horizontal ou vertical.

Figura 13 - Turbina Pelton e bico injetor



Fonte: Adaptado de (Members, 2014)

Este modelo de turbina representa um avanço nos clássicos perfis de pás das denominadas rodas d'água e sua eficiência justifica sua implantação em pequenas e médias propriedades que dispõem de grande alturas de queda (energia potencial).

3.4.1.5 Francis:

Turbina de fluxo radial que possui sua eficiência em grandes vazões e médias alturas de queda idealizada por Jean-Victor Poncelet aproximadamente em 1820 e aperfeiçoada pelo engenheiro norte americano James B. Francis em 1849.

Antes do fluido chegar ao rotor (Figura 14), ele é direcionado por um duto circular com secção transversal crescente desde seu início até seu final e, após adquirir velocidade (energia cinética), este fluido é liberado para atingir o rotor através de suas pás diretrizes que, através do ângulo de abertura das mesmas, podemos programar o fluxo de fluido necessário para atingirmos a demanda energética.

Suas características construtivas podem ser definidas por possuírem um rotor que, normalmente, não ultrapassa os 10 metros de diâmetro e capazes de atingir velocidades de 80 a 1000 rpm. A faixa de potência que pode atingir é ampla, partindo de cerca de 10 MW a mais de 750 MW. Ainda como característica, pode atingir mais de 90% de eficiência no que se refere a energia potencial extraída da água. Exemplos de aplicação deste tipo de turbina pode ser visto em Itaipú no Brasil e Três Gargantas na China.

Figura 8 - Rotor turbina do tipo Francis



Fonte: Adaptado de (Verka, 2013).

3.4.1.6 Kaplan:

Soares *et al.* (2006) comenta sobre turbina do tipo Kaplan que esta é possuidora de uma complexa geometria e de difícil simulação de seu funcionamento. De forma geral, este modelo de turbina apresenta funcionamento similar as demais, possuindo como característica principal um rotor formado por pás similares a hélices (Figura 15) distribuídas ao redor de um eixo. Com um perfil similar ao de uma turbina do tipo Hélice, a turbina do tipo Kaplan se diferencia por suas pás serem móveis, garantindo maior eficiência e flexibilidade quando de sua aplicação. É indicada para grandes vazões e pequenas quedas e pode ser encontrada, com maior frequência, em pequenas e médias centrais hidrelétricas.

As turbinas do tipo Kaplan ainda podem ser fabricadas em formato de bulbo dentro de um canal submerso contendo seu gerador embutido junto ao rotor, sendo compactas e funcionais em pequenas centrais de geração de energia.

Aplicação deste tipo de turbina pode ser visto na unidade de Passo Real da companhia CEEE.

Figura 95 - Rotor de turbina do tipo Kaplan



Fonte: Adaptado de (Elegnanese, 2013).

3.4.2 Turbinas Eólicas

A definição do tipo de mecanismo a ser adotado, de forma a otimizar o funcionamento de um gerador de energia, passa pela análise do fluido a ser utilizado, bem como das consequências oriundas de seu comportamento.

Horn (2010) apresentou a classificação de aerogeradores levando em conta o seu modo de interação com o vento, orientação do eixo, número de pás e método de controle de potência. A interação entre as pás e o vento envolve conhecimentos

relacionados a sustentação (força de sustentação perpendicular ao escoamento, sendo o elemento que gera a potência motriz da turbina) e arrasto (força que atua na direção do vento e restringindo a aplicação do aerogerador por este elemento gerar velocidades relativas sempre menor que a do vento).

No que tange a orientação do eixo e número de pás, Horn (2010) comenta que um aerogerador pode ser projetado possuindo orientação do eixo vertical (tendo como característica a localização dos elementos de geração e transmissão de energia junto ao solo) ou horizontal (maior eficiência no aproveitamento energético). O número de pás está diretamente relacionado a rotação final capaz de ser atingida pela turbina e, conseqüentemente, a capacidade de geração de energia da mesma, onde quanto menor for a quantidade de pás maior a eficiência do equipamento mas, em contrapartida, menor o torque capaz de ser obtido na mesma.

Horn (2010) ainda define os diferentes controles de potência, onde os mesmos podem ser através de estol, passo ou mesmo estol ativo. Todos estão relacionados ao controle da rotação final em caso de vento excessivo, ultrapassando condições de projeto.

Dentre os tipos mais comuns de turbinas que utilizam o ar como energia base para seu funcionamento encontram-se:

3.4.2.1 Darrieus:

Turbina de eixo vertical definida por Bruni (2007) como sendo um modelo de turbina eólica que possui a vantagem de não precisar de mecanismos de acompanhamento para direcioná-la de acordo com a variação do vento. Foi desenvolvida em 1927 pelo francês Georges Jean Marie Darrieus, podem atingir grandes rotações mas possuem torque de partida praticamente nulo. A turbina eólica denominada de Darrieus (Figura 16) é constituída, normalmente, por 2 ou 3 arcos em formato de lâminas que tendem a utilizar a força de sustentação gerada pelo contato do ar com estes perfis e, desta forma, promover sua rotação e conseqüente geração de energia. Possuem uma eficiência que gira em torno de 40% e são indicadas para altas velocidades de vento, já que possuem um torque inicial a ser superado relativamente alto em comparação com outros perfis de turbinas.

É comum visualizarmos este tipo de estrutura ser fabricada e instalada em conjunto com outros modelos, como, por exemplo, o do tipo Savonius, procurando aumentar a eficiência resultante desta integração através de um melhor aproveitamento das características que as mesmas poderiam oferecer de forma individual.

Figura 106 - Turbina do tipo Darrieus



Fonte: Adaptado de (Sandia, 2006).

3.4.2.2 Savonius:

A turbina eólica do tipo Savonius, de acordo com Bruni (2007), são movidas, predominantemente, por forças de arrasto originadas pelo fluxo de ar por sobre suas pás e, em menor parte, pela força de sustentação ocasionada pelo mesmo. Foi inventada pelo engenheiro finlandês Sigurd Johannes Savonius em 1922. Todavia, em 1616 o bispo italiano de Czanad já havia registrado experimentos com lâminas curvas em turbinas eólicas de eixo vertical.

A construção deste tipo de turbina é simples, normalmente é utilizada como situações de aprendizagem em escolas técnicas e superiores, fomentando o interesse e o conhecimento sobre o aprendizado de energias alternativas. A movimentação das pás se dá pelo arrasto do ar e possui uma eficiência próxima dos 20%. É ideal para regiões onde a intensidade do vento é baixa e pode ser construída em dois ou três níveis de altura (Figura 17) de forma a maximizar o aproveitamento de ar e minimizar o torque inicial.

Figura 117 - Turbina eólica do tipo Savonius



Fonte: Adaptado de (Wikipedia, 2013).

3.4.2.3 Hélice (Multipás):

De acordo com Cecílio (2007) esta turbina e suas variações possuem como características favoráveis a sua implantação a eficiência energética e o baixo torque inicial necessário para iniciar sua movimentação e consequente geração de energia. Este tipo de turbina apresenta os melhores resultados no que se refere a relação

custo/benefício entre fabricação e energia gerada. Atualmente podem possuir alturas que ultrapassam os 100 metros, geram mais de 5 MW de potência e uma eficiência que gira em torno de 45%.

Em alguns países estes tipos de turbinas são instaladas sobre o mar, aproveitando as fortes correntes marítimas o que aumenta significativamente sua eficiência. Atualmente existe uma forte tendência de que turbinas de pequeno porte (alguns modelos são muito similares aos aerogerados multipás existentes em parques eólicos) sejam instaladas em residências, minimizando o consumo de energia da concessionária e, desta forma, contribuindo significativamente para a sustentabilidade.

A nacelle (carcaça onde são abrigados os componentes que constituem o rotor do aerogerador) pode ser visualizada na Figura 18.

Figura 128 - Turbina Tripás



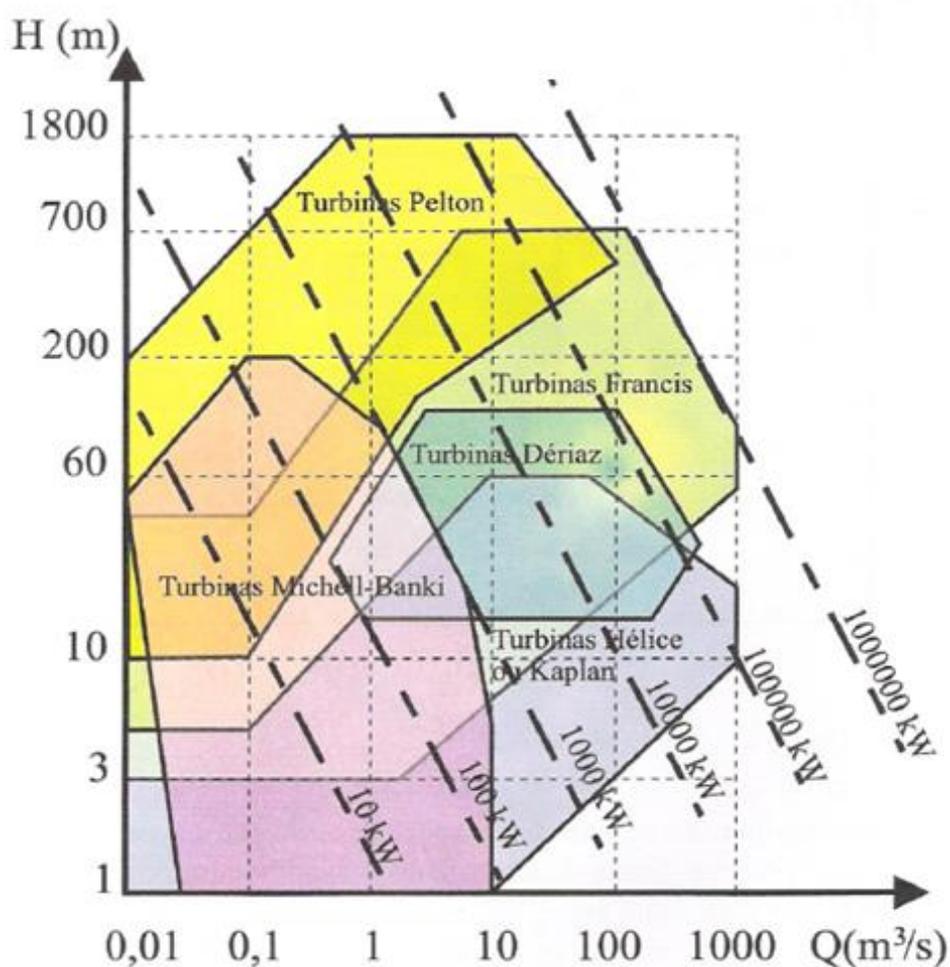
Fonte: Adaptado de (Wikipedia, 2013).

3.4.3 Campo de Aplicação de Elementos Motores

Com o intuito de definirmos um modelo de gerador a ser utilizado, comumente, utilizamos gráficos que relacionam algumas propriedades físicas que elucidam o comportamento do equipamento.

No campo da hidráulica, a aplicação dos diferentes tipos de turbinas está diretamente relacionada à vazão e pressão fornecida à mesma (Figura 19).

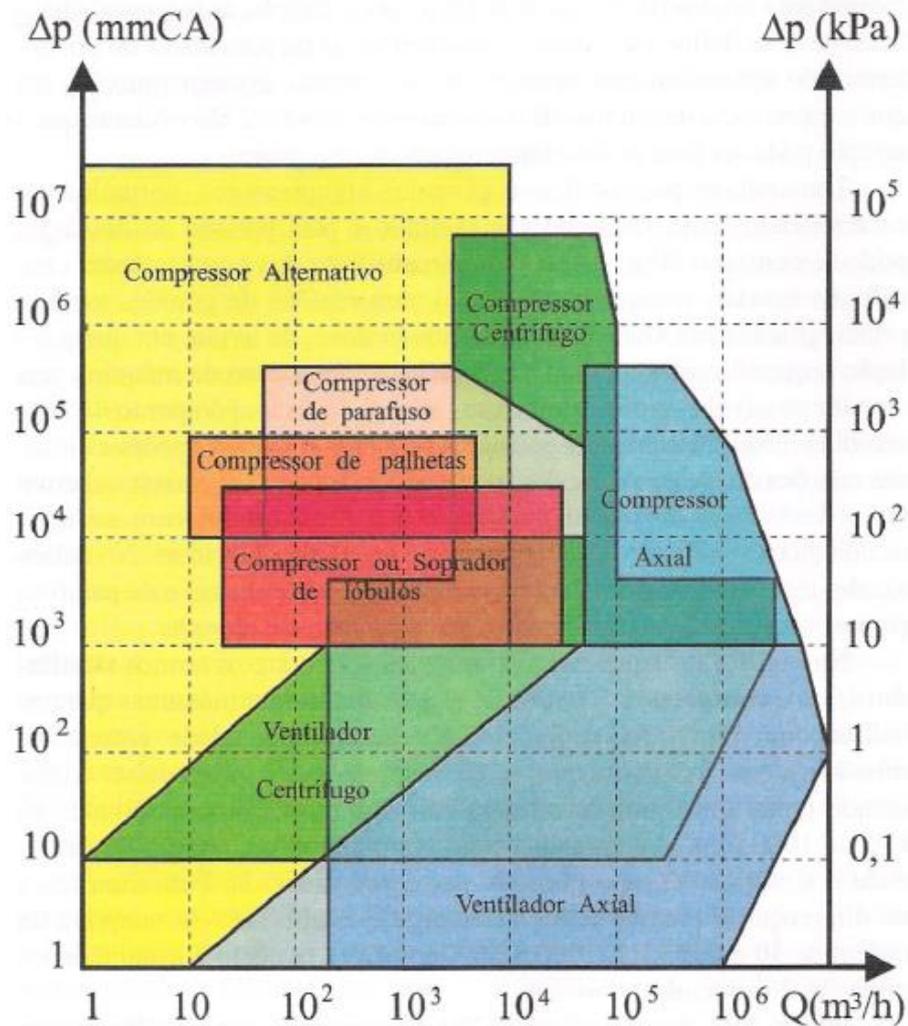
Figura 19 - Campo de aplicação de turbinas relacionando vazão e altura de queda



Fonte: Adaptado de (Henn, 2006).

No campo do estudo de fluidos gasosos, podemos relacionar a variação de pressão a sua variação de vazão, conforme apresentado na Figura 20.

Figura 20 - Campo de aplicação de compressores relacionando a vazão e pressão



Fonte: Adaptado de (Henn, 2006).

As figuras 19 e 20 apresentam os resultados de inúmeras pesquisas e experimentos práticos no que tange uma eficaz análise do custo / benefício na implantação de um destes equipamentos. Resultados mais eficientes poderiam ser obtidos através de simuladores e modelos matemáticos envolvidos em diversos dados de entrada. Todavia a complexidade exigida na programação e compreensão destes inúmeros fatores necessários a obtenção de resultados verossímeis os torna de difícil utilização e aceitação por parte dos profissionais desta área.

A figura 20 possibilita analisar o comportamento dos diferentes modelos de geradores, que utilizam o ar como fluido de trabalho, em detrimento da pressão e vazão a eles submetidos. Desta forma, considerando que em uma tubulação venha a

circular ar a alta vazão e pressão, indica-se a utilização de compressores ou ventiladores do tipo axiais.

Considerando que no meio industrial, sistemas de circulação de ar trabalham com grandes vazões e pequenas pressões, foi definido de forma empírica, o modelo de turbina que servirá de protótipo para os ensaios teóricos e práticos que possibilitarão análise da eficiência da mesma, aproximando o protótipo de um modelo de ventilador axial.

3.5 Tubulações Industriais

A escolha do material que constituirá uma tubulação é fundamental para definir as perdas de carga que serão originadas e a eficiência da mesma. Normalmente, devido a fatores econômicos, tubulações hidráulicas são fabricadas de material plástico, o que favorece a variação de seu diâmetro devido as variações nas pressões de trabalho. Ensaos práticos como os apresentados por Andrade (1990) e abordados por Rettore (2011) elucidam a relação direta entre o aumento da pressão interna de uma tubulação e a diminuição da perda de carga existente na mesma.

Vilela *et al.* (2003) contrariou a suposição de que as maiores deformações decorrentes da pressão de operação ocorreriam em tubos com paredes finas. O mesmo explicou este fenômeno relacionando diretamente a força de deformação que ocorre nas paredes internas de uma tubulação com o diâmetro do mesmo, fazendo com que tubulações de maiores diâmetros apresentem baixos valores de perdas de pressão, relação que se mantém estável se considerarmos aumento das pressões de operação a elas submetidas.

Rettore *et al.* (2009) aborda conceitos que definem o comportamento de fluidos escoando em tubulações e define que este deslocamento sempre implicará em resistência ao movimento deste fluido e à dissipação de energia que representa a perda de carga anteriormente mencionada e caracterizada por suas principais equações.

4. METODOLOGIA

Quanto aos objetivos, esta pesquisa se caracteriza como de predição, pois visa, ao final deste estudo, avaliar a viabilidade futura de aplicação do sistema proposto em empresas que utilizam sistemas de geração de vácuo e de ventiladores industriais em seus processos fabris.

Já no que se refere à coleta de dados e fonte de informações, inicialmente a pesquisa se caracteriza como documental e bibliográfica, progredindo para uma pesquisa experimental em laboratório.

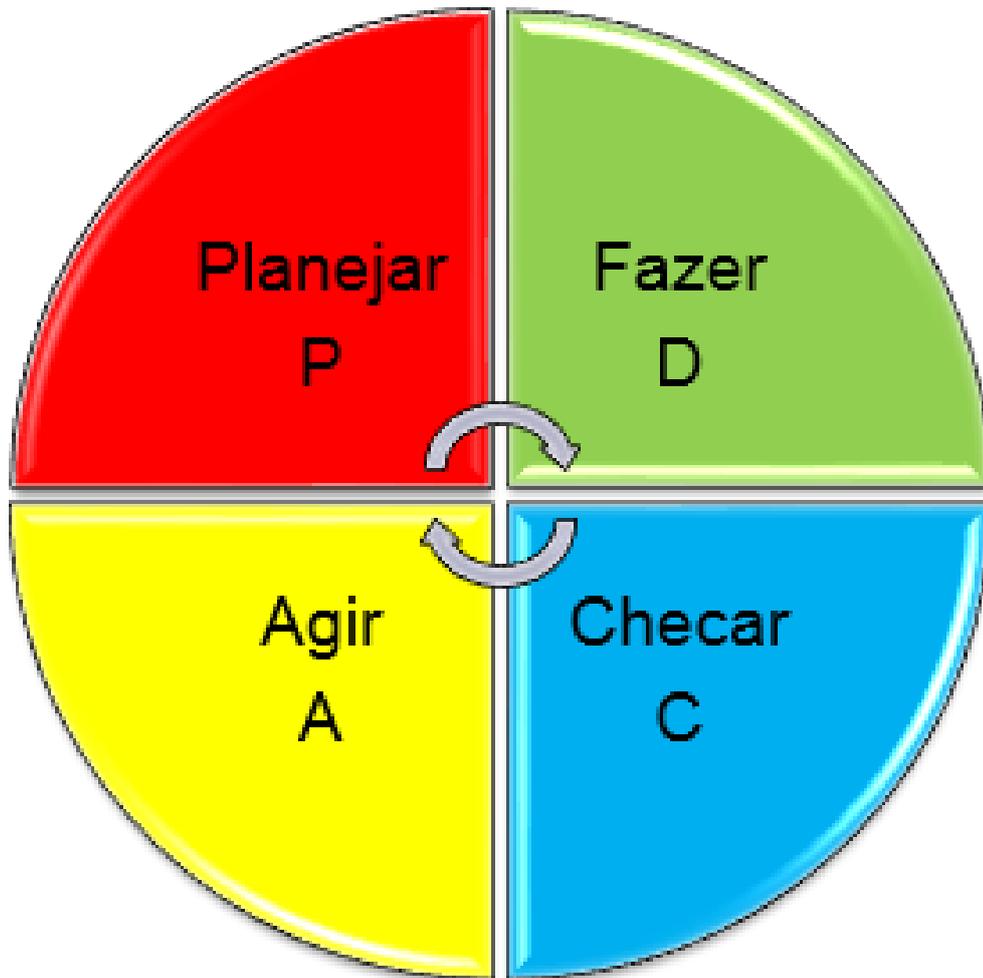
4.1 Procedimentos Metodológicos

De acordo com Oribe (2009), desde o início do século passado as organizações industriais já conheciam e se beneficiavam de uma filosofia baseada em especificação, produção e inspeção. Entretanto, Ishikawa (1986) mencionou acerca desta cadeia formada por três elementos, sendo a mesma linear, simples e aberta, representando a estrutura de funcionamento das indústrias daquela época.

Somente na década de 30, o norte-americano Walter A. Shewhart propõe uma forma de visualizar esta sequência de atividades em forma de um sistema, formando um círculo. Após ser incorporado à cultura japonesa, foi acrescentada mais uma etapa a este ciclo e o mesmo passou a ser conhecido por PDCA, ou seja, planejar, fazer, checar e agir.

Sendo assim, o desenvolvimento deste projeto seguirá os passos do ciclo PDCA (Figura 21), onde as etapas apresentadas a seguir servirão para planejar o projeto da turbina e sua fabricação, realizar a construção de um protótipo para ensaio, checar resultados parciais obtidos e agir sobre as observações realizadas de forma a maximizar a eficiência do equipamento.

Figura 21 - Ciclo PDCA utilizado para orientar as etapas do projeto



Fonte: Adaptado de (Hosotani, 1992).

4.1.1 Etapa 1 – Planejamento

Na primeira etapa do projeto foi realizado a idealização de um esboço, buscando criar um modelo virtual que servisse como base para definir os próximos passos a serem adotados. Nesta etapa foi definido os materiais necessários a realização dos ensaios práticos, desde a estrutura da turbina até os equipamentos que nos possibilitaram mensurar os resultados obtidos. As estratégias adotadas neste período foram fundamentais para nortear a sequências das atividades, servindo como base para as decisões que se fizeram necessárias serem tomadas.

4.1.2 Etapa 2 – Fabricação

Nesta etapa foram realizados o planejamento e pesquisa, traçando objetivos e direcionando o foco dos experimentos. Foi caracterizada pela condição de “Fazer” com que o protótipo projetado ganhasse forma física. Inicialmente analisou-se a confecção de um modelo e posterior fundição em alumínio, todavia, este procedimento poderia vir a acarretar inconvenientes devido ao tempo disponível e qualidade das peças. Sabendo da intenção da UNISC em adquirir um equipamento de impressão 3-D, foram empregados esforços em estudar o seu funcionamento, compreender suas limitações e adequar o projeto de forma a se conseguir resultados satisfatórios.

Alguns elementos necessários para a construção do protótipo e da estrutura responsável por seu ensaio foram adquiridos nesta etapa. A impressão da turbina demandou atenção, paciência e envolvimento direto com o equipamento e técnicos da área, de forma a otimizar sua fabricação sem perdas na eficiência do mesmo.

4.1.3 Etapa 3 – Verificação

Após a impressão do protótipo e aquisição dos materiais, o momento foi de “Checar” se tudo estava de acordo e, novamente, houve a necessidade de intervir e realinhar algumas ações de forma a possibilitar a sequência das atividades previstas. Foi nesta etapa que o projeto teórico da turbina precisou ser modificado no que diz respeito a sua concepção estrutural, pois as limitações do equipamento de impressão 3-D só puderam ser percebidos neste momento e um novo protótipo precisou ser reprojetoado.

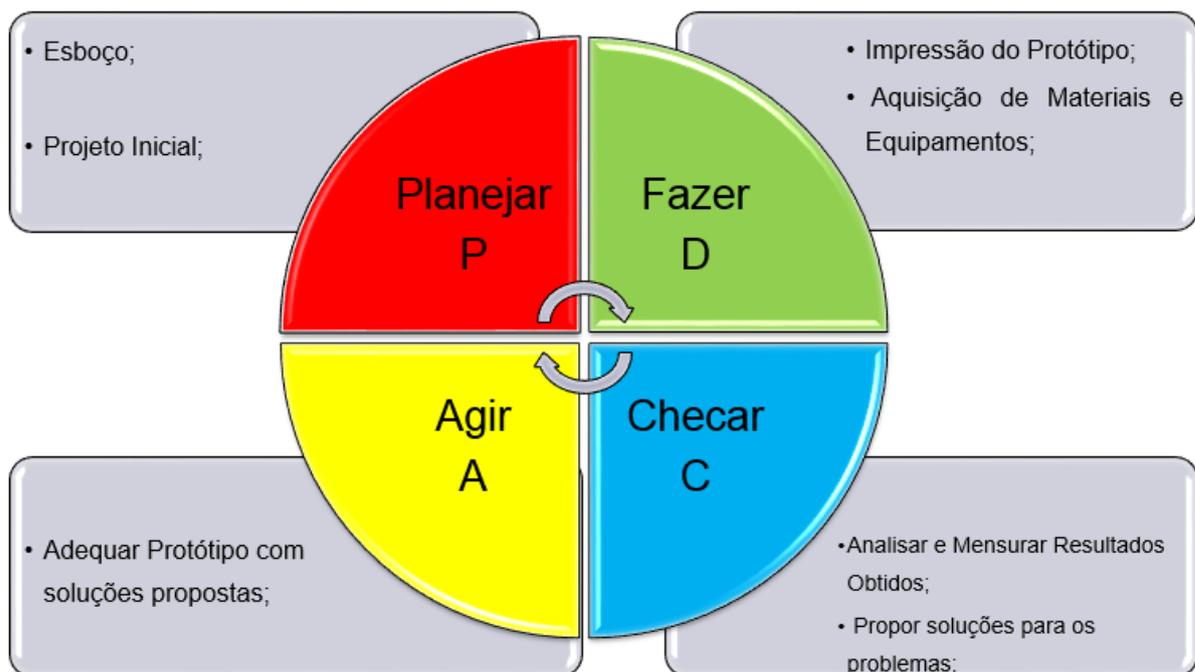
No momento do ensaio e, novamente, devido a uma concepção de projeto teórico inicialmente formulada, foi observada que a potência oriunda do exaustor utilizado para fazer com que a turbina pudesse sair da inércia não atingia valores que permitissem o ensaio, sendo necessária nova intervenção através de alterações no projeto da mesma.

4.1.4 Etapa 4 – Ensaio

Nesta etapa, foram realizadas ações em relação à atividade “Agir”, implementando as soluções aos problemas observados anteriormente, sendo adequado o projeto da turbina, sistema de fixação da mesma na tubulação e de seu eixo central, que precisou ser alterado de forma a minimizar as perdas de pressão que interferiam na funcionalidade do equipamento. Por fim, o ensaio ocorreu e os dados estão expostos na sequência do trabalho.

O diagrama que exemplifica todas as etapas desenvolvidas neste trabalho pode ser observado na Figura 22, onde o ciclo PDCA é apresentado de forma mais dinâmica.

Figura 22 - Ciclo PDCA com as atividades desenvolvidas em cada etapa



Fonte: Adaptado de (Hosotani, 1992).

5. PROJETO PROPOSTO

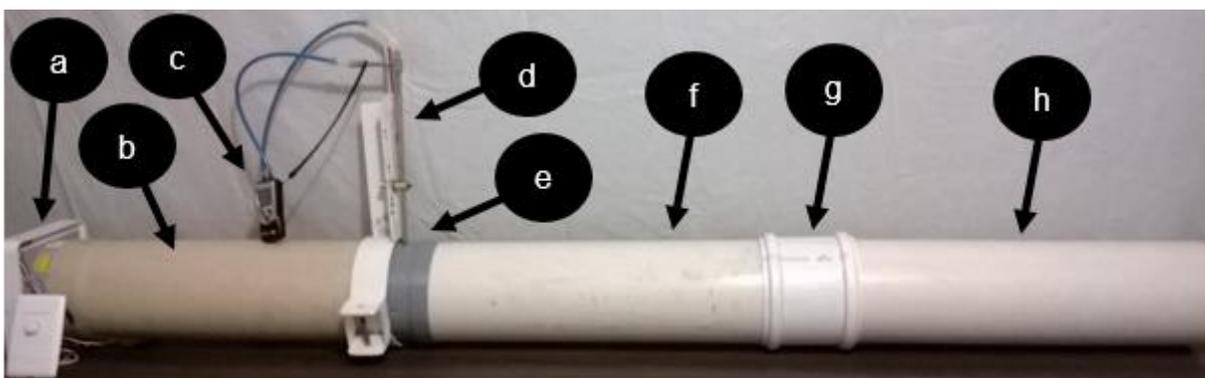
Neste capítulo serão apresentados os materiais e equipamentos utilizados para a realização dos ensaios da turbina bem como dos procedimentos utilizados na fabricação da estrutura que permitirá a obtenção dos resultados. Também será apresentado o projeto em CAD do modelo originalmente definido para fabricação e implantação no meio industrial e o projeto em CAD do modelo utilizado para a realização dos ensaios e posterior análise dos mesmos como apresentado na sequência da dissertação.

Ao final deste capítulo serão apresentados os procedimentos de montagem utilizados para os diferentes ensaios realizados sobre o protótipo, permitindo uma avaliação mais ampla da eficiência da mesma.

5.1 Materiais e equipamentos

Os recursos e equipamentos utilizados no ensaio da turbina são apresentados na sequência e indicados na Figura 23.

Figura 23 - Estrutura utilizada em ensaio da turbina



Fonte: Do Autor.

- Tubulação de PVC, Figura 23 em (b), (f) e (h), utilizada para servir como duto responsável por canalizar o fluxo de ar gerado pelo exaustor através da turbina. O duto utilizado possui as seguintes características: diâmetro externo de 150 mm, parede de 1,0 mm e segmento primário (Figura 23b) possuindo 600 mm, secundário (Figura 23f) de 500 mm e terciário (Figura 23h) de 500 mm.

- Exaustor residencial e dimmer (Figura 23a), com a finalidade de gerar a circulação de ar e criar a pressão dinâmica dentro da tubulação, bem como a de podermos controlar estes parâmetros para melhor análise de resultados. O exaustor utilizado foi um equipamento da marca VENTOKIT com rotação de 2400 rpm, 40 watts de potência e diâmetro externo de 150mm. O dimmer utilizado foi um equipamento da marca EXATRON.
- Anemômetro digital com resolução de 2 casas e medição em metros por segundo, fornecendo a velocidade do vento em diversos pontos do sistema.
- Manômetro digital da marca TESTO, modelo 510 com resolução centesimal, com a função de medir a variação de pressão gerada pela turbina e, desta forma, mensurar empiricamente o valor da perda de carga que a mesma acarreta a tubulação.

5.2 Procedimento de Fabricação

O protótipo idealizado e projetado inicialmente necessitou de adequações à fim de podermos contar com a impressora 3-D. Foi necessário modificar as condições de ensaio para podermos utilizar dos recursos disponíveis. Neste momento optou-se em imprimir apenas o rotor da turbina e desenvolver suporte para o ensaio da mesma, fazendo com que a mesma pudesse ser utilizada sem interferir na confiabilidade dos resultados.

5.2.1 Protótipo da Turbina Eólica

Em uma primeira etapa do trabalho foi projetada a turbina em estudo, onde o desenvolvimento do mesmo contemplaria as especificações necessárias para a fabricação e montagem. Todo projeto foi desenvolvido em software CAD, contendo detalhes referentes ao dimensional, materiais empregados e elementos de máquinas comerciais necessários a sua confecção.

Após a conclusão do projeto, foi dado início à etapa de confecção do modelo da turbina, fazendo uso de um equipamento de impressão 3D que evita a tradicional modelagem artesanal em madeira em casos que se faz necessário fundir o protótipo para ensaio posterior.

5.2.1.1 Projeto em CAD

O projeto mecânico realizado através de software CAD solidworks, objetivou definir previamente a estrutura a ser construída e implementada em um duto contendo ventilador para simular condições de operação. A Figura 24 apresenta protótipo da turbina em sua forma final, ou seja, em sua montagem definitiva e pronta para ser instalada na tubulação, sendo possível visualizar a engrenagem central, elemento que é utilizado para transmitir o movimento da mesma ao gerador, que, por sua vez, converterá a energia mecânica em elétrica e, desta forma, possibilitando o armazenamento deste excedente energético em acumuladores para utilização em momento oportuno, como, por exemplo, na iluminação noturna de ambientes que necessitem da mesma.

Figura 14 - Perspectiva isométrica do protótipo da turbina projetada



Fonte: Do Autor.

A estrutura externa que conterá o rotor da turbina pode ser observada abaixo (Figura 25) e será responsável, também, pela vedação da estrutura.

Figura 15 - Perspectiva isométrica da estrutura externa da turbina projetada



Fonte: Do Autor.

A estrutura interna que conterá as pás da turbina pode ser observada abaixo (Figura 26). Este elemento será caracterizado pela rotação elevada gerada pelo contato das pás com o fluido deslocado na tubulação.

Figura 16 - Perspectiva isométrica da carcaça do rotor da turbina



Fonte: Do Autor.

A engrenagem central (apresentada na Figura 27) será responsável pela transmissão do movimento rotacional da turbina ao elemento gerador.

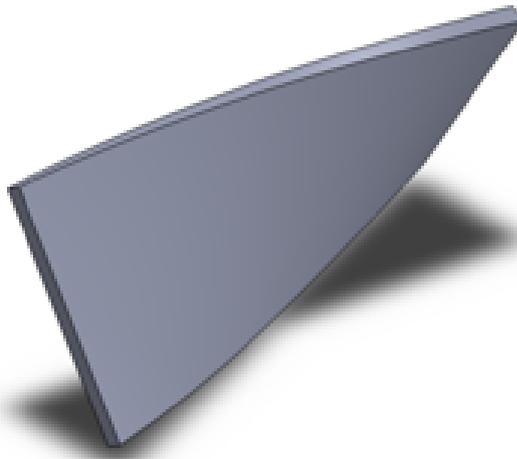
Figura 17 - Perspectiva isométrica da engrenagem central



Fonte: Do Autor.

Os elementos responsáveis por absorverem a energia de fluido e a transformarem em energia mecânica de rotação são definidos como pás (Figura 28). O modelo escolhido de pás está diretamente relacionado à forma construtiva da turbina e é dela que depende a eficiência possível de ser obtida.

Figura 18 - Perfil de pá da turbina impressa



Fonte: Do Autor.

A opção por um rolamento do tipo esférico com vedação dupla (Figura 29) se justifica pelas forças atuantes no mesmo, onde a característica deste elemento é a de suportar tanto esforços radiais como axiais e precisa de proteção contra partículas do produto transportado ao longo da tubulação.

Figura 19 - Rolamento de esferas com dupla proteção



Fonte: Do Autor.

De forma a detalhar a montagem da turbina e visualizar os principais elementos que a constituirão, utilizamos um recurso denominado vista explodida (Figura 30). Nesta imagem é possível compreender como se comportará a turbina após montada.

Figura 20 - Vista explodida da turbina projetada



Fonte: Do Autor.

5.2.2 Procedimentos de Montagem

Antecedendo os ensaios práticos foi necessário definir os procedimentos de montagem para a realização dos mesmos. De forma a verificarmos a influência que a turbina venha a ter na pressão existente no interior de tubulações onde circula ar, realizamos testes considerando 3 situações possíveis, sendo elas:

1° Ensaio: Consistiu de exaustor e tubulação (Figura 23a, 23b), sendo mensurados dados relativos a pressão estática e pressão dinâmica bem como a velocidade do ar na entrada e na saída da tubulação;

2° Ensaio: Além dos elementos do 1° ensaio foi acrescentado o protótipo da turbina no final da tubulação (Figura 23g), permitindo a mensuração do comportamento da pressão com a presença da mesma;

3° Ensaio: Por fim, foi analisado o comportamento da pressão em uma condição em que a turbina se encontrou no meio da tubulação, ou seja, acrescentou-se uma tubulação posterior a mesma (Figura 23h) e mensurou-se os resultados obtidos no que se refere a velocidade do vento e a pressão dinâmica e a pressão relativa.

Vale ressaltar que os ensaios realizados compreendem apenas o rotor da turbina, já que o projeto, da forma com que fora concebido, procura atender uma condição real de instalação e para efeitos de análise de sua eficiência não se fez necessário a confecção de toda a estrutura.

6. Ensaaios em Laboratório e resultados obtidos

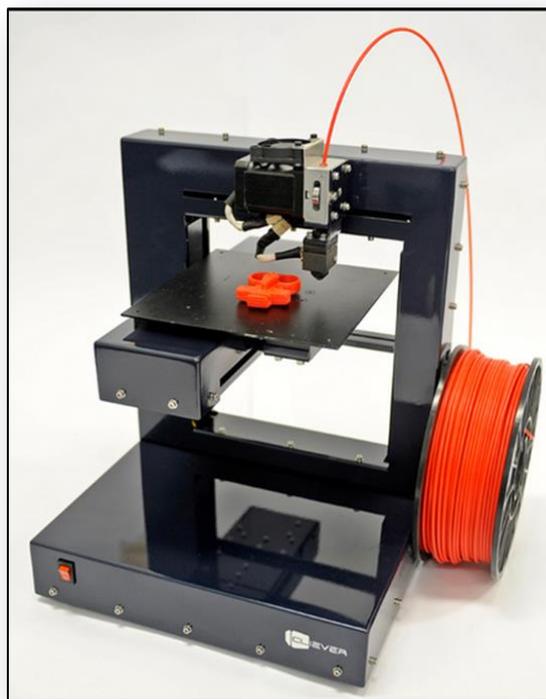
Este capítulo aborda conceitos que visam elucidar o processo de impressão 3-D e os motivos que levaram a escolha deste método para a fabricação do protótipo. Juntamente com informações relacionadas a elaboração da turbina, os resultados obtidos nos diferentes ensaios realizados são, sistematicamente, apresentados, comprovando a eficiência capaz de ser obtida através desta forma de reaproveitamento de energia. De forma a quantificar e melhor elucidar os resultados obtidos, ao final serão mensuradas as eficiências obtidas em relação a influência da turbina quanto a pressão dinâmica e vazão de ar gerada no interior da tubulação.

O processo de fundição permite moldar objetos nas mais diversas formas e nos diferentes tipos de materiais, sendo necessário conhecer as propriedades térmicas e mecânicas dos mesmos.

Seu processo é resultado da liquefação para posterior escoamento em moldes para resfriamento e solidificação. Entretanto, como é um processo que requer habilidades não apenas técnicas mas artesanais e a questão tempo é um elemento importante a ser considerado, analisamos a possibilidade de utilizar um equipamento recém adquirido pela universidade e que acrescentará um diferencial a pesquisa desenvolvida.

Para a tradicional confecção do molde (a ser fabricado, normalmente, em areia com aglomerante), seria necessária a utilização de um modelo desenvolvido de forma artesanal. Tradicionalmente este modelo é confeccionado em madeira por um artesão que dispõe de ferramentas para criá-lo. Mas como comentado anteriormente, neste projeto iremos utilizar uma tecnologia denominada impressão 3-D cujo equipamento utilizado pode ser visto na Figura 31, garantindo precisão dimensional e rapidez nesta etapa do processo.

Figura 21 - Máquina de impressão 3-D utilizada para fabricação da turbina



Fonte: Adaptado de (Gizmodo, 2013)

A proposta inicial para a fabricação do protótipo foi a de imprimi-lo em peça única. Todavia, como a estrutura da turbina é complexa e com dimensões maiores que a capacidade da impressora, houve a necessidade de reprojeter a mesma em peças menores que, posteriormente, seriam coladas para formarem uma única estrutura capaz de ser ensaiada.

Ao fabricarmos alguns dos elementos que formam a turbina, identificou-se limitações no aparelho de impressão e a solução encontrada foi a de imprimir a turbina em peça única, adequando, novamente, o projeto a necessidade observada. O resultado pode ser visto na Figura 32. O rotor impresso possui diâmetro externo de 148 mm, espessura da parede de 3 mm e uma largura de 150 mm. Sua furação central possui diâmetro de 50 mm com espessura de 3 mm.

Figura 22 - Turbina Fabricada em impressora 3-D



Fonte: Do Autor.

Na Figura 33 podemos observar a turbina impressa instalada em um torno, pois foi necessário desbastar alguns milímetros de sua parede externa e, assim, garantir sua funcionalidade.

Figura 23 - Tubulação e exaustor posicionados para ensaio

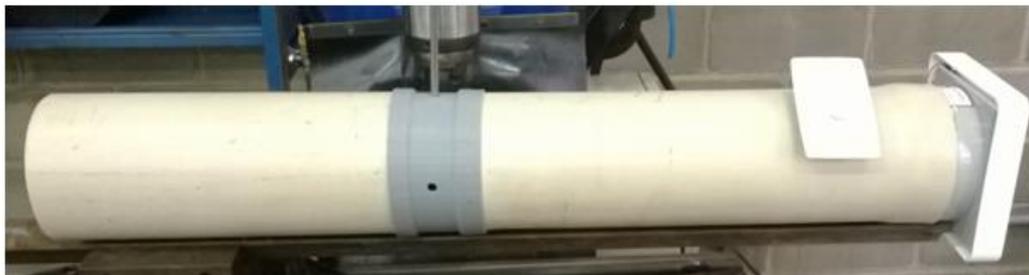


Fonte: Do Autor.

O ensaio deste equipamento foi realizado em três etapas distintas, utilizando tubulação de PVC com 150mm de diâmetro externo como elemento condutor de fluido previamente dimensionada e projetada para permitir a obtenção de valores mensuráveis e confiáveis. Com isto, foi possível simular o protótipo em uma estrutura similar a um túnel de vento, possibilitando analisá-lo em diferentes situações de trabalho, medindo o comportamento da perda de carga no interior da tubulação para, em seguida, ser verificada a eficiência e viabilidade de implantação da mesma.

Em um primeiro momento foram extraídos dados do gerador (exaustor) e tubulação sem a turbina presente, de tal maneira a permitir-nos comparar os resultados quantitativamente e qualitativamente, conforme Figura 34.

Figura 24 - Tubulação, exaustor e tubo de pitot posicionados para ensaio



Fonte: Do Autor.

Neste e nos ensaios seguintes foi utilizado um tubo de Pitot (Figura 35), de forma a obtermos valores de pressão em pontos alternados progressivamente entre a parede interna e o centro da tubulação. Acoplado à extremidade do tubo de Pitot encontra-se um manômetro digital, de forma a medir a pressão dinâmica e relativa, servindo como principal elemento a ser analisado na definição da funcionalidade da turbina.

Figura 25 - Tubo de Pitot utilizado para medir a variação de pressão no sistema



Fonte: Do Autor.

Os resultados obtidos nos ensaios foram transferidos para tabelas e diagramas de linhas, realizando a análise dos mesmos na sequência. Para esta avaliação foi dividido os ensaios em 3 situações distintas e uma quarta análise contemplando todos os resultados em um mesmo diagrama.

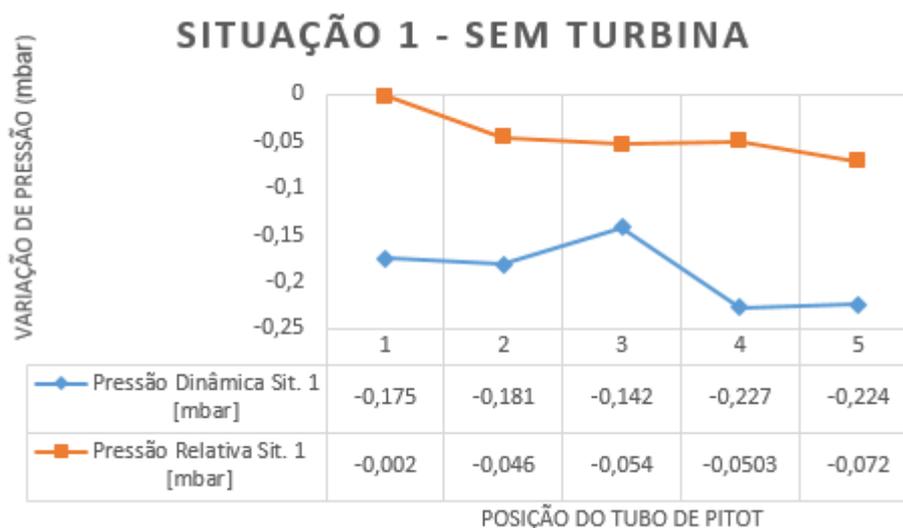
Na primeira situação ensaiada foram obtidos os resultados apresentados no Quadro 1 e Figura 36. É possível observarmos a queda na pressão dinâmica à medida em que nos aproximamos do centro da tubulação, local onde ocorre menor influência de agentes estruturais e maior influência do fluxo do fluido.

Quadro 1 - Dados obtidos em ensaio sem a presença da turbina

		Situação 1									
Posição \ Ensaio		Pressão Dinâmica Sit. 1 [mbar]					Pressão Relativa Sit. 1 [mbar]				
		Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5
1	48	0,04	0,01	-0,01	0,01	-0,02	0,08	0,04	0,03	0,04	0,02
2	43,2	-0,03	-0,03	-0,05	-0,03	-0,06	0,08	0,04	0,04	0,03	0,01
3	38,4	-0,04	-0,06	-0,07	-0,08	-0,08	0,05	0,01	0,02	0	-0,02
4	33,6	-0,05	0,12	-0,13	-0,14	-0,14	0,02	-0,01	-0,01	-0,04	-0,03
5	28,8	-0,14	-0,17	-0,17	-0,21	-0,18	-0,01	-0,04	-0,06	-0,06	-0,07
6	24	-0,22	-0,24	-0,26	-0,26	-0,25	-0,04	-0,08	-0,1	-0,09	-0,12
7	19,2	-0,29	-0,26	-0,29	-0,33	-0,33	-0,09	-0,11	-0,11	-0,013	-0,15
8	14,4	-0,31	-0,39	0,37	-0,39	-0,37	-0,08	-0,1	-0,13	-0,14	-0,14
9	9,6	-0,35	-0,4	-0,41	-0,41	-0,4	-0,09	-0,11	-0,12	-0,12	-0,13
10	4,8	-0,36	-0,39	-0,4	-0,43	-0,41	0,06	-0,1	-0,1	-0,11	-0,09
Média Ensaio		-0,175	-0,181	-0,142	-0,227	-0,224	-0,002	-0,046	-0,054	-0,0503	-0,072
Média Geral		-0,1898					-0,04486				
Desvio Padrão		0,164970974					0,064050907				

Fonte: Do Autor.

Figura 26 - Relação entre a pressão dinâmica e a relativa sem turbina



Fonte: Do Autor.

No segundo ensaio, através de dispositivo especificamente projetado para este fim (Figura 23e), acrescentamos a turbina no final da tubulação conforme apresentado

anteriormente (Figura 23f) e medimos os resultados conforme visualizado na Figura 37 e apresentado na Quadro 2.

Figura 27 - Suporte da turbina instalada no final da tubulação



Fonte: Do Autor.

Quadro 2 - Dados obtidos com turbina no centro da tubulação

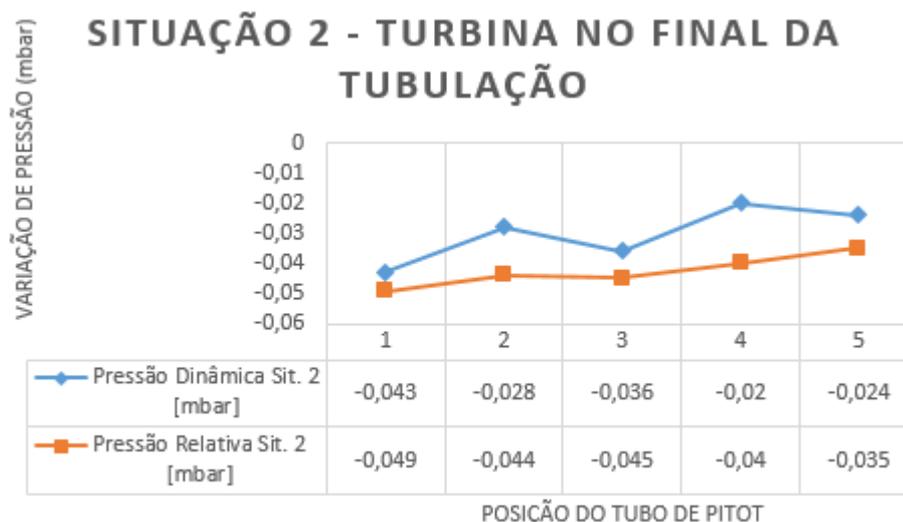
		Situação 2									
Posição \ Ensaio		Pressão Dinâmica Sit. 2 [mbar]					Pressão Relativa Sit. 2 [mbar]				
		Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5
1	48	0,03	0,09	0,08	0,09	0,07	-0,01	0	0	0	0
2	43,2	0,07	0,06	0,08	0,08	0,08	0	-0,01	0	0	0,01
3	38,4	0,04	0,06	0,05	0,06	0,05	-0,01	0	-0,01	0	0
4	33,6	0,01	0,03	0,03	0,03	0,03	-0,03	-0,02	-0,01	-0,01	0
5	28,8	-0,02	0	0	0	0	-0,04	-0,03	-0,03	-0,04	-0,03
6	24	-0,05	-0,02	-0,03	-0,03	-0,02	-0,06	-0,04	-0,04	-0,04	-0,04
7	19,2	-0,07	-0,06	-0,08	-0,06	-0,06	-0,07	-0,06	-0,07	-0,06	-0,06
8	14,4	-0,13	-0,09	-0,13	-0,1	-0,11	-0,08	-0,07	-0,08	-0,08	-0,07
9	9,6	-0,15	-0,17	-0,14	-0,12	-0,12	-0,1	-0,1	-0,09	-0,08	-0,07
10	4,8	-0,16	-0,18	-0,22	-0,15	-0,16	-0,09	-0,11	-0,12	-0,09	-0,09
Média Ensaio		-0,043	-0,028	-0,036	-0,02	-0,024	-0,049	-0,044	-0,045	-0,04	-0,035
Média Geral		-0,0302					-0,0426				
Média Geral		0,083249157					0,035243912				

Fonte: Do Autor.

De forma análoga a situação anterior, repassamos para um diagrama de linhas (Figura 38) os resultados obtidos observando o comportamento da pressão em função da profundidade de medição. Foi possível observar uma inversão de valores quando

comparado com a situação anterior, onde a pressão dinâmica assumiu valores superiores a relativa, indicando influência da turbina na estrutura.

Figura 28 - Relação entre pressão dinâmica e relativa com a turbina no final da tubulação



Fonte: Do Autor.

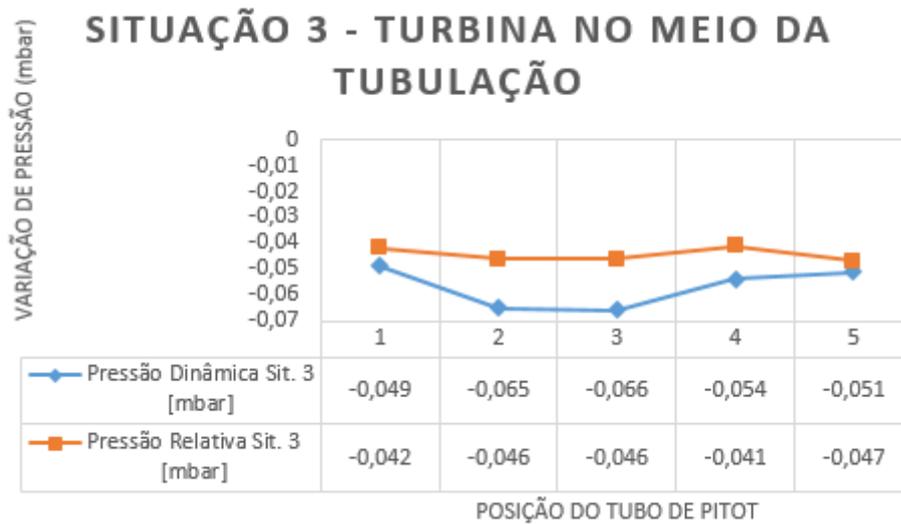
Por fim, no último ensaio realizado, foi acrescentado após a turbina um segmento de tubulação de forma a analisar o comportamento do fluxo de fluido no referente a sua pressão, obtendo os resultados apresentados na Quadro 3 e na Figura 39.

Quadro 3 - Ensaio realizado com tubulação posterior a turbina

		Situação 3									
Posição \ Ensaio		Pressão Dinâmica Sit. 3 [mbar]					Pressão Relativa Sit. 3 [mbar]				
		Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5
1	48	0,06	0,07	0,04	0,06	0,05	0	0	0	0	0
2	43,2	0,05	0,06	0,06	0,07	0,07	0	0,01	0,01	0,02	0,01
3	38,4	0,03	-0,05	0,04	0,05	0,04	-0,01	0,01	0	0,01	0,01
4	33,6	0,02	0,02	0	0,02	0,02	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01
5	28,8	-0,02	-0,01	-0,03	-0,02	-0,01	-0,02	-0,04	-0,03	-0,02	-0,03
6	24	-0,05	-0,05	-0,04	-0,05	-0,06	-0,05	-0,05	-0,04	-0,05	-0,05
7	19,2	-0,06	-0,11	-0,11	-0,11	-0,07	-0,06	-0,07	-0,07	-0,07	-0,09
8	14,4	-0,13	-0,15	-0,17	-0,15	-0,15	-0,08	-0,09	-0,1	-0,08	-0,11
9	9,6	-0,17	-0,18	-0,22	-0,19	-0,18	-0,09	-0,1	-0,11	-0,1	-0,1
10	4,8	-0,22	-0,25	-0,23	-0,22	-0,22	-0,1	-0,12	-0,11	-0,11	-0,1
Média Ensaio		-0,049	-0,065	-0,066	-0,054	-0,051	-0,042	-0,046	-0,046	-0,041	-0,047
Média Geral		-0,057					-0,0444				
Média Geral		0,09581077					0,042396104				

Fonte: Do Autor.

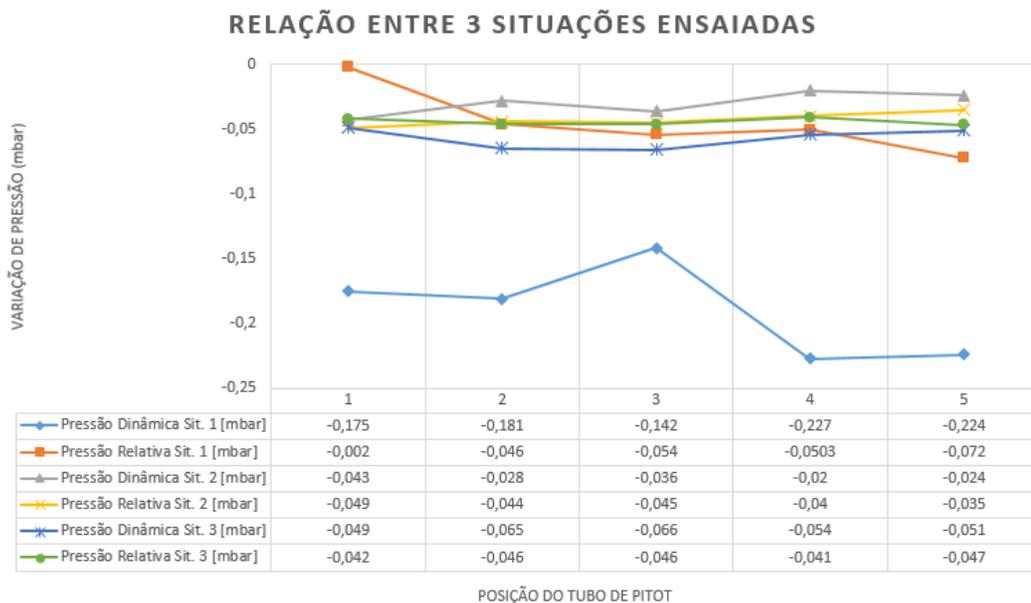
Figura 29 - Relação entre pressão dinâmica e relativa com tubulação posterior a turbina



Fonte: Do Autor.

Em posse desses resultados foi possível realizar uma análise quantitativa da implementação da turbina em dutos de ventilação forçada. Agrupando todos os resultados em um único diagrama (Figura 40), é possível observarmos que, com exceção da pressão dinâmica da situação 1, as demais pressões observadas não apresentaram variações significativas. Desta forma será realizada a análise da pressão dinâmica da situação 1 em comparação com as pressões dinâmicas das situações 2 e 3.

Figura 30 - Relação entre as diferentes posições da turbina ensaída



Fonte: Do Autor.

Em uma primeira análise podemos observar a tendência da pressão interna, a qual a tubulação ficou exposta, variar com valores positivos próximos a parede do duto e valores negativos, ou seja, inferiores ao atmosférico no centro da tubulação. Esta variação de pressão está diretamente relacionada a fatores construtivos como a rugosidade da tubulação bem como a fatores relacionados a características físicas do fluido.

De forma a conseguir mensurar os resultados obtidos e analisa-los de forma a obter conclusões que possibilitem ponderar sobre a eficiência do equipamento, serão realizados alguns cálculos referentes a perda de carga e potência possível de ser obtida.

A velocidade do fluxo do fluido na entrada do exaustor, medida pelo anemômetro, foi de 6 m/s e na saída da tubulação com 500 mm de comprimento foi de 5,3 m/s, sem ser instalada a turbina na mesma. Nas mesmas condições anteriores, apenas acrescentando a turbina no final da tubulação, a velocidade do fluido na entrada da tubulação passou a ser de 5,3 m/s e na saída passou a ser de 4,7 m/s e, por fim, com a tubulação posterior a turbina a velocidade do fluxo de fluido passou a ser de 4,7 m/s na entrada da tubulação e de 3,3 m/s na saída.

Para podermos realizar um comparativo que permita conclusões quantitativas a respeito da eficiência da turbina, utilizaremos a Equação 10, que nos permitirá extrair a potência teórica do sistema.

Inserindo os seguintes valores de referência na Equação 10:

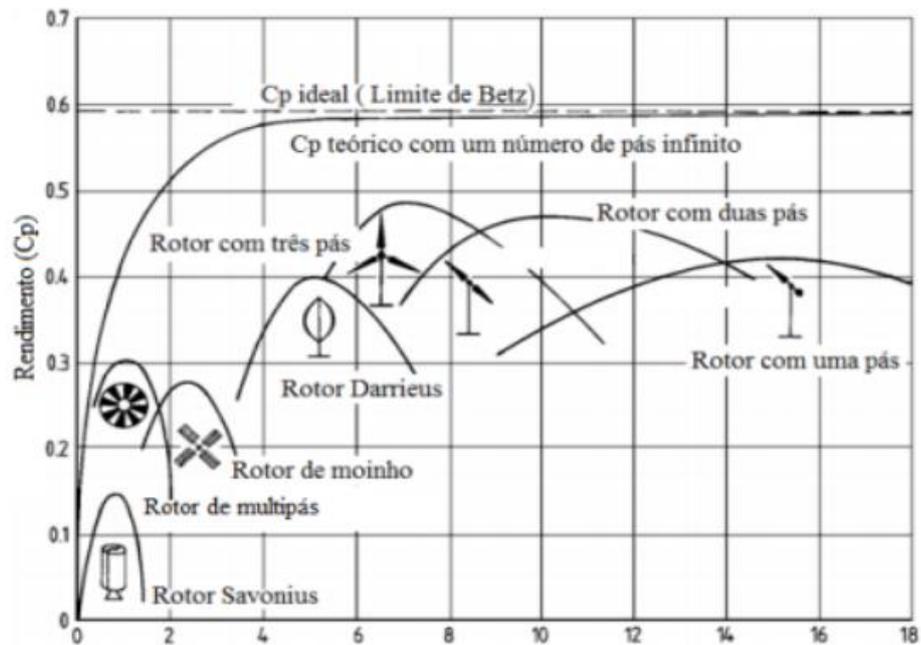
$$\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3 \text{ para ar atmosférico;}$$

$$S = (\pi \cdot d^2)/4 = (3,14 \cdot 0,15^2)/4 = 0,017 \text{ m}^2;$$

$$v = 6 \text{ m/s;}$$

C_p – Como o perfil da turbina é um protótipo, o coeficiente C_p torna-se de difícil obtenção através de tratamento matemático, sendo utilizando o gráfico apresentado na Figura 41, para podermos estimar seu valor. Desta forma, enquadrando a turbina de acordo com a classificação apresentada, podemos inferir a semelhança da mesma com modelos multipás e isto faz com que a mesma possua um valor de C_p próximo de 30%.

Figura 31 - Rendimento (Cp) em função do modelo da turbina



Fonte: Adaptado de (Hau, 2006).

Cálculos referentes a Situação 1, ou seja, máxima potência teórica possível de ser obtida pelo fluxo de fluido, considerando a medição da velocidade do ar na saída do exaustor e valor máximo teórico de Cp igual a 0,59:

$$P_{teórica} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \cdot C_p$$

$$P_{teórica} = \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 0,017 \cdot 6^3 \cdot 0,59$$

$$P_{teórica} = 1,35 \text{ watt}$$

Considerando a situação 2, podemos calcular a potência possível de ser reaproveitada pela turbina eólica desenvolvida considerando Cp = 30% e v = 5,3 m/s (velocidade na entrada da tubulação, medida com o anemômetro).

$$P_{real} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \cdot C_p$$

$$P_{real} = \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 0,017 \cdot 5,3^3 \cdot 0,3$$

$$P_{real} = 0,47 \text{ watt}$$

Já na situação 3, considerando $C_p = 30\%$ e $v = 4,7 \text{ m/s}$ (velocidade na entrada da tubulação, medida com o anemômetro), iremos calcular a potência para uma condição em que a turbina possui tubulação posterior.

$$P_{real} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \cdot C_p$$

$$P_{real} = \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 0,017 \cdot 4,7^3 \cdot 0,3$$

$$P_{real} = 0,33 \text{ watt}$$

Analisando estes resultados e considerando apenas o caso em que temos a maior geração de energia (situação 2), podemos interpretar a eficiência da turbina através da seguinte relação:

$$Eficiência = \frac{0,47 \cdot 100}{1,35}$$

$$Eficiência = 34,81\%$$

A análise da velocidade do fluxo de fluido nos leva aos seguintes resultados:

- Velocidade do ar na saída do exaustor sem a turbina – 5,3 m/s
- Velocidade do ar na saída do exaustor com a turbina – 4,7 m/s

Logo:

$$x = \frac{4,7 \cdot 100}{5,3}$$

$$x = 88,67\%$$

Logo, o acréscimo da turbina no sistema reduz a velocidade na entrada na ordem de 11,33%, interferindo na vazão final do sistema. No entanto, ao analisarmos a

interferência na pressão dinâmica do fluxo de ar, utilizando a Equação 4 e tomando como referência a média da pressão obtida da Tabela 1, obtemos o seguinte resultado:

Sem turbina:

$$\Delta P = \frac{10^2 \cdot 1,663785 \cdot Q^{1,85} \cdot Lt}{d^5 \cdot P}$$

$$\Delta P = \frac{10^2 \cdot 1,663785 \cdot 0,102^{1,85} \cdot 0,9}{150^5 \cdot 0,189}$$

$$\Delta P = 5,460 \cdot 10^{-15} \text{bar}$$

Com acréscimo da turbina:

$$\Delta P = \frac{10^2 \cdot 1,663785 \cdot Q^{1,85} \cdot Lt}{d^5 \cdot P}$$

$$\Delta P = \frac{10^2 \cdot 1,663785 \cdot 0,090^{1,85} \cdot 0,9}{150^5 \cdot 0,030}$$

$$\Delta P = 6,9363 \cdot 10^{-16} \text{bar}$$

Logo:

$$x = \frac{0,6963 \cdot 100}{5,460}$$

$$x = 12,75\%$$

A análise destes resultados nos revela uma perda de carga da ordem de 12,75%. Utilizando uma turbina similar a esta no meio industrial, precisamos nos ater a sua aplicação, pois os resultados obtidos podem ser significativos quando precisamos analisar o transporte de materiais por meio de vácuo, por exemplo, mas relativamente baixo quando estamos analisando apenas a circulação de ar no ambiente, podendo vir a se tornar uma interessante opção ao reaproveitamento energético que, normalmente, é desperdiçado para a atmosfera.

Em resumo, ao acrescentarmos a turbina no sistema foi possível reaproveitarmos teórico de 34,81% da energia de um equipamento de ventilação forçada, no entanto, precisamos arcar com uma redução na pressão de 12,75% e redução na vazão na ordem de 11,33%, o que pode interferir na produtividade da empresa caso não seja feita uma análise de custo / benefício.

7. CONCLUSÃO

Quando compreendemos melhor os fenômenos físicos que agem sobre determinada condição estudada, muita informação começa a ser obtida e incógnitas começam a serem esclarecidas, no entanto, outras lacunas tendem a surgir. Este trabalho possibilitou aprofundar conhecimentos tanto em áreas de pesquisa teórica como de ensaios laboratoriais, integrando a teoria e a prática com resultados de extrema relevância para o meio acadêmico e industrial.

Ao serem analisados os resultados obtidos e levando em consideração as diferentes condições de ensaio, chega-se à conclusão de que a alteração na pressão atinge variações inferiores à 12,75% em pontos distintos da tubulação, minimizando a interferência em sua eficiência e podendo validar a possibilidade de implementação deste projeto nas atuais empresas que possuem ventilação forçada. Vale ressaltar que os resultados obtidos através dos ensaios apontam para a possibilidade de reaproveitamento de 34,81% da energia utilizada na geração do fluxo de ar na tubulação.

Supondo aplicarmos este equipamento em uma empresa que utilize motores que consomem cerca de 200 kw de potência para a geração de vácuo em seus sistemas de transporte, poderíamos recuperar cerca de 69,62 kw para reutilizarmos na planta energética da empresa.

Estes resultados auxiliam quando da necessidade de avaliarmos a viabilidade de implementação de um sistema de reaproveitamento de energia, contudo, investimento em materiais não mencionados neste trabalho, como acumuladores de energia, indispensáveis para sua funcionalidade, podem fazê-lo oneroso inicialmente e acabar por afastar investidores.

Por fim, este trabalho pode estender sua contribuição para futuras pesquisas no meio acadêmico ou mesmo industrial, sendo que o realizado até o momento é o início de um trabalho que pode ser precedido por pesquisas relacionadas, por exemplo, aos perfis de pás, modelagens em impressoras 3-D e posterior ensaio em laboratório, materiais a serem utilizados, dimensionamento de células de armazenamento de energia, dentre outras.

REFERÊNCIAS

- AFONSO, M. A. G. D. Sistema de monitorização de condições meteorológicas e correlação com produção renovável de energia. Dissertação de Mestrado. Apresentado a Universidade Nova de Lisboa. 2010.
- ALTERIMA, website, disponível em www.alterima.com.br, acesso em 21/12/2013.
- ALVES, E. D. Energia renovável: um salto na evolução? Ecodebate. Rio de Janeiro. 2010.
- BAGARELLO, V.; FERRO, V.; PROVENZANO, G.; PUMO, D. Experimental study on flow-resistance law for small-diameter plastic pipes. J. Irrig. Drain. E. - ASCE, New York, Vol. 121, N° 5, p. 313-316, 1995.
- BERNUTH, R.D. von. Discussion of "Hydraulic friction factors for pipe flow". J. Irrig. Drain. E. - ASCE, New York, v. 115, N° 5, p. 916-918, 1988.
- BRASIL, A. N. Máquinas Termohidráulicas de Fluxo. Minas Gerais. 2006.
- BRUNI, C. A. Otimização de sistema de bombeamento com energia eólica: Sistema de bombeamento de são Gabriel-BA. Dissertação de Mestrado submetida e aprovada junto a Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal. 2007.
- CALEFFI, P. V. Transporte e Mobilização na Amazônia. Simpósio apresentado a Revista Administração, Negociação, Logística e Transporte, Vol. 6, 2003.
- CARDOSO, G. G. G.; FRIZZONE, J. A.; REZENDE, R. Fator de Atrito em tubos de polietileno de pequenos diâmetros. Acta Sci. Agron. Maringá. Vol. 30, N° 3. p. 299-305, 2007.
- CECÍLIO, A. P. Modelagem e análise de desempenho dinâmico de complexos elétricos contendo centrais eólicas dotads de geradores síncronos. Tese de doutorado apresentada a Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia. 2007.
- CHOPARD, B., DROZ, M. Cellular Automata modeling of physical systems. Cambrdiger University Press, 341 p. (Collection Aléa-Saclay: Monographs and text in Statistical Physics). 1998.
- DUTRA, M. R. Propostas de Políticas Específicas para Energia Eólica no Brasil após a 46 Primeira Fase do PROINFA. Rio de Janeiro. 2008.

ELEGNANESE, website, disponível em www.museoindustrialelegnanese.it, acesso em 21/12/2013.

FIALHO, A. B. Automação Pneumática. 7ª Edição. Editora Érica. 2012.

FISICA, website, disponível em www.física.com.br, acesso em 19/12/2013.

GABRIEL FILHO, L. R. A.; CREMASCO, C. P.; SERAPHIM, O. J.; CANEPPELE, F. L. Caracterização analítica e geométrica da metodologia geral de determinação de distribuições de Weibull para o regime eólico e suas aplicações. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, Vol. 31, p. 56-66, 2011.

GAMA, S. Introdução à ciência e tecnologia do vácuo, Campinas, SP, Brasil. 2002.

GIZMODO, website, disponível em www.gizmodo.com, acesso em 14/12/2013.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energia e meio ambiente no Brasil. Estudos Avançados, Vol. 21, N° 59, p.7-20, 2007.

HAU, E. Wind turbines – fundamentals, technologies, application and economics. 2ª edição, Editora Germany, 2006.

HENN, E. A. L. Máquinas de Fluido. 2ª Edição. Editora da UFSM. 2006.

HORN, D. A. Análise numérica da esteira aerodinâmica formada por uma turbina eólica com dimensionamento ótimo de Betz. Dissertação apresentada junto a Universidade Federal do Rio Grande do Sul para obtenção do título de Mestre. Porto Alegre. 2010.

HOSOTANI, K. The QC problem solving approach: solving workspace problems the japanese way. Tokio: 3A Corporation, 1992.

ISHIKAWA, K. TQC – Total Quality Control: estratégia e administração da qualidade. Trad. Mário Nishimura. São Paulo: IMC, 1986.

LEITE, A. P.; BORGES, C. L. T.; FALCÃO, D. M. Modelagem de usinas eólicas para estudos de confiabilidade. Controle e Automação, São Paulo. Vol. 17. N° 2. p. 177, jun. 2006.

MACINTYRE, A.J. Máquinas motrizes hidráulicas. Rio de Janeiro: Guanabara Dois. p. 654. 1983.

MARCONATO, M. S.; SANTINI, G. A. Alternativas para geração de energia renovável no Brasil: a opção pela biomassa. Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural, Rio Branco. 2008.

MARTINS, F. R.; GUARNIERI, R. A.; PEREIRA, E. B. O aproveitamento da energia eólica. Ensino de Física, São Paulo. Vol. 30. N° 1. p. 1304, 2008.

MARTINS, J. R.; MARTINS S. L. Conduitos forçados: Instalações de recalque. Hidráulica e Equipamentos Hidráulicos, São Paulo. 2004

MELLO, J. A turbina de fluxo cruzado (Michell-Banki), como opção para centrais hidráulicas de pequeno porte. Dissertação de Mestrado. Apresentado no IEE da USP. São Paulo. 2000.

MELO N.; FRANCISCO P.; FROES, C. Gestão da responsabilidade social corporativa: O caso brasileiro. Da filantropia tradicional à filantropia do alto rendimento e ao empreendedorismo social. Rio de Janeiro. 1ªed. Editora Qualitymark. 2001.

MEMBERS, website, disponível em <http://members.tripod.com>, acesso em 14/12/2013.

NASCIMENTO, T. C.; MENDONÇA, A. T. B. B.; CUNHA, S. K. Inovação e sustentabilidade na produção de energia: o caso do sistema setorial de energia eólica no Brasil. Cadernos EBAPE.BR, Rio de Janeiro. Vol.10. N° 3. p. 631. 2012.

ORIBE, C. Y. PDCA: origem, conceitos e variantes dessa ideia de 70 anos. Minas Gerais. Qualypro. 2009.

PAIVA, J. A. Aplicação da tecnologia do vácuo em projeto de engenharia de precisão. Paraíba. 2010.

PAULO, J. A. R. Construção, desenvolvimento e otimização de concentrador e difusor para turbina eólica. Dissertação de Mestrado. Apresentada no Instituto Politécnico de Bragança. Bragança, Portugal. 2013.

PLANETSEED, website, disponível em www.planetseed.com, acesso em 14/12/2013.

REDHEAD P. A.; HOBSON J. P.; KORNELSEN E. V. The physical basis of ultrahigh vacuum. American Vacuum Soc. Classics, American Institute of Physics, EUA. 1993.

REIS, L. B. Geração de Energia Elétrica. 2 ed. Barueri: Editora Manole, 2011.

RETTORE N. O.; FRIZZONE, J. A.; MIRANDA, J. H.; BOTREL, T. A. Perda de carga localizada em emissores não coaxiais integrados a tubos de polietileno. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, Vol.29, N° 1, p.28-39, 2009.

RYANS, J.L.; ROPER, D.L. Process Vacuum System Design and Operation, Ed. MacGraw-Hill, EUA, p. 354. 1986.

SANDIA, website, disponível em www.sandia.gov, acesso em 15/12/2013.

SAUNDERS, S.; BROWN, H. R. The Philosophy of Vacuum. Oxford University Press. 1991.

SKYSCRAPERCITY, website, disponível em www.skyscrapercity.com, acesso em 16/12/2013.

SOARES, A. B.; ANDRADE, A. J. C.; VIANA, D. M.; FERREIRA, J. A. Previsão de vida à fadiga e confiabilidade das pás de uma hidroturbina Kaplan. Minas Gerais. 16ª POSMEC. 2006.

SONNAD, J. R.; GOUDAR, C. T. Turbulent flow friction factor calculation using a mathematically exact alternative to the Colebrook-White equation. Journal of Hydraulics Engineering. New York, Vol. 132, N° 8, p. 863-867, 2006.

SGUAREZI, A. J. F.; CASELLA, I. R. S; CAPOVILLA, C. E.; RUPPERT, E. Controle deadbeat codificado sem fio de potências para aerogeradores de indução duplamente alimentados visando aplicações em redes inteligentes. Controle e Automação, São Paulo. Vol. 23. N° 5. p. 541-542, out. 2012.

SUPRINYAK, C. E. Torricelli, energia a vapor e o sentido tecnológico da Revolução Científica. Minas Gerais. Revista de Economia Política, vol. 29, nº 2. 2009.

TIEDEMANN, Peter W.. Conteúdos de química em livros didáticos de ciências. Ciênc. educ. (Bauru) [online]. 1998, vol.5, n.2, pp. 15-22. ISSN 1516-7313.

TONSDOMATO, website, disponível em www.tonsdomato.com.br, acesso em 20/12/2013.

VASCONCELOS, A. C. O número de Reynolds e a flambagem da água. São Paulo. Rev. TQS. Ed. N° 36, 2013.

VERKA, website, disponível em www.verka.com.br, acesso em 21/12/2013.

VERTCHENKO, L.; DICKMAN, A. G.; FERREIRA, J. R. F. Transferência de fluido por meio de um sifão vs. aplicação da equação de Bernoulli. Rev. Bras. Ensino Fís. [online]. Vol.31, n.3, pp. 3301.1-3301.7. 2009.

VILELA, L. A. A.; SOCCOL, O. J.; GERVÁSIO, E. S.; FRIZZONE, J. A.; BOTREL, T.A. Alteração no diâmetro de tubos de polietileno submetidos a diferentes pressões. Rev. Bras. Eng. Agric. Ambient., Campina Grande, Vol. 7, N° 1, p. 182-185, 2003.

WIKIPEDIA, website, disponível em www.wikipedia.org, acesso em 21/12/2013.

ZECHIM, M. J. C. Atividades práticas e experimentais para uma aprendizagem significativa em ciências. Paraná. Artigo científico apresentado a Universidade Estadual do Norte do Paraná. 2009.

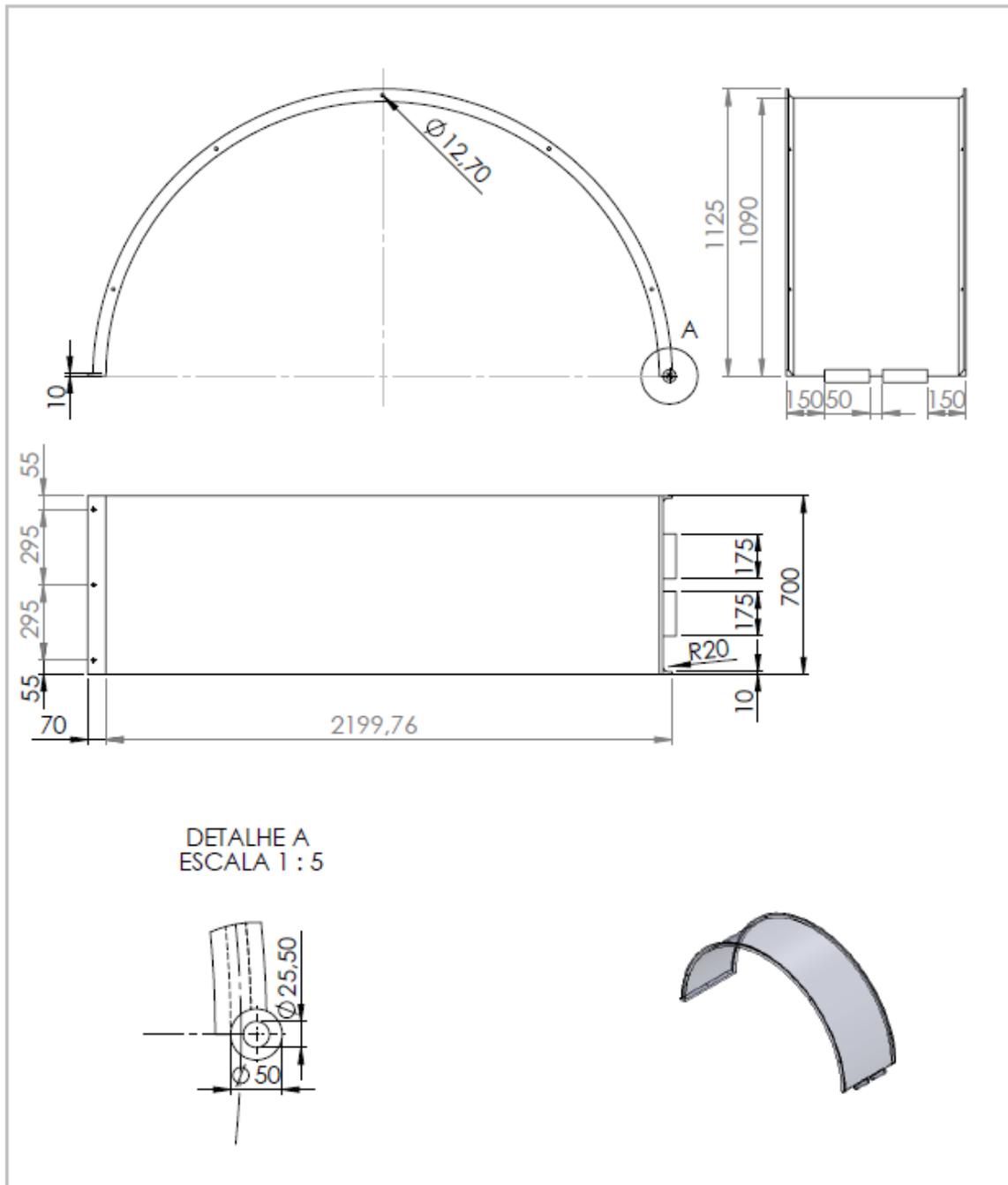
YOO, D.H.; SINGH, V.P. Two methods for the computation of commercial pipe friction factors. J. Hydraul. Eng. - ASCE, New York, v. 131, N° 8, p. 694-704, 2005.

APÊNDICE A - Montagem

Nº DO ITEM	Nº DA PEÇA	DESCRIÇÃO	QTD.
1	1	Supporte Superior	1
2	2	Pino da drobrodica	1
3	3	Supporte Inferior	1
4	4	tubo de ar	2
5	5	Rotor	1
6	6	Anel de fixação dos rolamentos	2
7	7	pino para fixar o rolamento	10
8	8	Rolamento	10
9	9	Tampa Superior	1
10	10	Supporte do motor	1
11	11	Parte externa do motor	1
12	12	Tampa do motor	1
13	13	Rotor do motor	1
14	14	Parte interna do motor	1
15	15	Polia	1
16	16	Correia	1

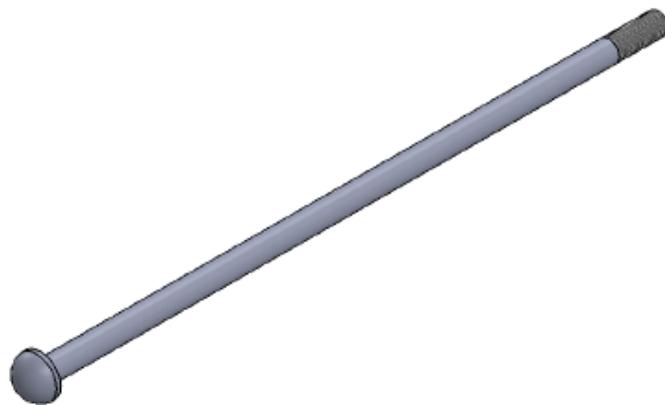
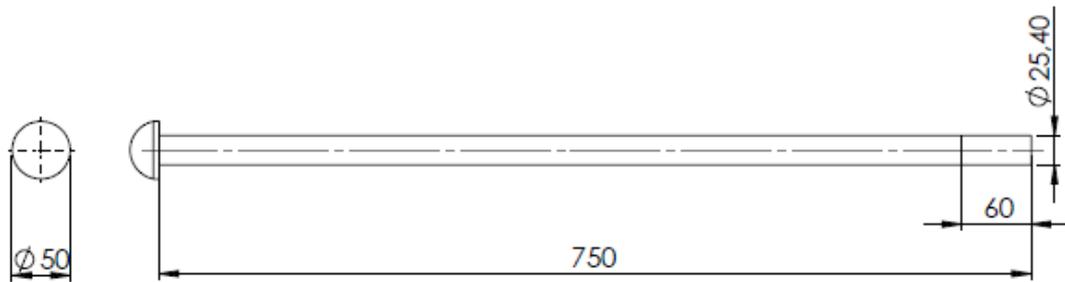
DESENHO EXECUCO DIMENSOES EM MILIMETROS ACABADA SUPERFICIE TOLERANCIAS UNIDADES ANGULARES		ACABAMENTO		RESISTAS E CILINDROS ADICIONAIS		TITULO	
DESL. VISEL. APONH. MANUSEI. QUALIC.	ASSINATURA DATA					Apêndice A - Turbina	
MATERIAL:				DES. Nº		A3	
FICHA:				ESCALA: 1:50		FOLHA: 1 DE 1	

APÊNDICE B – Suporte Superior



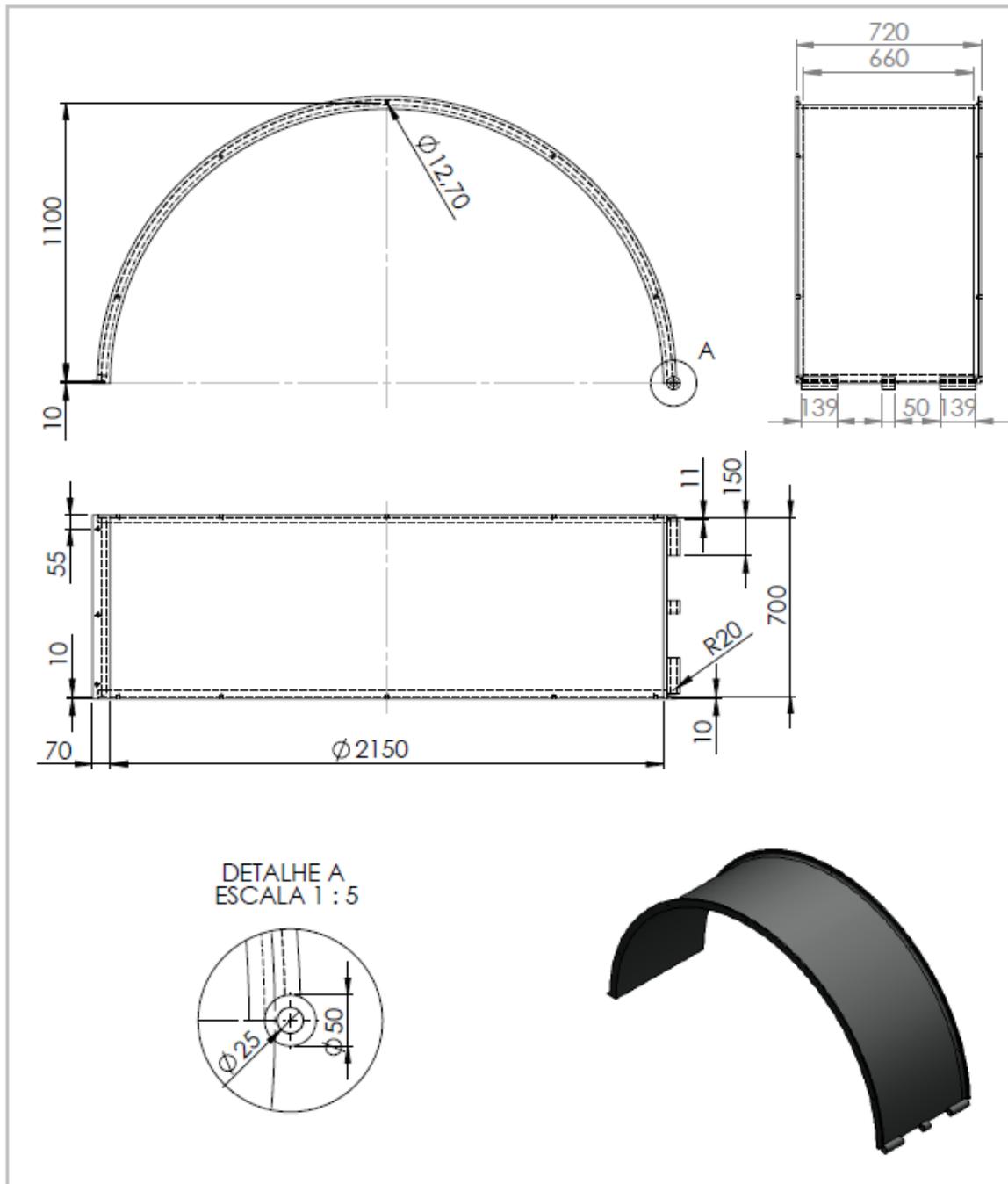
SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:		ACABAMENTO:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO		REVISÃO		
DES.	NOME	ASSINATURA	DATA	MATERIAL:	TÍTULO: Suporte Superior				DES. Nº	A4
VERIF.				Policarbonato	Anexo B					
APROV.				PESO:	ESCALA: 1:20				FOLHA 1 DE 1	
MANUF.										
QUALID.										

APÊNDICE C – Pino da Dobradiça



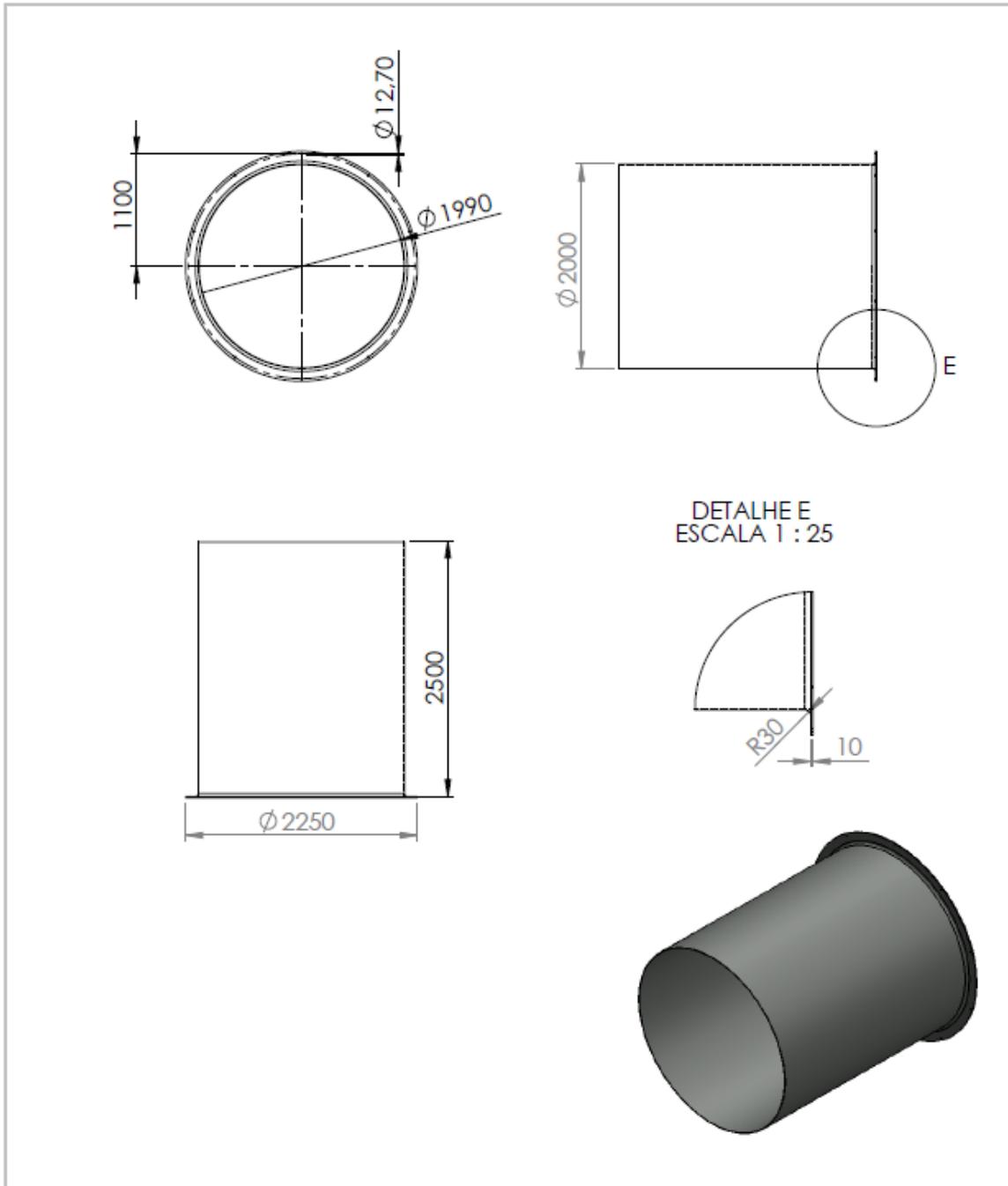
SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:		ACABAMENTO:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO		REVISÃO	
DES.	NOME	ASSINATURA	DATA			<h3 style="margin: 0;">Pino da Dobradiça</h3>			
VERIF.									
APROV.									
MANUF.									
QUALID.									
				MATERIAL: Aço 1020		DES. Nº Anexo C		A4	
				FBSO:		ESCALA: 1:5		FOLHA 1 DE 1	

APÊNDICE D – Suporte Inferior



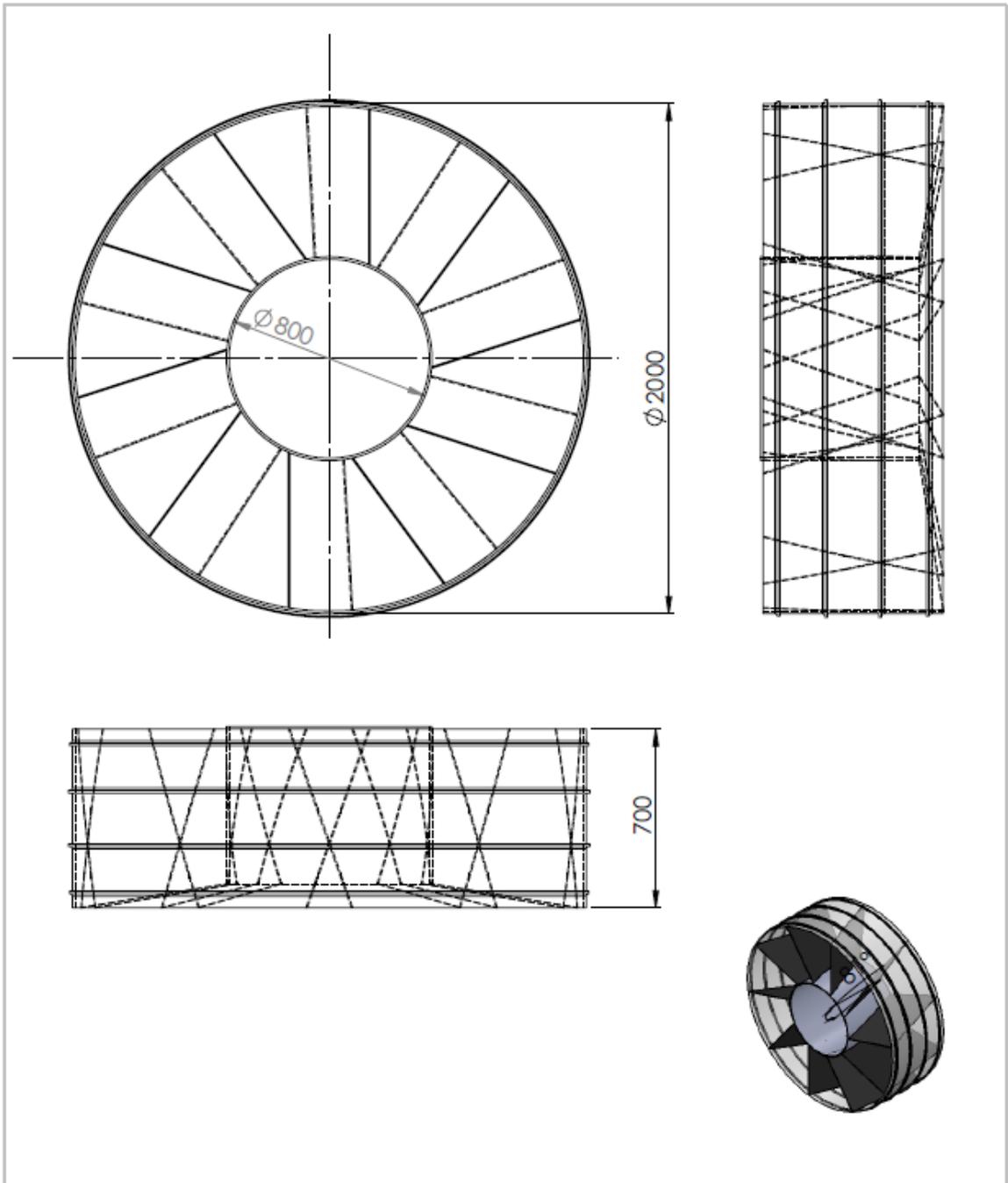
SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFICIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:		ACABAMENTO:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO		REVISÃO	
DES.	NOME	ASSINATURA	DATA			<h1 style="margin: 0;">Suporte Inferior</h1> <h2 style="margin: 0;">Anexo D</h2>			
VERIF.									
APROV.									
MANUF.									
QUALID.									
				MATERIAL: Aço 1020		DES. Nº A4			
				PESO:		ESCALA: 1:20		FOLHA 1 DE 1	

APÊNDICE E – Tubo de Ar



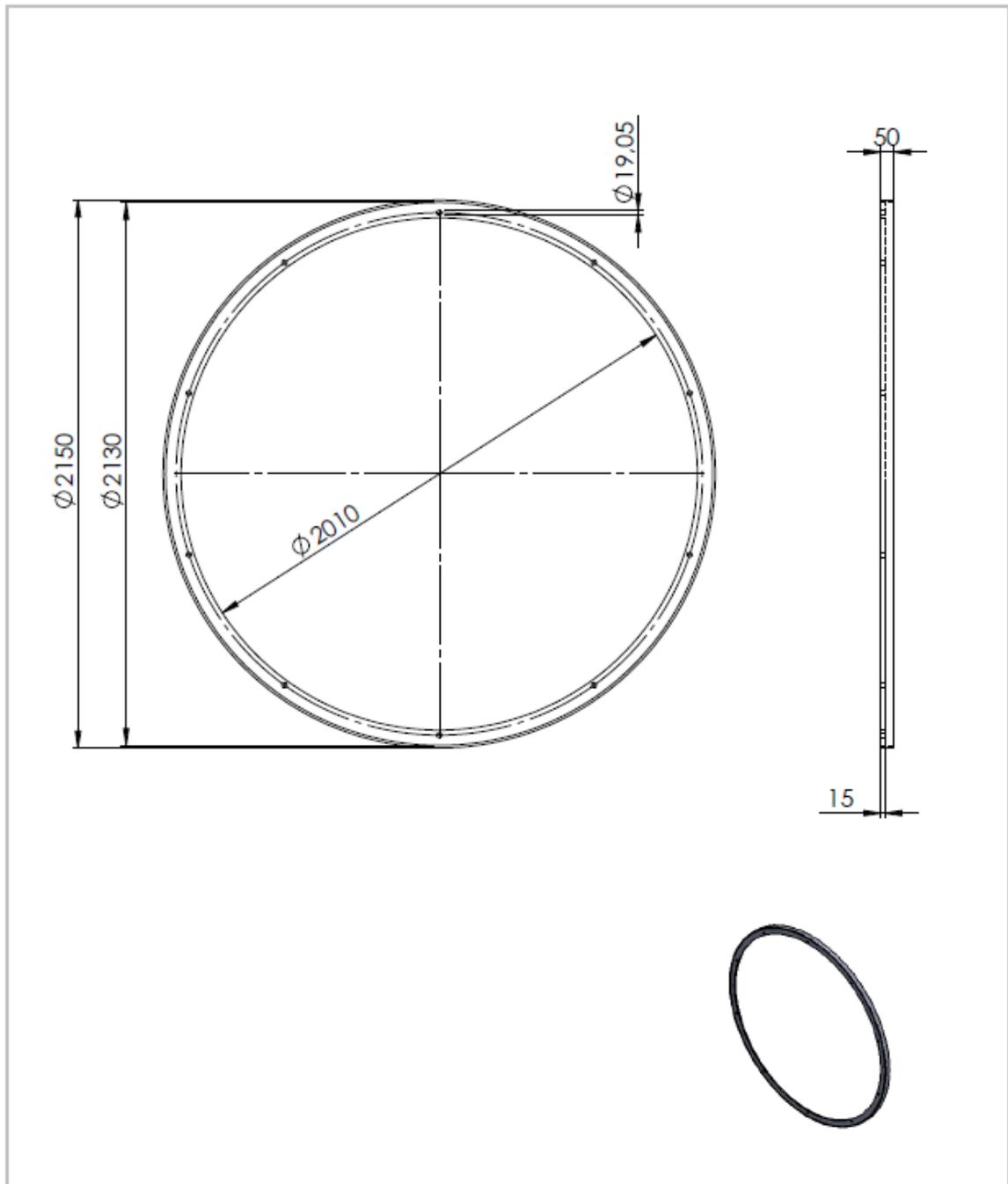
SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:		ACABAMENTO:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO		REVISÃO	
DES.	NOME	ASSINATURA	DATA			<h1 style="margin: 0;">Tubo de Ar</h1> <h2 style="margin: 0;">Anexo E</h2>			
VERIF.									
APROV.									
MANUF QUALIC									
				MATERIAL: <h3 style="margin: 0;">Aço 1020</h3>		DES. Nº <h3 style="margin: 0;">A4</h3>			
				PESO:		ESCALA: 1:50		FOLHA 1 DE 1	

APÊNDICE F - Rotor



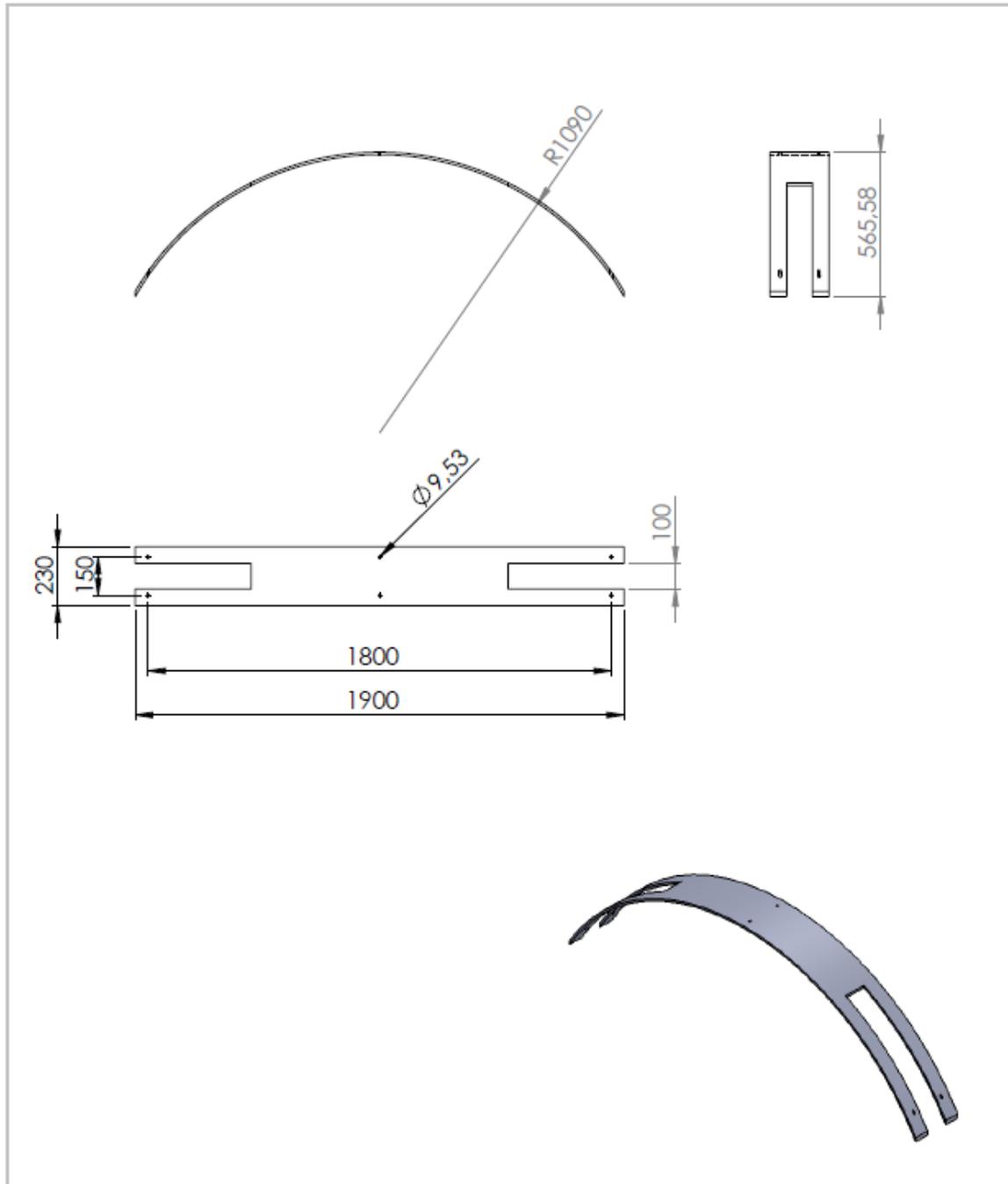
SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:			ACABAMENTO:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO		REVISÃO		
DES.	NOME	ASSINATURA	DATA				<h1 style="margin: 0;">Rotor</h1> <h2 style="margin: 0;">Anexo F</h2>				
VERIF.											
APROV.											
MANUF.											
QUALIC.				MATERIAL: Aço 1020 e Policarbonato		DES. Nº		A4			
				PESO:		ESCALA: 1:20		FOLHA 1 DE 1			

APÊNDICE G – Anel de Fixação dos Rolamentos



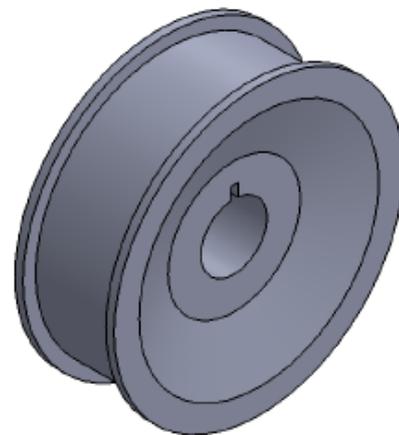
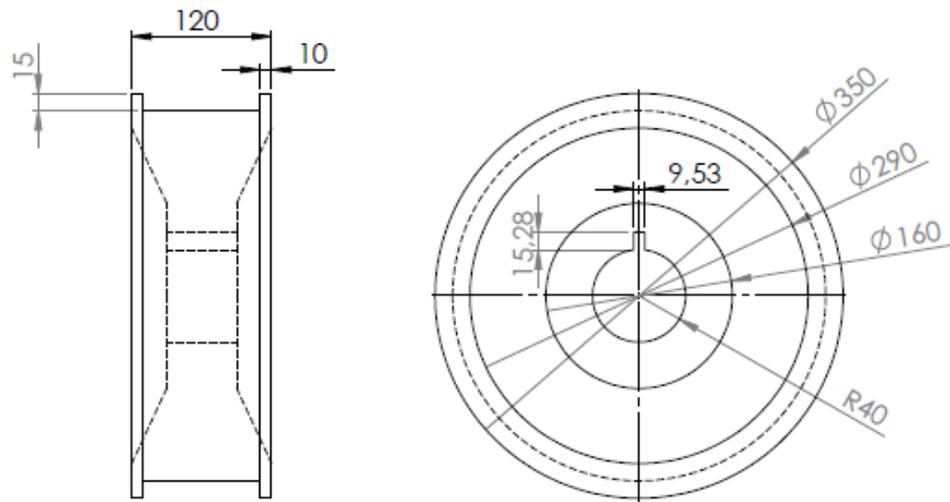
SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:		ACABAMENTO:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO		REVISÃO	
	NOME	ASSINATURA	DATA			TÍTULO: Anel de Fixação dos Rolamentos			
DES.						Anexo G			
VERIF.									
APROV.									
MANUF.									
QUALC.				MATERIAL: Aço 1020		DES. Nº		A4	
				PESO:		ESCALA: 1:20		FOLHA 1 DE 1	

APÊNDICE H – Tapa Superior



SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:		ACABAMENTO:	DEBUR AND BREAK SHARP EDGES	NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO	REVISÃO
DES.	NOME	ASSINATURA	DATA	TÍTULO: Tapa Superior	
VERIF.				DES. Nº Anexo H	
APROV					
MANUF				MATERIAL: Aço 1020	ESCALA: 1:20
QUALC				PESO:	FOLHA 1 DE 1

APÊNDICE I - Polia



SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:		ACABAMENTO:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO		REVISÃO	
DES.	NOME	ASSINATURA	DATA			TÍTULO: <h1 style="margin: 0;">Polia</h1>			
VERIF.									
APROV.									
MANUF.									
QUALIC									
				MATERIAL: Ferro Fundido		DES. Nº Anexo I		A4	
				PESO:		ESCALA: 1:5		FOLHA 1 DE 1	