



Desenvolvimento de um Protótipo de Microaerogeração para Fins Educacionais

Felipe Pires de Moraes

Dissertação apresentada à Escola Superior Agrária de Bragança em cumprimento parcial dos requisitos para o grau de Mestre em Tecnologia Ambiental

Orientadores

João Paulo Miranda de Castro

Escola Superior Agrária de Bragança

Manuel Feliciano

Escola Superior Agrária de Bragança

Bragança

Maió 2021

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Politécnico de Bragança, por todas as condições disponibilizadas para que eu pudesse realizar este trabalho tão enriquecedor para mim e para toda comunidade estudantil.

Aos professores João Paulo Miranda de Castro e Manuel Sabença Feliciano que não só motivaram, mas também orientaram e dispuseram de tempo e energia para realização deste estudo.

Aos demais professores e técnicos do IPB que contribuíram com elucidações técnicas, me inspiraram na execução de soluções práticas, e, foram fundamentais para o sucesso do projeto: Jorge Paulo e Abilio Marcelo, do laboratório de mecânica; Pedro Geraldês, do laboratório de elétrica; André Seca, do setor de manutenção do IPB, Leonardo Furst doutorando da ESA e aos demais que de alguma forma estiveram envolvidos com ideias, informações e artifícios criativos.

À minha família que me encorajou e deu imenso suporte para vir para Portugal e encarar com confiança mais uma etapa do meu percurso académico.

E por fim, à minha esposa, Larissa Amaral, que esteve ao meu lado em todos os momentos sempre com paciência, amor e alegria mesmo durante os difíceis tempos de pandemia que tivemos e foi capaz de compartilhar os incontáveis desafios que tivemos ao longo desta jornada.

Resumo

O presente estudo visou o desenvolvimento de um microaerogerador de energia elétrica, para colocar à disposição de atividades educativas de natureza tecnológica, capazes de proporcionar uma experiência prática enriquecedora para os alunos e que induza a compreensão de conceitos e aplicações de tecnologias de aproveitamento da energia eólica. Para tal, foi construído um micro aerogerador com recurso a componentes e ferramentas de disponíveis na instituição. A conceção do protótipo teve por base a aplicação de conceitos teóricos relacionados com o aproveitamento da energia cinética dos ventos e sua conversão em corrente elétrica, de modo a produzir um sistema portátil capaz de ser facilmente desmontado e transportado para avaliações, melhorias e futuras aplicações.

O protótipo com área de captação $A = 1,188 \text{ m}^2$ apresentou boa robustez e desempenho satisfatório, tendo atingido em velocidades rotacionais máximas acima das 600 RPM e, em média de 350 a 400 RPM, quando exposto a ventos compreendidos entre 2 e 3,5 m/s. O coeficiente de aproveitamento (C_p) estimado foi de 0,35. A geração de tensão elétrica superior a 1 V ocorre a partir de 250 RPM e alcança plena carga à volta de 850 RPM, sendo capaz de recarregar um telemóvel. Por fim, ficou à disposição do IPB um aerogerador que, ainda que necessite de inúmeros melhoramentos, servirá de base para aplicações educacionais e desenvolvimento de novos estudos sobre esta temática.

Palavras-chave: Construção de protótipo, microaerogerador, tecnologia eólica, educação tecnológica.

Abstract

The following study intends to develop a micro wind turbine by a practical experience which induces the understanding of concepts and applications of wind energy technologies and also, be available for education and technological learning. For this, a small-scale prototype was established, its respective components and necessary tools so that the wind turbine system could be fully built and studied with the resources available at the IPB. The prototype was designed by applying theoretical concepts wind kinetic energy harnessing and its conversion into electric current, in order to build a portable system capable of being dismantled and transported for evaluation and improvements.

The prototype with swept area $A= 1,188 \text{ m}^2$ has shown strength and satisfactory performance, on average operated between 350 and 400 RPM when under winds ranging from 2 to 3,5 m/s and reached innumerous peaks over 600 RPM. The estimated power coefficient (C_p) was 0,35. The generation of electrical voltage greater than 1 V happens from 250 RPM and reaches full load around 850 RPM, being able to recharge a cell phone. Finally, a wind turbine has made available to IPB which, although needs several improvements, serves as a basis for new studies and developments around this technology.

Palavras-chave: Wind turbine, Wind Technology, Educational Practice

Índice

Resumo	iii
Abstract.....	iv
Lista de figuras	vii
Lista de tabelas	ix
1 Introdução.....	1
1.1 Objetivos.....	2
1.1.1 Objetivo geral	2
1.1.2 Objetivos específicos	2
2 Revisão Bibliográfica.....	3
2.1 Educação ambiental e energias renováveis.....	3
2.2 Educação e energias renováveis a nível universitário	4
2.3 Práticas laboratoriais como parte da aprendizagem.....	6
2.4 Cenário atual de aproveitamento eólico.....	7
2.5 Produção descentralizada em Portugal	8
2.6 Energia eólica em Portugal	10
2.7 Impactos Ambientais da Energia Eólica.....	11
2.8 Aproveitamento dos ventos	12
2.8.1 Potência eólica.....	13
2.8.2 Área varrida pelo rotor	14
2.8.3 Coeficiente de aproveitamento – limite de Betz.....	14
2.8.4 Velocidade de ponta	15
2.8.5 Velocidade do vento	17
2.8.6 Rugosidade e obstáculos da superfície	17
2.9 Tipos de turbinas.....	18
2.9.1 Pás e aerodinâmica	20
3 Material e métodos	22

3.1	Descrição metodológica geral.....	22
3.2	Produção dos componentes do aerogerador.....	22
3.2.1	As pás da turbina	22
3.2.2	Volante de rotação	25
3.2.3	Motor gerador de corrente elétrica	29
3.2.4	Circuito elétrico	30
3.2.5	Leme	32
3.2.6	Haste vertical de sustentação	32
3.3	Montagem do aerogerador	33
3.4	Avaliação de desempenho mecânico	34
3.5	Avaliação de desempenho elétrico	36
4	Resultados e discussão	37
4.1	Desempenho mecânico	37
4.2	Desempenho elétrico.....	41
5	Conclusões	43
6	Referências bibliográficas	45
7	Anexos.....	50
7.1	Anexo 1 – <i>Data sheet</i> do regulador de tensão	50
7.2	Anexo 2 – Registo de velocidade de vento (m/s) e de regime do rotor (RPM).....	52

Lista de figuras

Figura 1 - Comparativo energias renováveis em Portugal.	11
Figura 2 – Relação: coeficiente de aproveitamento e taxa de velocidade de ponta	16
Figura 3 – Turbina eólica.....	19
Figura 4 – Turbina eólica artesanal	19
Figura 5 – Forças atuantes sobre as pás.....	21
Figura 6 – Curvatura da pá	21
Figura 7 – Tubo de PVC comprimento 1 m	23
Figura 8 – Espessura de parede 3,5 mm	23
Figura 9 – Tubo fixado e primeiro corte.....	23
Figura 10 – Cortes laterais.....	23
Figura 11 – Ilustração do corte das pás	24
Figura 12 – Corte frontal das pás	24
Figura 13 – Corte para acabamento de encaixe das pás	24
Figura 14 – Vista superior acabamento	25
Figura 15 – Corte frontal acabamento	25
Figura 16 – Pás prontas	25
Figura 17 – Acabamento de borda.....	25
Figura 18 – Lingote de alumínio	26
Figura 19 – Disco de alumínio cortado	26
Figura 20 – Esquadro de centro utilizada na divisão das 4 partes iguais do volante.....	27
Figura 21 – Volante de rotação com furo central	27
Figura 22 – Volante de rotação, pronto para aplicação no sistema	27
Figura 23 – Adaptação para unir volante de rotação no eixo do motor.....	28
Figura 24 – Parafuso acoplado no sistema	28
Figura 25 – Pás fixadas com apenas 1 parafuso	28
Figura 26 – Distância equivalente entre extremidades das pás	29
Figura 27 – Turbina montada	29
Figura 28 – Motor com o parafuso de encaixe no eixo de rotação.....	30
Figura 29 – Circuito eletrónico.....	31
Figura 30 - Componentes eletrónicos	31
Figura 31 - Ferro de soldar	31

Figura 32 - Circuito eletrónico instalado.....	32
Figura 33 – Carcaça de computador	32
Figura 34 – Leme.....	32
Figura 35 – Haste reaproveitada.....	33
Figura 36 – Detalhe do encaixe no suporte	33
Figura 37 – Montagem	34
Figura 38 – Aerogerador montado.....	34
Figura 39 – Vista geral do aerogerador	34
Figura 40 – Teste mecânico, aerogerador e anemómetro do IPB.....	35
Figura 41 – Medição do regime do rotor (RPM).....	36
Figura 42 - Teste elétrico.....	36
Figura 43 - Potência eléctrica estimada.....	38
Figura 44 – Gráfico de sensibilidade ao vento	39
Figura 45 – Gráfico de variação da velocidade do vento	39
Figura 46 – Gráfico de tensão eléctrica em função do regime do rotor (RPM)	42

Lista de tabelas

Tabela 1 – Classificação de pequenos aerogeradores.....	20
Tabela 2 – Regime do rotor (RPM) e Tensão eléctrica (V).....	41

1 Introdução

A educação ambiental é o ponto inicial do desenvolvimento das energias renováveis. No ambiente académico os estudos teóricos e práticos representam o centro da consciencialização e evolução tecnológica do tema.

A aprendizagem tecnológica se dá não somente pelos estudos teóricos, mas também por experimentação prática que ocorre sob certas condições, processos e resultados que representam, por sua vez, uma vivência de desafios, acertos e erros capazes de gerar uma nova consciencialização do aluno.

Os desafios energéticos atuais e várias questões ambientais, como a geração de resíduos e mudanças climáticas, exigem cada vez mais estudos voltados para soluções locais que sejam exequíveis e ao alcance de todos.

Entende-se que o ensino através da experimentação prática se revela como uma alternativa para o desenvolvimento criativo de soluções adequadas às condições e características da localidade.

No âmbito do ensino voltado para as questões ambientais, delineou-se a construção de uma microturbina eólica de energia elétrica de baixo custo. Um sistema que utilizasse materiais de sucata, com pouco investimento, que possa ser efetivamente produzido com os recursos disponíveis nos laboratórios do Instituto Politécnico de Bragança, e que possa ser montado e desmontado pelos alunos. Finalmente, para servir de base para o desenvolvimento de estudos futuros em torno desta tecnologia.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Este trabalho visou conceber e construir um protótipo de microaerogerador de energia elétrica de baixo custo no Instituto Politécnico de Bragança, de modo a promover-se o desenvolvimento de práticas laboratoriais e de campo no âmbito das Ciências, Engenharia e Educação Ambientais

1.1.2 Objetivos específicos

- Estabelecer uma prática laboratorial que sirva de aprendizagem para este e futuros estudos relacionados com as energias renováveis
- Conceber um protótipo de baixo custo valendo-se de recursos já disponíveis no IPB
- Avaliar a possibilidade de elaboração com materiais reaproveitados.
- Produzir o protótipo gerador de energia.
- Analisar o desempenho do protótipo desenvolvido
- Identificar as possibilidades de uso e aplicação do equipamento.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Educação ambiental e energias renováveis

A educação ambiental possui suma importância no desenvolvimento das energias renováveis, é o início do processo de conscientização social a respeito da importância das fontes renováveis, promove o estabelecimento de valores e ações que contribuem na solução dos desafios através de práticas educativas, sociais e culturalmente compatíveis (BALLESTEROS, 2019).

A educação sobre energias renováveis é aplicável a vários níveis educacionais: ensino primário, secundário e superior, educação tecnológica e de engenharia, bem como em políticas ambientais e educacionais, promotores de projetos, investidores e governantes (JENNINGS e LUND, 2001).

Modelos de aprendizagem baseados em diálogos e práticas interativas aumentam a capacidade de reflexão sobre a ciência, e, neste contexto, o meio sociocultural e político exige esta transformação das relações entre tecnologia e sociedade (KANDPAL e GARG, 1992).

No que se refere à educação sobre meios de produção energética, observa-se que de modo geral a sociedade está orientada para modelos centralizados e organizados em redes de distribuição normalmente controladas por grandes corporações detentoras das tecnologias. No entanto, Thomas Edison, famoso pela grande participação na invenção da lâmpada elétrica séculos atrás, sustentava experiências assentes em modelos descentralizados de microgeração de energia nos arredores de Nova Iorque (WILSDON e WILLIS, 2004).

A união entre a visão da microgeração com as tecnologias de matriz renovável, estabelece uma rota clara na solução das recorrentes crises energéticas e mudanças climáticas. Contudo os sistemas de diversos meios de microgeração são consideravelmente diferentes nos âmbitos: social, institucional e tecnológico dos sistemas em grande escala atuais, e portanto requerem estudos que permitam, não apenas a interação com modelos de geração convencionais, mas também a independência destes e de recursos naturais limitados (SCHUMACHER, 1973).

Na configuração atual, a ciência e educação encontram-se sob a pressão de duas simultâneas crises: uma que se refere à confiança pública produzida pela ciência e as suas instituições, e outra, a governança sobre os estudos científicos e à consequente reprodutibilidade e implementação dos resultados (SALTELLI e FUNTOWICZ, 2017).

Portanto, face ao problema em questão, é fundamental que os estudantes desenvolvam habilidades na construção, instalação, operação e manutenção de tecnologias de produção energética de modo que a evolução destas tecnologias seja contínua e independente (THILANKA *et al*, 2015).

Neste contexto, é importante que os programas de educação para energias renováveis incluam (KANDPAL e BROMAN, 2016):

- A promoção da consciência ambiental frente aos desafios energéticos e aos impactos relacionados com as mudanças climáticas, segurança energética e problemáticas do uso dos combustíveis fósseis.
- O desenvolvimento de habilidades relativas ao uso de energias renováveis e às diferentes fontes renováveis existentes de acordo com cada localidade, como marés, ventos, geotermia, radiação solar. Sendo estes usos associados aos benefícios económicos e sociais.
- Motivação ao desenvolvimento e implementação de tecnologias renováveis de forma acessível e descentralizada.

2.2 Educação e energias renováveis a nível universitário

Após a conhecida crise do petróleo na década de 70, muitos cursos destinados ao conhecimento das energias renováveis passaram a ser disponibilizados pelas universidades e demais instituições de ensino. Desde então, estes cursos contendo currículos estruturados para as energias renováveis são cada vez mais apreciados. Enquanto em algumas instituições, o foco é a pesquisa geral sobre o tema, noutras, são oferecidos cursos que se destinam à aplicação e desenvolvimento de uma ou mais tecnologias específicas de produção de energia elétrica (ALAWIN *et al*, 2016).

O estudo das energias renováveis está diretamente associado aos aspectos relativos às mudanças climáticas, resíduos sólidos gerados, emissões atmosféricas, inovação e reaproveitamento de materiais e até mesmo à biodiversidade. No próprio Instituto Politécnico de Bragança, existe uma licenciatura de Engenharia de Energias Renováveis cujo objetivo é formar profissionais especializados na aplicação, integração e síntese das diversas tecnologias de energias renováveis nos diferentes e sensíveis setores da sociedade. Sendo este curso direcionado para o desenvolvimento de aplicações e sistemas, produção de soluções tecnológicas, gestão e comercialização de equipamentos e sistemas (IPB ESTIG, 2020).

No grau de mestrado existe o curso de Energias Renováveis e Eficiência Energética que tem por objetivo formar profissionais integrados na comunidade pan-europeia de energia que respondam às necessidades atuais e reconhecidas pela estratégia europeia de energia sustentável, é portanto, um curso com foco prático que, além de desenvolver as habilidades de aplicação e integração de tecnologias, pretende estimular a responsabilidade social sobre as soluções tecnológicas (IPB ESTIG, 2020).

Ainda no Instituto Politécnico de Bragança existem outras formações correlatas, tais como licenciatura em Educação Ambiental, mestrado em Educação Ambiental e mestrado em Tecnologia Ambiental que podem formar profissionais motivados para a atuação no ramo das energias renováveis (IPB ESE, 2020).

As graduações ofertadas a nível universitário são diversas e possuem caráter interdisciplinar que envolvem departamentos de mecânica, elétrica, química, física, ambiente, arquitetura e administração. Existem, por exemplo, cursos de administração de empresas com foco em energias renováveis, gestão de energias renováveis, negócios sustentáveis, gestão de edificações sustentáveis como foco em gestão energética, tecnologia e inovação energética entre outros tantos (WILSDON e WILLIS, 2004).

Existem programas de ensino à distância e presenciais, sendo estes os que garantem maior contacto do aluno com ferramentas práticas de desenvolvimento e implementação de tecnologias. A exemplo das oficinas de mecânica, elétrica e laboratórios de desenvolvimento que detêm instrumentos, materiais e maquinários que possibilitam a execução de experiências e fabricação de artefatos tecnológicos (IPB ESTIG, 2020).

A aprendizagem neste caso, ocorre principalmente pela criação de condições, processos e resultados que proporcionam ao estudante a experiência e compreensão do assunto estudado. Deste modo, as oficinas e laboratórios académicos representam uma fonte de ferramentas e recursos, que, mesmo sob condições controladas, possibilitam infinita geração de problemas e soluções a estudar (POZO, 1996).

Os temas abordados nos programas de ensino das energias renováveis são basicamente subdivididos em dois grandes grupos, o primeiro refere-se diretamente aos recursos e tecnologias, tais como: energias renováveis, tecnologias de células de hidrogénio, parques eólicos e demais matrizes energéticas (e.g., sol, marés e biomassa); o segundo é relativo à interação dos meios de produção energética com o ambiente, e as questões são a conservação da energia, desenvolvimento sustentável e gestão energética (KANDPAL e BROMAN, 2016).

De modo geral, os programas de ensino centrados na área tecnológica visam abordar os seguintes tópicos: conceitos básicos, modelação de componentes e sistemas, e, aspectos da produção, materiais, padronização, operação, manutenção e impactos ambientais. Em paralelo são abordados os assuntos de política e economia energética, de modo a que o estudante avance simultaneamente na aprendizagem tecnológica e na consciência social (BALLESTEROS, 2019).

2.3 Práticas laboratoriais como parte da aprendizagem

O processo de aprendizagem implica necessariamente condições, procedimentos e resultados, contrariamente à ideia da aprendizagem monótona que utiliza os mesmos padrões de estudos dirigidos, o ensino e aprendizagem admitem múltiplas variantes (POZO, 1996).

O conceito de aprendizagem completa não se baseia apenas num único mecanismo para transferência de conhecimento, mas sim num conjunto de atividades mentais e físicas capazes de realizar funções distintas (POZO, 1996).

Os alunos por sua vez, são capazes de assimilar o conhecimento transferido através de diferentes estilos de aprendizagem, são eles: o visual, o auditivo e o cinestésico, sendo este último relacionado à interação tátil e aos estímulos corporais e sensoriais do aluno diante de experimentos práticos (SALDANHA, 2016).

As atividades práticas realizadas em laboratórios têm papel importante na aprendizagem cognitiva, psicomotora e até mesmo afetiva. A interface entre alunos, materiais e ferramentas permite desenvolver a compreensão de conceitos e princípios científicos, estabelecer relações teóricas e práticas e estimula a elaboração de procedimentos para trabalhos experimentais. Em paralelo, a manipulação de ferramentas e materiais contribui com as habilidades de observação, análise e interpretação de resultados obtidos com as experiências realizadas. Por fim, esta aprendizagem em laboratório promove a construção das relações e atitudes humanas em função de trabalho em equipa (MILLAR, 2004).

As práticas experimentais relacionadas com conceitos científicos são fundamentais para a elucidação das tecnologias e procedimentos para aproveitamento e conversão de energia (NREL, 2007).

Os estudantes devem estar aptos a interpretar resultados experimentais e investigativos para posteriormente derivarem interferências úteis no âmbito tecnológico. Deve-se, portanto, estabelecer uma conexão entre os aspectos de geração, conversão transmissão, distribuição e

utilização de energia elétrica com os aspectos ambientais, económicos e sociais envolvidos (PELLEGRINO *et al*, 2001).

Os experimentos realizados em laboratório, embora estejam normalmente sob condições controladas, induzem os alunos a compreender relações entre as tecnologias e as características ambientais externas e demandas sociais da localidade em que estão inseridos. Estes experimentos, normalmente compostos por séries de tentativas, erros e acertos, encorajam as ideias e processos inovadores e, portanto, promovem o empreendedorismo. (DUNLOSKY *et al*, 2013).

Por fim, o resultado desta aprendizagem prática não está somente no desenvolvimento tecnológico, mas também numa nova conduta social dos estudantes à medida que aprimoram suas habilidades intelectuais, emocionais e motoras, o que reflete diretamente nas suas atitudes cotidianas (POZO, 1996).

2.4 Cenário atual de aproveitamento eólico

A humanidade enfrenta um enorme desafio nas próximas décadas, diante de uma sociedade consumidora de recursos naturais com quantidades limitadas, e os convergentes problemas das mudanças climáticas, o esgotamento da energia disponível e a degradação de inúmeros compartimentos ambientais levam à seguinte grande questão - que mecanismos de produção podem ser desenvolvidos para que o curso destes e outros problemas tome um novo rumo?

Mesmo com tantos modelos de previsão, sendo feitos e atualizados dia a dia, o futuro é incerto (IPCC, 2021). No entanto, existe a certeza de que uma nova trajetória deve ser tomada para evitar, ou ao menos reduzir, o colapso da natureza e sua sociedade consumidora.

Para tal, novos métodos de produção de bens, produção de energia elétrica e gestão económica, têm sido desenvolvidos, considerando os princípios da sustentabilidade, igualitarismo e cooperação (SDG, 2017).

Estes princípios, supramencionados, reconhecem que os problemas ambientais e sociais estão directamente ligados, e que os desafios existentes não são resolvidos quando os problemas são transferidos para outro compartimento ambiental, ou quando o são, há novos impactos negativos na natureza e na sociedade (SALTELLI e FUNTOWICZ, 2017).

Neste contexto, as cidades, que abrigam mais de 50% da população mundial, apresentam um enorme paradoxo urbano. Por um lado, possuem grandes centros económicos

e culturais, e por outro, possuem recursos naturais limitados que exigem cada vez mais e continuamente estes recursos naturais (EEA, 2020).

Este ambiente urbano ainda é dependente dos combustíveis de matriz fóssil para produção de bens e energia, inegavelmente um capital natural de quantidade limitada. Embora o seu uso e as suas realizações sejam muito rentáveis economicamente, o seu consumo não poderá ser eterno e, portanto, é nítido que os meios de produção e geração de energia devem depender cada vez menos deste recurso (GROSS, 2021).

A ilusão da energia ilimitada, nutrida pelo vasto conhecimento científico e suas realizações tecnológicas é sustentada por boa parte dos economistas ocidentais que entendem como bem-sucedido o atual sistema de produção, dado o crescimento do capital financeiro, no entanto esquecem que o capital natural, não produzido e não substituível, foi apenas “encontrado” e utilizado pelo homem, e sem este capital natural nada poderá ser feito. Este capital natural pode e deve ser utilizado num modelo descentralizado, de modo que cada localidade desenvolva suas próprias ferramentas e tecnologias de forma autónoma e possibilite o acesso a toda comunidade envolvida, não apenas aos mais favorecidos (NATIONAL GEOGRAPHIC, 2021).

Isto proporciona o desenvolvimento de soluções descentralizadas aliadas às questões culturais e fontes de recurso próprio libertando uma comunidade da necessidade de importar recursos e tecnologias externas que por vezes não satisfazem por completo as demandas existentes (HIESTER e PENNELL, 1983).

Diante deste cenário, entende-se que alternativas descentralizadas devem ser aplicadas às demandas de produção de bens e energia para que um novo rumo seja seguido. Para tal, é importante ressaltar que todos os atores do desenvolvimento devem estar conectados, isto é, deve haver fundamentalmente o incentivo e orientação do governo, as inovações desenvolvidas pelas instituições académicas e empresariais, e incorporação destes novos processos pela sociedade como um todo (IPCC, 2012).

2.5 Produção descentralizada em Portugal

Em Portugal já existem incentivos do governo para a produção descentralizada de energia elétrica. Dentro da estratégia nacional de energia 2020, estão previstas diretrizes para utilização de energias renováveis e geradas de forma descentralizada.

O Ministério da Economia, da Inovação e do Desenvolvimento, pelo decreto de lei n.º 34/2011 menciona: *“O Programa do XVIII Governo Constitucional estabelece que um dos objectivos para Portugal deve ser «liderar a revolução energética» através de diversas metas, entre as quais «afirmar Portugal na liderança global na fileira industrial das energias renováveis, de forte capacidade exportadora», e apostando na produção descentralizada de energia, simplificando os processos e procedimentos, facilitando a adesão dos cidadãos, empresas e outras entidades...”*.

Os regimes jurídicos da produção de eletricidade através de unidades de microprodução e de unidades de miniprodução constam do Decreto-Lei n.º 363/2007, de 2 de novembro, alterado pela Lei n.º 67-A/2007, de 31 de dezembro, e pelo Decreto-Lei n.º 118-A/2010, de 25 de outubro, e do Decreto-Lei n.º 34/2011, de 8 de março, respetivamente.

Estes diplomas estabelecem em moldes muito semelhantes os regimes remuneratórios aplicáveis às referidas formas de produção de eletricidade, bem como as correspondentes regras de relacionamento comercial. De acordo com estas leis, fica definido que a “miniprodução” é a atividade de pequena escala de produção descentralizada de eletricidade, recorrendo, para tal, a recursos renováveis e entregando eletricidade à rede pública que possua consumo efetivo de energia elétrica. O decreto 25/2013 também prevê que o “miniprodutor” venda esta energia gerada à rede elétrica pública com tarifa bonificada.

Conforme o decreto n.º 34/2011, unidade de miniprodução é aquela que com uma só tecnologia de produção de energia elétrica possua a potência de até no máximo 250 kW a ser ligada na rede pública. Esta unidade de produção poderá ser classificada em três diferentes escalões de porte de acordo com sua potência. Esta classificação é feita para que posteriormente as unidades de produção tenham acesso ao regime de bonificado. São os escalões:

- I – Potência até 20 kW.
- II – Potência entre 20 kW e 100 kW
- III – Potência entre 100 kW e 250 kW

Como incentivo os produtores podem ser remunerados com base na tarifa de referência atribuída ao escalão a que pertence. Contudo, com estas normas regulatórias, o benefício da produção descentralizada não fica apenas sob a custódia do “mini” produtor, uma vez que os demais usuários da rede pública podem usufruir da energia a menores custos e, a Rede Elétrica de Serviço Público (RESP) passa a operar com menor sobrecarga.

A política energética está, no entanto, em constante mutação, dependendo muito das estratégias da União Europeia e da forma como cada estado membro se adapta.

2.6 Energia eólica em Portugal

O vento ocorre devido às diferenças de pressão ao longo de toda área terrestre, isto deve-se ao facto das zonas equatoriais receberem maior quantidade de energia do Sol do que as zonas polares. Logo, a origem do vento é a radiação solar (CASTRO, 2005).

Os ventos possuem um enorme potencial de prover energia renovável ao homem com um impacto negativo relativamente baixo sobre o ambiente. Séculos atrás, antes mesmo do domínio sobre a eletricidade, a energia dos ventos era largamente utilizada pela navegação, moinhos de cereais ou mesmo elevar água de poços. Atualmente o aproveitamento desta energia é conhecido pelas turbinas de vento capazes de converter a energia cinética em energia elétrica (BURTON, 2001).

O tamanho das turbinas e as escalas completas dos sistemas variam muito, desde enormes parques eólicos compostos por múltiplos aerogeradores tecnologicamente avançados e sofisticados sistemas de distribuição, até pequenas turbinas feitas de materiais recicláveis artesanais, simples de manter e operar a baixo custo (BALLESTEROS, 2019).

As turbinas são compostas pelas pás, que são as superfícies que giram conforme passa o vento. Estas estão conectadas a um eixo central e este a um rotor com bobinas magnéticas. O movimento das bobinas é capaz de criar uma corrente elétrica que pode ser armazenada em baterias ou ser utilizada diretamente. Quanto maior a disponibilidade e constância do vento, maior a eficiência do sistema. (TAVNER *et al*, 2006).

Existe um esforço em monitorizar o comportamento dos ventos em Portugal em função da exploração do recurso eólico. A partir dos anos 80 foram conduzidos estudos por algumas instituições de investigação e desenvolvimento tais como o INETI, INEGI, IM e EDP, tendo os seus resultados, promovido o interesse crescente por esta forma de energia. O INETI foi pioneiro na criação de uma unidade piloto em 1985, quando foi criado o primeiro aerogerador português na região de Lourel e Sintra (SILVA, 1986).

Existe hoje a Associação Portuguesa de Energias Renováveis, uma associação sem fins lucrativos que trabalha desde 1988 com a missão de coordenar e representar os interesses na promoção das Energias Renováveis no setor da eletricidade (APREN, 2018).

Ao longo do país, as centrais eólicas instalam-se em locais onde a velocidade média anual do vento excede 6 m/s, o que em Portugal se verifica em zonas montanhosas e junto à costa. Enquanto no início dos anos 2000 a contribuição da geração eólica na demanda energética representava menos que 6%, atualmente as centrais eólicas fornecem 25% da energia elétrica consumida em Portugal (APREN, 2018).

A Figura 1 ilustra a distribuição da contribuição de cada fonte renovável de energia em Portugal:

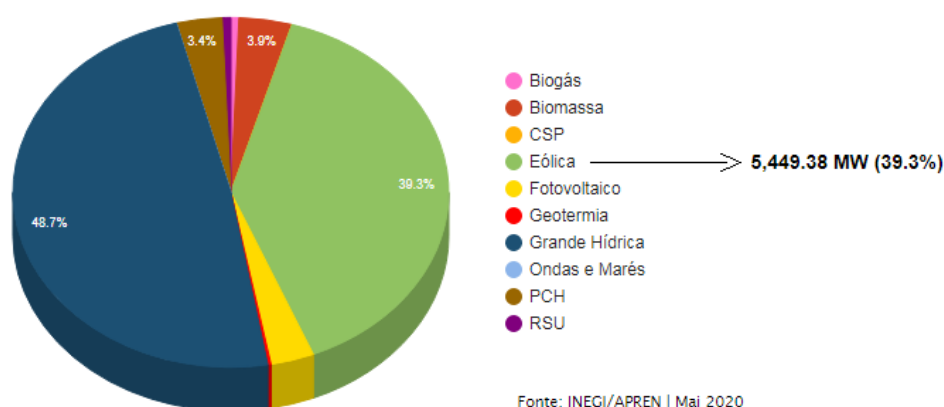


Figura 1 - Comparativo energias renováveis em Portugal.

[Fonte: INEGI/APREN, Maio 2020, adaptado pelo autor]

No relatório de 2018, dos Parques Eólicos de Portugal, são contabilizados 2654 aerogeradores conectados à rede de distribuição nacional, que no global produziram 5376,6 MWh de energia elétrica (APREN, 2018).

A maior concentração dos parques eólicos está predominantemente na região norte e nordeste de Portugal, sendo os distritos vizinhos de Viseu e Vila Real os portadores da maior capacidade eólica instalada, cada um com 1137,2 e 665,0 MW, respectivamente. Mesmo assim, a região do distrito de Bragança, vizinha a Vila Real, o recurso eólico ainda é pouco explorado, visto que a sua capacidade é inferior à 100 MW, ainda que possua condições de vento similares à grande produtora Vila Real (APREN, 2018).

2.7 Impactos Ambientais da Energia Eólica

As interações ambientais que podem ocorrer em função dos sistemas de geração de energia variam de acordo com a tecnologia utilizada e o porte do complexo instalado.

Os impactos, por sua vez, podem ser benéficos ou adversos, e a sua interação com o ambiente depende das características físicas do meio, do modo de vida local, do ambiente cultural e dos recursos naturais exigidos para a produção de energia (PINTO *et al*, 2017).

A produção eólica tornou-se uma das principais opções para os planeadores e governos nacionais que procuram diversificar os recursos energéticos e reduzir as emissões de CO₂ e demais gases de efeito estufa. Neste contexto, os parques eólicos geram energia elétrica a partir da energia cinética do vento, substituindo sistemas termoelétricos (BURTON *et al*, 1995).

Os impactos mais críticos são: o impacto visual (estético), a poluição acústica e os impactos sobre a fauna, sobretudo a ocorrência de choques de aves contra as hélices dos sistemas. Para atenuar estes impactos negativos recomenda-se uma criteriosa escolha de áreas com elevado potencial eólico, com o menor impacto visual possível, e fora de zonas de preservação da fauna (COSTA e FIGUEIREDO, 2019).

Contudo, com o objetivo de reduzir o impacto sobre a fauna, um estudo de monitorização levado a cabo ao longo de 8 anos num parque eólico na Noruega permitiu demonstrar que ao pintar uma das hélices de preto, do conjunto rotor, cria-se um efeito visual que aumenta a percepção das aves sobre as turbinas e reduz significativamente a morte por colisão (MAY, 2020).

Em paralelo, as unidades aerogeradoras podem interferir em sinais de rádio e TV, e, portanto, a localização destas unidades deve também considerar estes factores sobretudo em ambiente urbano (BURTON *et al*, 1995).

Os sistemas de pequena escala, embora possuam um reduzido perigo para as aves voadoras, exigem que os componentes permaneçam com a montagem segura, pois por vezes os componentes da hélice podem soltar-se causando acidentes em espaços públicos (PINTO *et al*, 2017).

2.8 Aproveitamento dos ventos

O vento é um escoamento cuja velocidade e direção estão a variar constantemente ao longo do tempo, e a compreensão deste comportamento numa determinada localidade é essencial para a avaliação da viabilidade económica da implantação de sistemas eólicos, bem como para o dimensionamento das turbinas (CASTRO, 2005).

No entanto, a velocidade e a direção dos ventos dependem da localização geográfica e são sazonais. A proximidade com o mar, regiões montanhosas, áreas de planície, grau de urbanização, vegetação, topografia, humidade, insolação, variação térmica e a movimentação de sistemas climáticos interferem diretamente nestas componentes (COSTA, 2004).

Os ventos mais fortes e constantes estão a altitudes próximas a 10 km de altitude, pois não perde energia ao interagir com a rugosidade e obstáculos da superfície da terra, todavia mesmo os sistemas de grande porte operam em bandas muito inferiores limitadas as dezenas de metros (CASTRO, 2005).

De modo geral, os topos montanhosos são muito ventosos, assim como planaltos, planícies e zonas costeiras que podem apresentar boa quantidade de vento, enquanto vales e zonas construídas normalmente possuem menos vento, por esta razão, as turbinas de pequeno porte não são capazes de produzir tanta energia na cidade quando comparada com o ambiente rural (PEREIRA, 2010).

As variações de vento e a disponibilidade energética relativa devem ser analisadas a longo prazo, valendo-se de dados históricos do comportamento dos ventos, eventos climáticos sazonais como o *el niño*, e previsões futuras como o aquecimento global. Contudo, também devem ser vistas as variações do vento a curto prazo como a oscilação entre o dia e a noite num determinado local, os picos e rajadas de vento, e o aquecimento da superfície que induz as correntes convectivas de vento durante o dia e enfraquecem durante a noite (BURTON, 2001).

2.8.1 Potência eólica

A energia captada pelo sistema eólico é a energia cinética do vento associada à coluna de ar que se desloca através da área varrida pela turbina. A densidade do ar interfere diretamente na energia disponibilizada pelo vento. A densidade é o quociente entre a massa e o volume, portanto, o ar frio possui maior massa por unidade de volume do que o ar quente à mesma altitude (PEREIRA, 2010). Esta massa maior, presente no ar frio, incorre em maior energia cinética, uma vez que a energia cinética é dada pela Equação (1)

$$E_c = \frac{m \times v^2}{2} \quad (1)$$

Pode-se dizer que a coluna de ar que atravessa a secção transversal da turbina ao longo do tempo, desloca uma massa de ar conforme varia a velocidade. Em termos gerais, a potência

disponibilizada pelo vento aumenta com o cubo da velocidade do vento, e o aproveitamento do vento em energia (P) é definido pela Equação (2) (LYDIA *et al*, 2013).

$$P = \frac{1}{2} \times C_p \times \rho \times A \times u^3 \quad (2)$$

Sendo:

- C_p : coeficiente de aproveitamento, estabelecido pelo limite de *Betz*
- ρ : densidade do ar (kg/m³)
- A : área varrida pelo rotor (m²)
- u : velocidade do vento (m/s)

Neste contexto, o coeficiente de aproveitamento C_p expressa o percentual de potência capturada pela turbina que, por sua vez, é estabelecido pela relação entre a velocidade angular¹ de ponta das pás e a velocidade horizontal do vento (LYDIA *et al*, 2013).

2.8.2 Área varrida pelo rotor

Além das variáveis naturais dadas pelas diversas formas de comportamento dos ventos, a área de varrimento do rotor é um dos fatores que estabelece a capacidade máxima de produção de energia da turbina eólica. A área de varrimento do rotor corresponde à circunferência dentro da qual as pás agregadas ao eixo do rotor são capazes de receber a energia cinética dos ventos. Quanto maior a área de varrimento maior a potência do sistema (KELLOGG e PETTIGREW, 2008).

2.8.3 Coeficiente de aproveitamento – limite de Betz

O aproveitamento de energia cinética dá-se pela travagem do vento pelo aerogerador. Quanto maior a travagem maior a geração de energia. No entanto, se fosse possível extrair 100% da energia do vento, o ar sairia da turbina com velocidade nula, e assim, o ar não abandonaria a turbina, impedindo a entrada de mais ar, o que não ocorre. Se por outro lado, o ar saísse com a mesma velocidade de entrada, nada seria convertido em energia mecânica (TAVNER *et al*, 2006).

Entre estes dois limiares, existe um valor de eficiência na conversão de energia cinética em energia mecânica, um aerogerador poderá extrair até aproximadamente 2/3 da velocidade

¹ Ver capítulo: 2.8.4 Velocidade de ponta

inicial do vento. Este valor foi previamente estabelecido em 1919 pelo físico Albert Betz, e conhecido como Lei de Betz, postulando que num aerogerador só é possível converter até $16/27$, ou 59,3%, da energia cinética em energia mecânica (DUTRA, 2001).

Todavia, 59,3% de rendimento é um valor teórico, e não há turbinas que efetivamente alcancem este rendimento. Algumas superam 40%, mas a grande maioria opera na faixa de 35% de eficiência, pois existem perdas de energia pelo rotor, transmissão, geração e distribuição (SIMIU e SCANLAN, 1986).

Este coeficiente de eficiência ocorre pelo escoamento do vento, que ao movimentar as pás, se expande a montante da área de captação das pás, então na seção transversal após a passagem pela área de captação a velocidade do vento é menor que na área de entrada do disco captador (DUTRA, 2001).

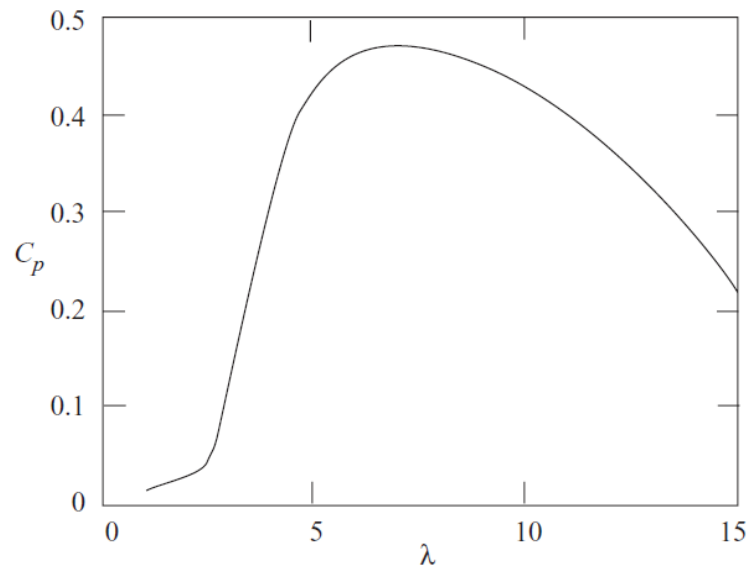
2.8.4 Velocidade de ponta

O rendimento pode ser traduzido pela relação entre a velocidade do vento e a velocidade angular de rotação das pás. A quantidade de pás no sistema rotor e a dimensão das pás interfere diretamente neste aspecto pois aumenta a solidez do sistema (PEREIRA, 2015).

A solidez por sua vez é a razão entre a área das pás e a área varrida por estas. Portanto, para um mesmo diâmetro e solidez, o rendimento aumenta com o número de pás, e isto ocorre porque as chamadas perdas de extremidade são reduzidas (CASTRO, 2005).

A velocidade angular de ponta é maior para um determinado coeficiente de aproveitamento e velocidade de incidência do vento. Em velocidades muito baixas as pás ficam paradas, por outro lado em velocidades muito altas o arraste e a deformação passam a predominar e prejudicam a captação de energia cinética (BURTON, 2001).

É possível ver no gráfico ilustrado abaixo, uma relação do coeficiente de aproveitamento com a taxa de velocidade de ponta das pás.



Power Coefficient – Tip Speed Ratio Performance Curve

Figura 2 – Relação: coeficiente de aproveitamento e taxa de velocidade de ponta

Fonte: BURTON, T. – 2001 (Adaptado pelo autor)

Quando a turbina gira lentamente, a maior parte do vento passa sem perturbação através da área de captação das pás e a energia cinética não é devidamente extraída. Contrariamente, quando as pás giram muito rapidamente, acabam por ser como uma parede sólida que bloqueia o vento. Portanto, as turbinas eólicas são projetadas para uma razão de velocidade de ponta média capaz de extrair o máximo de energia, de acordo com a Equação (3). Normalmente as turbinas eólicas de eixo horizontal para produção de eletricidade trabalham com λ entre 6 e 8 (RAGHEB e RAGHEB, 2011).

$$\lambda = \frac{\omega r}{V} \quad (3)$$

Onde:

- ω = Velocidade angular de ponta (rad/s).
- λ = Taxa de velocidade de ponta (adimensional).
- V = Velocidade do vento (m/s).
- r = raio da turbina (m).

2.8.5 Velocidade do vento

Via de regra, a velocidade à qual os aerogeradores começam a rodar situa-se entre 3 e 5 m/s, que é a chamada velocidade de ligação (velocidade de arranque) para que o rotor saia da inércia. Mesmo assim, abaixo de 5 m/s, a quantidade de energia no vento é muito baixa e, por isso, a turbina apenas começa a funcionar por volta dos 5 m/s (ESTEVEES, 2004).

Em relação aos aerogeradores de pequeno porte destacam-se as turbinas de alta velocidade de rotação, que requerem velocidades de vento entre 4 e 5 m/s e na maioria das vezes possuem 3 pás, e, as turbinas eólicas de velocidade média que possuem normalmente entre 3 e 6 pás e são utilizadas quando as condições de vento não são tão favoráveis (KOENEMANN e LEHMANN, 2005).

Os valores com maior aproveitamento andam à volta dos 10 m/s, no entanto as turbinas podem ser desenhadas para uma eficiência máxima dependendo da zona de velocidade de vento onde esteja a maior parte da energia, e, portanto, um aerogerador ideal para um determinado local não é ideal para outro local (PEREIRA, 2010).

Seja qual for a escala do projeto da turbina, o valor limite para que não existam danos à estrutura dos aerogeradores é próximo a 25 m/s, também conhecida como velocidade de corte. Acima destas velocidades as turbinas têm de ser capazes de dissipar a energia em excesso (HIESTER e PENNELL, 1983).

Os aerogeradores de pequena escala estão sujeitos à fadiga e deformação de componentes quanto submetidos a ventos fortes. No entanto, a qualidade dos materiais utilizados, tais como ligas metálicas, *kevlar*®, fibras, plásticos ou madeira interferem diretamente na robustez e durabilidade do sistema (BURTON, 2001).

2.8.6 Rugosidade e obstáculos da superfície

Uma vez que a rugosidade da superfície influencia o escoamento do vento, este é um parâmetro a ser considerado neste tipo de estudo. A rugosidade depende do tipo de ocupação do solo, do tipo de vegetação, culturas agrícolas, edificações, estruturas viárias, etc. (BURTON *et al*, 1995).

O local ideal caracteriza-se pela rugosidade homogênea e reduzida, isto é, com poucos obstáculos tais como construções, relevo acidentado e vegetação que reduzam a incidência e velocidade dos ventos. Mesmo assim é frequente o interesse na instalação de sistemas em locais com vários tipos de rugosidade que se interpenetram (SIMIU e SCANLAN, 1986).

A rugosidade pode ser determinada através da combinação de dados anemométricos, avaliações cartográficas e inspeções *in situ* das tipologias existentes.

É comum haver perto do mastro anemométrico, elementos sombra que não podem ser classificados como rugosidade. Estes, denominam-se por obstáculos, sendo por vezes necessário proceder à sua identificação e caracterização para avaliação do escoamento. Os obstáculos podem ser de várias tipologias e naturezas como casas, depósitos de água, postos de vigia florestais, aglomerados de árvores ou mesmo grandes estruturas de pedra (ESTEVES, 2004).

Recomenda-se evitar a presença destes obstáculos na escolha do local de instalação de sistemas eólicos. Algumas precauções estabelecidas são: manter uma distância a montante de mais do que duas vezes a altura de um edifício, manter uma distância mínima a jusante de dez ou mesmo vinte vezes a altura de um edifício, de pelo menos 3 a 5 vezes da dimensão transversal do edifício, sobretudo se o sistema eólico estiver orientado transversalmente com o edifício (HIESTER e PENNELL, 1983).

2.9 Tipos de turbinas

As turbinas e seus respectivos sistemas eólicos podem ser construídos nas mais diversas escalas e graus de complexidade. Os sistemas de geração de grande porte, normalmente são compostos por pás que podem ter mais de 60 metros de comprimento, sofisticados sistemas de rotores e acumuladores, sistemas anemométricos, dispositivos de controlos, e produção energética, na ordem dos Megawatts. Contudo, requerem contínuos processos de manutenção (BURTON *et al*, 1995).

Ainda no início do século XX, as turbinas eólicas utilizadas eram na grande maioria de pequeno porte, instaladas em ambientes rurais. Em 1941, foi instalado nos Estados Unidos um sistema com rotor de 53 metros capaz de produzir 1,25 MW pela companhia Smith–Putnam, e manteve-se por quase 40 anos como o maior sistema eólico da Terra (BURTON, *et al*, 1995).

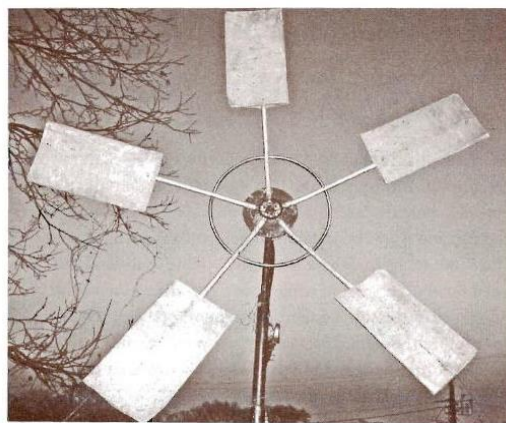
Existe hoje no mercado de energias uma série de fabricantes de sistemas eólicos de grande porte que podem ser adquiridos, requerendo grande investimento e amplas áreas disponíveis. A imagem a seguir ilustra um sistema dinamarquês de grande porte com potência superior a 1,5 MW e diâmetro de rotação de 64 metros como se ilustra na figura 3.



Figura 3 – Turbina eólica

Fonte: NEG MICON, www.neg-micon.dk

Por outro lado, os sistemas eólicos podem ser pequenos e construídos de forma artesanal com baixa complexidade (Figura 4). É possível fabricar sistemas de baixo custo com menos de 50 €, reaproveitando peças de bicicletas como correntes, cremalheiras e pedais, e peças de veículos como alternadores e circuitos elétricos. O próprio gerador conectado à turbina pode ser construído com bobinas magnéticas removidas de discos rígidos de computador e fios de cobre provenientes de fornos de micro-ondas danificados. Sistemas estes, capazes de gerar 100 W de potência, e com simples manutenção e disponibilidade de peças de reposição (KELLOGG e PETTIGREW, 2008).



The Rhizome's wind turbine constructed with recycled bicycle parts

Figura 4 – Turbina eólica artesanal

Fonte – KELLOGG 2008 (Adaptado pelo autor)

Estes sistemas aerogeradores de pequeno porte são máquinas cuja potência nominal é de até 30 kW e diâmetro de rotor de até 15m de acordo com a definição de Lehmann e Koenemann (2005). Também podem ser subdivididos em mini e micro aerogeradores, quando possuem as características descritas na tabela 1.

Tabela 1 – Classificação de pequenos aerogeradores

Classe	Potência - kW	Massa - kg	Diâmetro rotor - m	Altura do cubo - m
Mini	< 30	< 1000	< 15	< 25
Micro	< 1	< 50	< 3	< 10

Adaptado pelo autor

Estes equipamentos acabam por fomentar a produção de energia elétrica descentralizada e contribuir com a melhoria da qualidade da energia fornecida pelas companhias elétricas, sobretudo para aquelas populações que se encontram em zonas sem acesso à rede elétrica nacional, tais como comunidades rurais afastadas de núcleos urbanos (KOENEMANN e LEHMANN, 2005).

Em paralelo, os sistemas de pequeno porte podem ser submetidos a estudos científicos e testados sob condições controladas, tais como os túneis de vento, podem ainda ser aprimorados e integrados em sistemas de energia solar e motores de combustão interna (e.g., motores a biodiesel) (MARTIN e CHEBAK, 2016).

Os componentes em tamanho reduzido tornam estes pequenos sistemas facilmente transportáveis e desmontáveis, podem servir de demonstração prática no ensino das energias renováveis e induzem a compreensão de conceitos teóricos através de aplicações práticas. Esta escala reduzida possibilita ainda a produção de componentes em impressoras 3D e utilização de materiais alternativos e/ou reaproveitados (GARRÉ, 2015).

2.9.1 Pás e aerodinâmica

As pás são os perfis aerodinâmicos que interagem diretamente com o vento e são capazes de converter parte de sua energia cinética em trabalho mecânico, estas pás devem ser suficientemente resistentes à deformações, e projetadas para possuir uma curvatura que forneça o ângulo de ataque, de modo a extrair a máxima potência possível disponibilizada pelo vento (CASTRO, 2005).

Para garantir a maior extração possível de energia do vento, o ângulo de ataque das pás deve possuir a maior relação possível entre as forças de sustentação e arraste. As forças de sustentação atuam perpendicularmente ao escoamento do vento e ocorrem quando um corpo obstrui seu movimento, enquanto que as forças de arrasto são aquelas que atuam na mesma direção do movimento do vento sobre o corpo que o bloqueia. O ângulo de ataque por sua vez é compreendido como o ângulo entre a linha que une a borda de entrada e de saída do perfil aerodinâmico (DUTRA, 2008).

O modelo esquemático a seguir exhibe as forças atuantes sobre a pá:

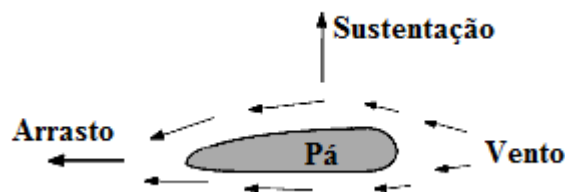


Figura 5 – Forças atuantes sobre as pás
Fonte: Pinto 2013 (Adaptado pelo autor)

Portanto, o desempenho aerodinâmico das pás da turbina é que vai garantir a eficiência da captação da energia cinética dos ventos. Assim, é importante que as pás possuam uma curvatura capaz de fazer o ar percorrer um caminho maior na parte superior quando comparado ao caminho percorrido na parte inferior. Isto significa que a pressão na parte superior do perfil será menor que na parte inferior, fazendo surgir a força de sustentação e conseqüentemente a rotação da turbina (PINTO – 2013).

A ilustração a seguir, exhibe uma pá com suas respectivas curvaturas:

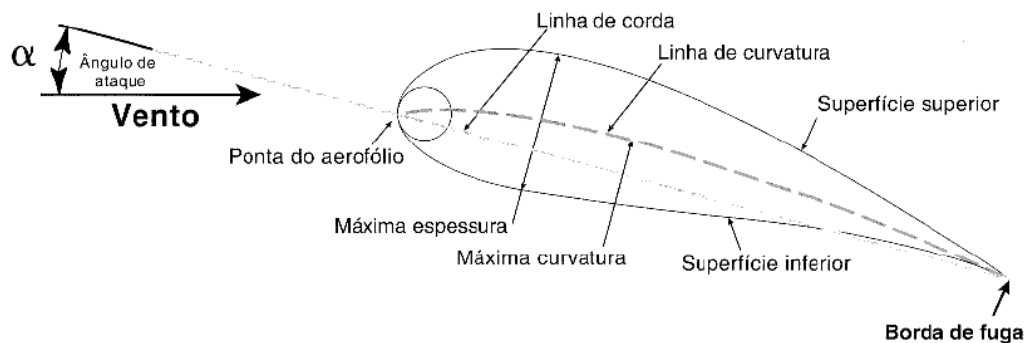


Figura 6 – Curvatura da pá
Fonte: Pinto 2013 (Adaptado pelo autor)

3 Material e métodos

3.1 Descrição metodológica geral

Como já foi referido, este estudo teve por base o desenvolvimento de um microaerogerador de energia elétrica para apoiar o ensino prático em diferentes áreas de conhecimento. Para tal, foram utilizados materiais disponibilizados no comércio de material de construção e sucatas metálicas reaproveitadas, previamente disponíveis nos laboratórios de mecânica e elétrica do IPB.

Após a construção do aerogerador, o mesmo foi colocado a funcionar e foram realizadas avaliações de desempenho, considerando aspectos de resistência da montagem e potência alcançada, e, finalmente avaliados os pontos de melhoria.

Por fim, foram avaliadas as possibilidades de aplicação do equipamento desenvolvido em situações reais, tais como pontos de recarga para telemóvel, recarga das bicicletas elétricas do IPB também conhecidas como *IPBikes* (http://ipbike.ipb.pt/PT_index.html) entre outras utilidades amparadas na educação e sensibilização ambiental.

3.2 Produção dos componentes do aerogerador

3.2.1 As pás da turbina

As pás duma turbina eólica devem ser de formato helicoidal, fundamental para o bom desempenho do conjunto, fazendo com que a velocidade tangencial seja otimizada e o ruído reduzido. As pás devem pesar ter o mesmo ou quase o mesmo peso, porque isso irá facilitar a calibração do conjunto. Em rotação, uma descalibração pode causar trepidações mais ou menos intensas, muito prejudiciais para o sistema. Mesmo com pás muito semelhantes, a calibração é fundamental, sendo essa tarefa efectuada por compensação de peso, tal como a calibração duma roda dum automóvel.

As pás da turbina foram desenvolvidas com tubos de PVC rígido de diâmetro 100 mm (Figura 7) e espessura de parede 3,5 mm (Figura 8). O tubo integralmente possuía 3 metros de comprimento, mas foi repartido em 3 partes iguais de 1 metro para que pudesse ser devidamente trabalhado. O tubo de PVC foi escolhido devido ao seu perfil originalmente côncavo tal como a forma de uma pá capaz de gerar forças de sustentação e por consequência a rotação da turbina quando houver a incidência de vento.



Figura 7 – Tubo de PVC comprimento 1 m



Figura 8 – Espessura de parede 3,5 mm

Em seguida, uma das partes contendo 1 metro de comprimento, foi fixada num torno de bancada para então ser cortada manualmente com uma rebarbadeira de disco modelo Makita GA5040, numa largura de 14 cm. As figuras 6 e 7 exibem respectivamente o primeiro corte e o tubo já cortado com 14 cm de largura.



Figura 9 – Tubo fixado e primeiro corte



Figura 10 – Cortes laterais

Ainda na Figura 10, observa-se o fio de cobre maleável, utilizado como guia de corte, posicionado sobre o tubo. Assim, cada parte do tubo, com perímetro circular de 14 cm (Figura 11), foi novamente cortado em duas partes simétricas que resultou em 2 pás (Figura 12).

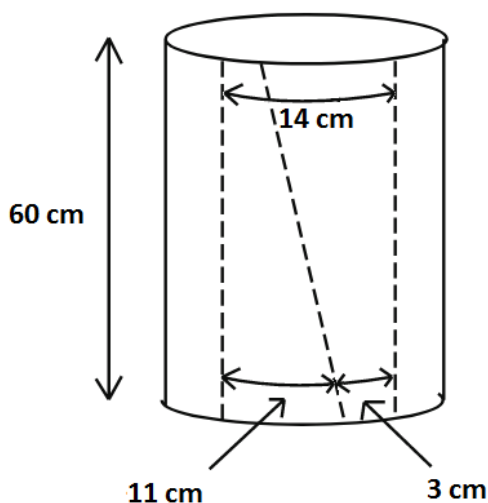


Figura 11 – Ilustração do corte das pás em pás
 Fonte: Makezine – 2009 (adaptado pelo autor)

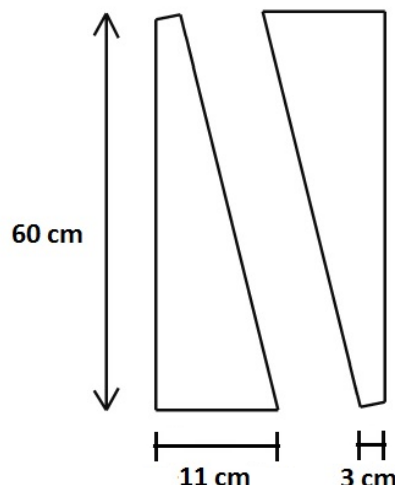


Figura 12 – Corte frontal das pás
 Fonte: Makezine – 2009 (adaptado pelo autor)

Este processo sucedeu-se em duplicata de modo a resultar em 4 pás que compõem o sistema eólico. Após esta fase, foi feito um corte triangular nas bases das pás para que estas pudessem ser devidamente acopladas ao volante de rotação e reduzir o efeito de vibração no sistema. A Figura 13 demonstra o corte ora mencionado:

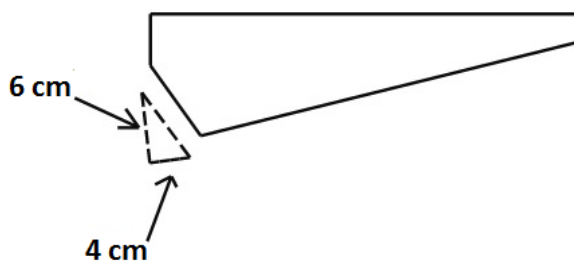


Figura 13 – Corte para acabamento de encaixe das pás
 Fonte: Makezine – 2009 (adaptado pelo autor)

As 4 pás receberam o acabamento tipo asa de avião, trabalho realizado manualmente, com uso do esmeril de bancada modelo Nebes S/200. Para canalizar o ar que passa pela turbina, foi necessário fazer um arredondar no sítio onde o ar entra para aumentar a área desta parte, em contrapartida na aresta de saída foi feito um acabamento pontagudo de forma a reduzir a área e permitir maior velocidade de saída do ar. As ilustrações apresentadas na Figura 14 e na Figura 15 exibem o acabamento descrito.

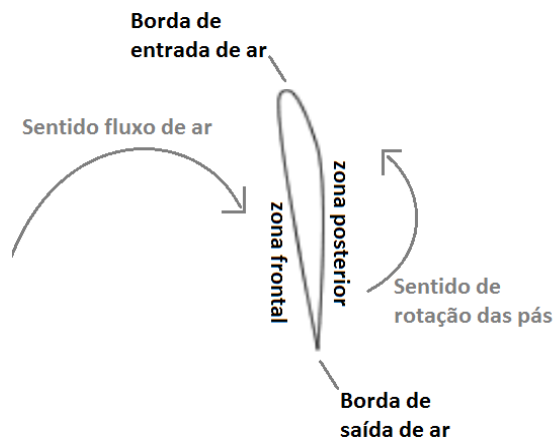


Figura 14 – Vista superior acabamento
 Fonte: Makezine – 2009 (adaptado pelo autor)

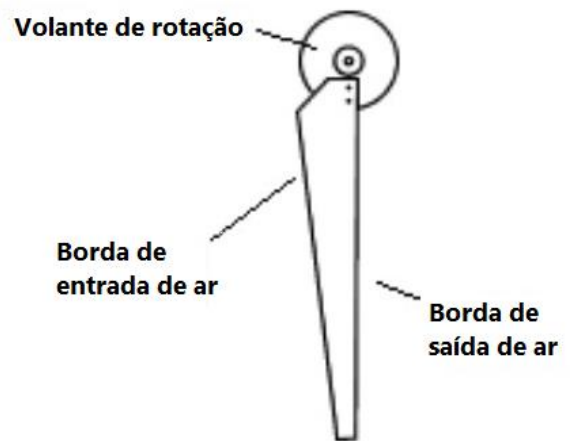


Figura 15 – Corte frontal acabamento
 Fonte: Makezine – 2009 (adaptado pelo autor)

Assim, após todo o processo ora descrito, as 4 pás ficaram prontas para aplicação no sistema eólico. As fotografias da Figura 16 e da Figura 17 mostram, respectivamente, as pás e o acabamento de borda.



Figura 16 – Pás prontas



Figura 17 – Acabamento de borda

3.2.2 Volante de rotação

O volante de rotação é a peça acoplada ao eixo de rotação do motor gerador da corrente elétrica e também a componente na qual as pás ficam devidamente fixadas. É, portanto, a peça

de ligação entre pás e motor que deve garantir simultaneamente, firmeza, inércia e rotação (ou regime), suficientes para gerar a corrente elétrica.

O volante de rotação foi desenvolvido em alumínio. Um lingote cilíndrico de diâmetro 120 mm deste metal foi cortado com um serrote de fita mecanizada modelo Quantum S/181 de modo a se obter um disco de rotação com espessura de 15,6 mm. Na Figura 18 é possível ver o lingote durante o corte, enquanto na Figura 19 se visualiza o disco cortado pronto para receber as furações e encaixe das pás e do eixo de rotação do motor.

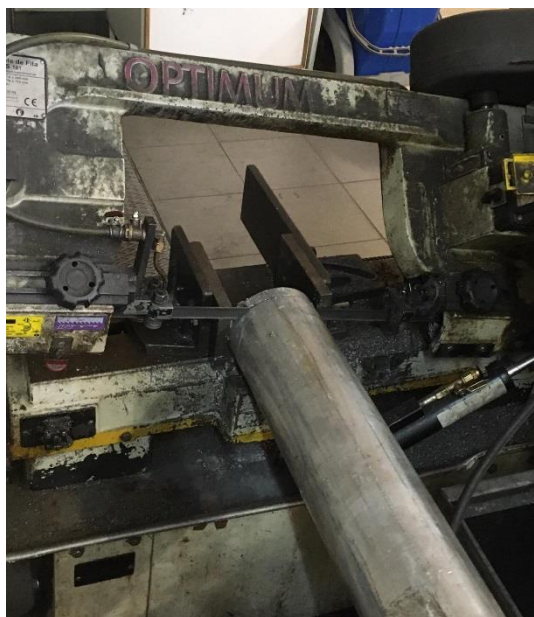


Figura 18 – Lingote de alumínio

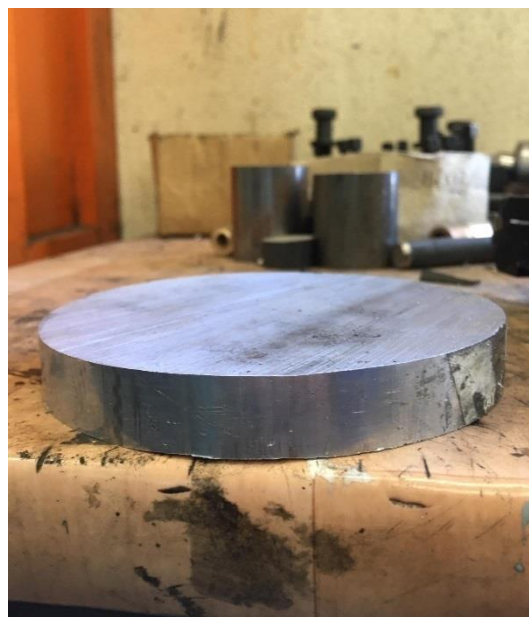


Figura 19 – Disco de alumínio cortado

O disco foi então submetido aos diferentes procedimentos. Inicialmente a peça foi torneada para obtenção do furo central que permite a passagem do parafuso de fixação no eixo de rotação do motor. Em seguida foram feitas as marcações dos furos de fixação das pás. Para tal foi utilizada o esquadro de centro (Figura 20) que permitiu demarcar o disco circular em 4 partes iguais. Na continuação, foram estabelecidos os pontos de furação das pás e os mesmos foram demarcados com o marcador tipo punção e ponteira (Figura 21). Por fim, os furos foram realizados com broca de 5 mm na furadeira industrial modelo Audax 40TITRG (Figura 22).

Destaca-se que, o volante de rotação é o componente no qual se fixam as pás e estão também fixados os grupos geradores com os seus conjuntos de engrenagens capazes de converter a energia cinética em corrente elétrica. Este componente precisa garantir estabilidade e resistência ao sistema, pois durante a utilização deve suportar os esforços mecânicos ocasionados pelo vento (DUTRA – 2008). A exemplo dos sistemas de grande

porte que normalmente utilizam aço ou ligas de alta resistência, o projeto utilizou a liga com maior resistência disponível no laboratório de mecânica.



Figura 20 – Esquadro de centro utilizada na divisão das 4 partes iguais do volante



Figura 21 – Volante de rotação com furo central



Figura 22 – Volante de rotação, pronto para aplicação no sistema

Para garantir a fixação do volante de rotação no eixo de rotação do motor, adaptou-se um parafuso de tamanho 10mm com uso do torno modelo TOS TRENCIN 9N 32. Para tal, foi feito um furo no miolo do parafuso, em seguida a cabeça do parafuso também foi torneada,

para dar o formato cónico (Figura 23), tal como no furo central do volante de rotação e, por fim, foram feitos 2 cortes verticais para permitir o estrangulamento do parafuso no eixo de rotação (Figura 24).



Figura 23 – Adaptação para unir volante de rotação no eixo do motor.



Figura 24 – Parafuso acoplado no sistema

Com o volante de rotação devidamente pronto para ser conectado no motor, as pás puderam ser finalmente instaladas no sistema rotor. Inicialmente foram fixadas uma a uma com apenas 1 parafuso no volante de rotação para permitir precisão no posicionamento e calibração das pás (Figura 25).



Figura 25 – Pás fixadas com apenas 1 parafuso

Em seguida, as pás foram posicionadas de modo a garantir um espaçamento igual entre elas e garantir o equilíbrio da rotação e reduzir ao máximo vibrações que possam interferir negativamente no funcionamento do sistema. A medição descrita é ilustrada no esquema da Figura 24. O aspecto final da turbina montada mostra-se na Figura 25. A calibração ou compensação de pesos para evitar as trepidações com a rotação foi feita colocando mais ou menos anilhas em cada um dos parafusos.

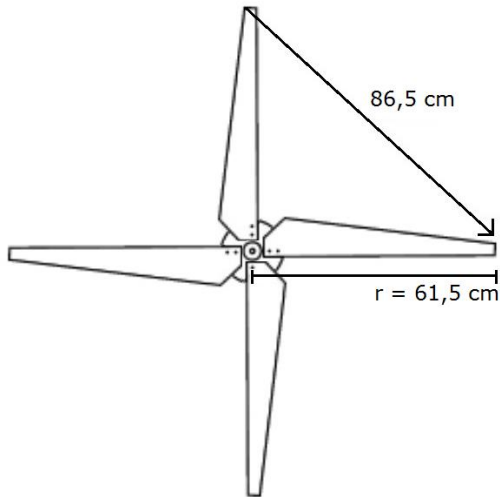


Figura 26 – Distância equivalente entre extremidades das pás

Fonte: Makezine – 2009 (adaptado pelo autor)



Figura 27 – Turbina montada

3.2.3 Motor gerador de corrente elétrica

O motor que recebe as rotações da turbina e converte em corrente elétrica foi reaproveitado de uma impressora eletrônica modelo Epson sucateada. É um motor assíncrono, que já possui ímãs internos, com capacidade de gerar corrente elétrica contínua sem requerer corrente, e estruturalmente bem mais simples do que um motor síncrono, embora menos eficiente.

A adaptação mecânica deste componente no equipamento desenvolvido consistiu na remoção da engrenagem existente no eixo de rotação para que o parafuso de fixação do conjunto volante de rotação e pás pudesse ser devidamente encaixado (Figura 26).



Figura 28 – Motor com o parafuso de encaixe no eixo de rotação

Para a adaptação da parte eléctrica foi necessário testar o motor previamente com auxílio do osciloscópio para medir a tensão gerada pela rotação. Este procedimento foi feito com uma parafusadora acoplada ao eixo de rotação que ocasionou a geração de corrente eléctrica para variados regimes.

O teste em questão rodou o motor a um regime de 1100 RPM (medido pelo tacómetro portátil) e foi capaz de gerar uma tensão eléctrica de aproximadamente 7,4 V.

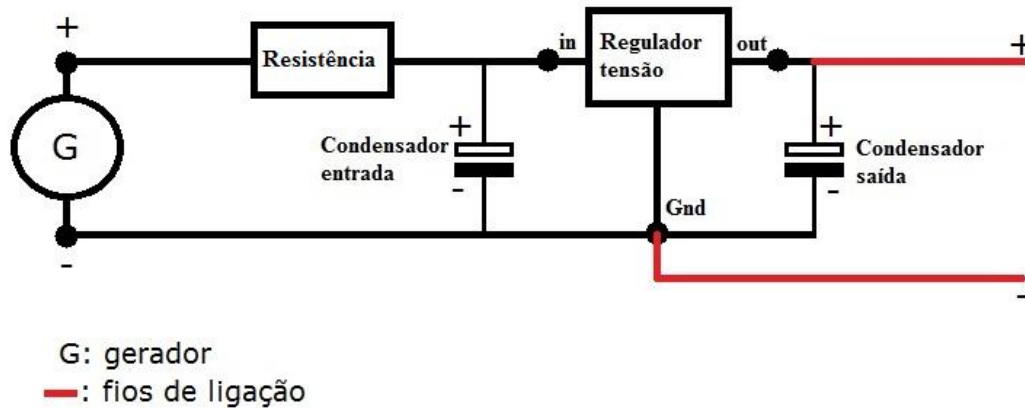
Entretanto, para efeitos de comparação foi estimada a partir da Equação (3) a rotação por minuto da turbina a uma velocidade de 10 m/s, que por sua vez representa a condição óptima² de vento para captação de energia. Nesta simulação, obteve-se o valor $\omega = 81,3$ rad/s que equivale a um regime de 774 RPM. Contudo, este regime está sujeito a variações constantes da velocidade do vento e portanto não é possível gerar de forma contínua a tensão eléctrica próxima a 7 V. Assim, para operar com maior estabilidade na tensão gerada e garantir a saída de tensão de 5V, ideais para o carregamento de telemóveis, foi desenvolvido um circuito eléctrico que a seguir se caracteriza.

3.2.4 Circuito eléctrico

O circuito eléctrico foi produzido com componentes eletrónicos disponíveis no Laboratório de Controlo, Automação e Robótica do Instituto Politécnico de Bragança. Foi

² Considerando a literatura utilizada – ver capítulo 2.8.5. Velocidade do vento

concebido um conjunto eletrônico capaz de receber a tensão de entrada, regular e limitar a saída em tensão de 5V. A Figura 27 exhibe o esquema do circuito em questão.



G: gerador
—: fios de ligação

Figura 29 – Circuito eletrônico

Os detalhes técnicos de cada componente podem ser vistos no Anexo 1, que apresenta a ficha técnica de cada dispositivo utilizado. Após a concepção, o circuito foi efetivamente montado em placa e fixado com ferro de soldar e fio de solda estanho-chumbo 60/40 como se vê nas imagens das Figuras 28 e 29 a seguir.

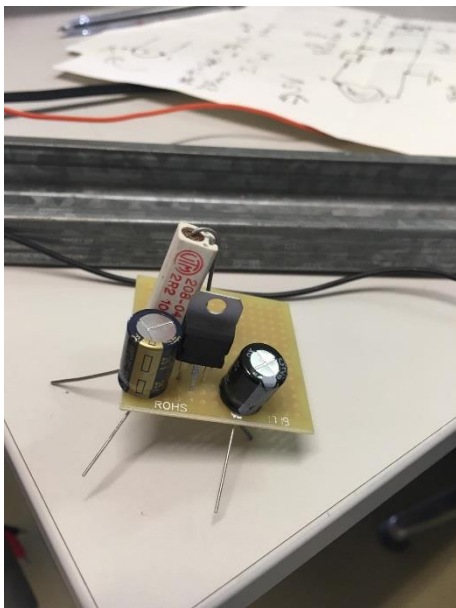


Figura 30 - Componentes eletrônicos



Figura 31 - Ferro de soldar

Após a finalização da montagem e das soldas dos componentes na placa eletrônica, foi também instalado um terminal eletrônico que permite conectar e desconectar com facilidade os fios do gerador e os fios de ligação USB ao circuito ora descrito. Na imagem a seguir é possível verificar o circuito eletrônico já fixado na estrutura do aerogerador e devidamente conectado ao cabo tipo USB com terminal tipo fêmea pronto para ser utilizado e testado:



Figura 32 - Circuito eletrónico instalado

3.2.5 Leme

A construção do leme que posiciona a turbina conforme a direção do vento foi feita com o reaproveitamento de uma carcaça de computador. O material metálico foi devidamente cortado na guilhotina mecanizada e em seguida foi fixado num perfil de alumínio também encontrada nas sucatas do depósito do IPB. O perfil de alumínio é o suporte de sustentação do leme direcional e também do conjunto rotor.



Figura 33 – Carcaça de computador



Figura 34 – Leme

3.2.6 Haste vertical de sustentação

Como o protótipo produzido neste estudo é de pequeno porte, a haste vertical de sustentação do equipamento também foi feita com materiais reaproveitados. Um cano

metálico de diâmetro 26 mm que já estava acoplado a um flange de latão com rosca tipo macho, foi preparado para permitir a rotação e orientação do conjunto gerador conforme a direção do vento, a rosca de latão recebeu fita teflon e na base de encaixe aplicou-se óleo industrial lubrificante, de modo que mesmo quando devidamente apertado o conjunto tenha atrito reduzido e o sistema seja capaz de rotacionar e se orientar conforme a direção do vento. A base de encaixe foi torneada para dar acabamento de superfície na peça e reduzir ao máximo as imperfeições existentes. Em seguida, a peça foi fixada ao perfil de alumínio descrito com uso de um encaixe de latão tipo fêmea. Para tal, o perfil de alumínio foi perfurado com uma broca de 25 mm e posteriormente limada para dar acabamento ao encaixe.



Figura 35 – Haste reaproveitada



Figura 36 – Detalhe do encaixe no suporte

3.3 Montagem do aerogerador

Após o desenvolvimento dos componentes do sistema o conjunto pás / gerador foi fixado no perfil estrutural de alumínio com abraçadeiras metálicas de pressão com parafuso na ponta oposta a o leme direcional.

O circuito eletrônico foi fixada com parafusos numa pequena placa de madeira reaproveitada que por sua vez também foi fixada com parafusos no perfil estrutural de alumínio, de modo que os fios conectados ao gerador pudessem ser facilmente ligados aos fios do circuito eletrônico. Conforme já explicado anteriormente, o circuito eletrônico possui um terminal de conexão que permite facilmente conectar e desconectar os fios provenientes do gerador e os fios com conexão USB que servem de saída da energia elétrica.



Figura 37 – Montagem



Figura 38 – Aerogerador montado

Por fim a haste vertical foi fixada num tripé de sustentação previamente existente no laboratório de tecnologia mecânica do IPB, para que o sistema estivesse em condições de ser testado em campo:



Figura 39 – Vista geral do aerogerador

3.4 Avaliação de desempenho mecânico

Para compreender o funcionamento do aerogerador, foi necessário avaliar aspetos mecânicos tais como a robustez do sistema, sua capacidade de orientação pela direção do

vento, e, principalmente a sensibilidade da turbina sob condição real de vento e a resposta desta turbina descrita pela velocidade angular expressa em rotações por minuto (RPM).

O aerogerador foi colocado em funcionamento lado a lado com um anemómetro na cobertura do edifício da Escola Superior Agrária do IPB a 27 e 28 de Janeiro, e mais tarde a 23 de Fevereiro, a fim de relacionar o regime do rotor (RPM) com a velocidade do vento.



Figura 40 – Teste mecânico, aerogerador e anemómetro do IPB

As medições do regime do rotor (RPM) foram feitas com um tacómetro portátil e fotossensível a cada 10 segundos, em períodos entre 3 e 25 minutos, que tiveram lugar ao longo de 3 dias diferentes. A amostragem manual do regime do rotor foi sincronizada com o tempo UTC do anemómetro, este último com registo automático num datalogger.

As mudanças na trajectória do vento nem sempre corresponderam a uma rápida reorientação do aerogerador, acontecendo apenas a velocidades de vento mais elevadas. Isto causou algumas interrupções nas medições, após uma reorientação manual dependendo do leme do anemómetro, que é muito mais sensível do que o aerogerador. Na Figura 39 pode observar-se o procedimento de leitura do regime do rotor. O anexo 2 exhibe as tabelas contendo resultados obtidos de regime do rotor (RPM) ao instante.



Figura 41 – Medição do regime do rotor (RPM)

3.5 Avaliação de desempenho elétrico

O teste de desempenho elétrico teve de ser executado em bancada para que fosse possível controlar as RPM do sistema com um berbequim (modelo Itools Intertek) acoplado ao eixo de rotação, e assim utilizar simultaneamente o tacómetro para contagem de RPM e o multímetro (modelo Parkside P2M) para medição da tensão elétrica existente na ponta dos fios após a passagem pelo circuito eletrónico.

Foram feitas leituras simultâneas do tacómetro e multímetro durante as rotações controladas pelo berbequim para estabelecer uma relação entre os dois fatores e construir uma curva de eficiência do aerogerador construído (ver Figura 40).



Figura 42 - Teste elétrico

4 Resultados e discussão

4.1 Desempenho mecânico

Durante o teste de desempenho mecânico foi possível perceber a robustez do equipamento sob condições atmosféricas reais. Não se observou em nenhum momento ruído ou turbulência do rotor. Mesmo nos momentos com rajadas mais fortes de vento, não ocorreu deformação das pás e tampouco do restante conjunto.

Com o conjunto rotor montado e a medida do raio de rotação de 61,5 cm estabelecida, foi possível calcular a área de captação de energia em 1,188m², e, estimar o aproveitamento do vento em energia (P), este definido pela Equação (4).

$$P = \frac{1}{2} \times C_p \times \rho \times A \times u^3 \quad (4)$$

Sendo:

- $C_p = 0,35$ (coeficiente estimado³ para esta turbina)
- $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$ (densidade do ar à 20°C)
- $A: 1,188 \text{ m}^2$
- u : velocidade do vento (m/s)

Considerando um vento ótimo com velocidade de 10 m/s, a potência alcançada seria de aproximadamente 249W. O gráfico da figura 41, exibe a curva de potência possível para o sistema construído para o intervalo de ventos entre 1 m/s e 10 m/s.

³ $C_p = 0,35$ para este protótipo conforme demonstrado na página 49.

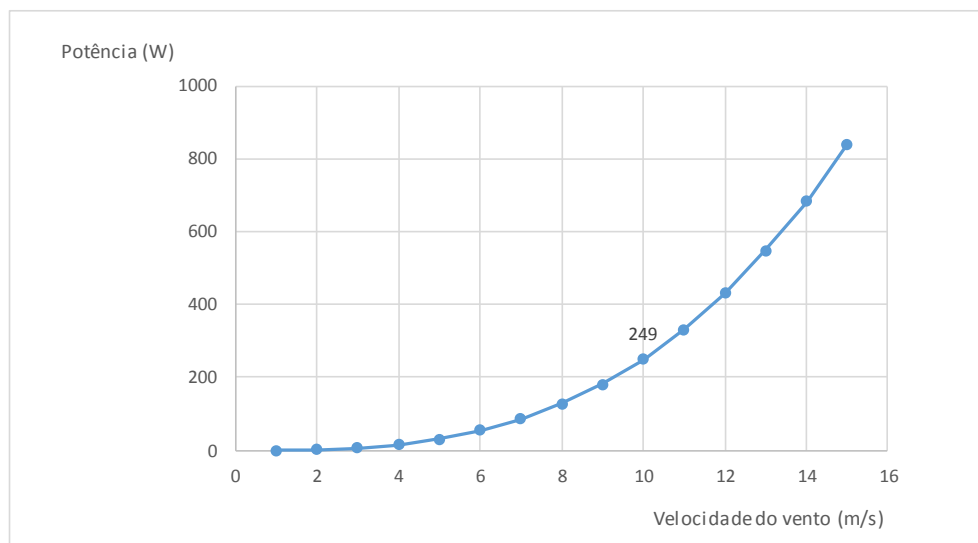


Figura 43 - Potência eléctrica estimada

Em relação à sensibilidade do sistema ao vento, mesmo tendo sido feitas medições em 3 diferentes dias, optou-se por utilizar como referência a batelada mais representativa de amostragem, que ocorreu no dia 27 de Janeiro entre as 14:50 e as 16:10. Isto porque este foi o momento em que o equipamento funcionou constantemente e houve menos interrupções nas medições, em relação aos demais períodos.

O gráfico de sensibilidade ao vento da Figura 42 exhibe os resultados obtidos neste intervalo de tempo. Foram consideradas as médias por minuto das medições realizadas a cada 10 segundos para que as variações bruscas pudessem ser atenuadas e facilitar a interpretação e comparação de dados. A linha pontilhada indica uma linha de tendência das RPM durante o intervalo de análise:

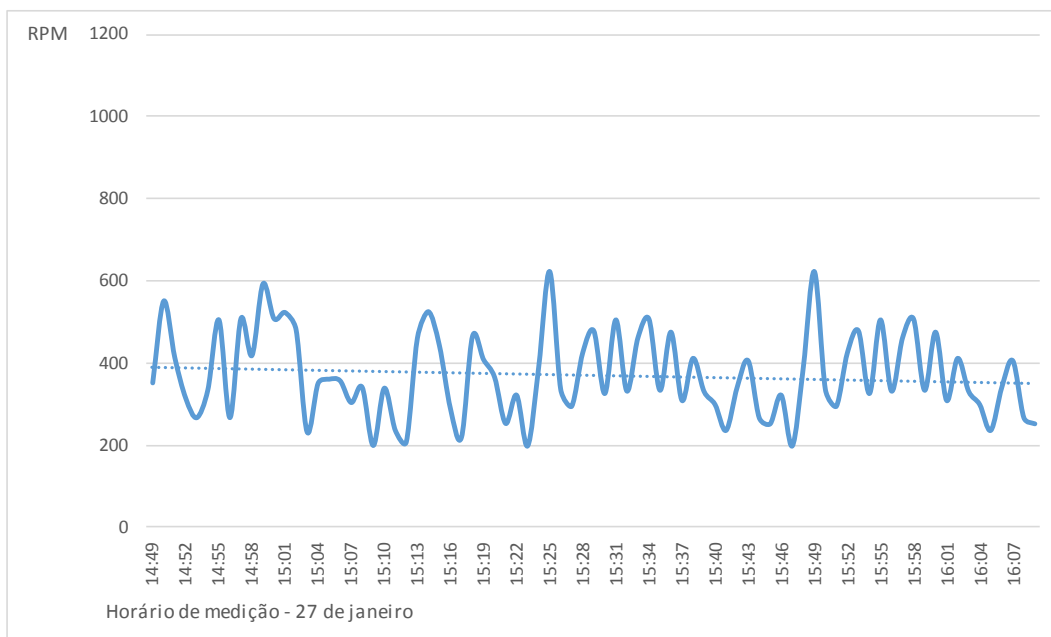


Figura 44 – Gráfico de sensibilidade ao vento

Os dados anemométricos disponibilizados exibem as velocidades médias do vento obtidas a cada 10 minutos, referentes às informações registadas a cada 10 segundos pelos sensores do sistema, de acordo com a programação eletrônica pré-existente no equipamento. No gráfico da Figura 43 observa-se a variação da velocidade do vento no mesmo período amostral tido como referência.

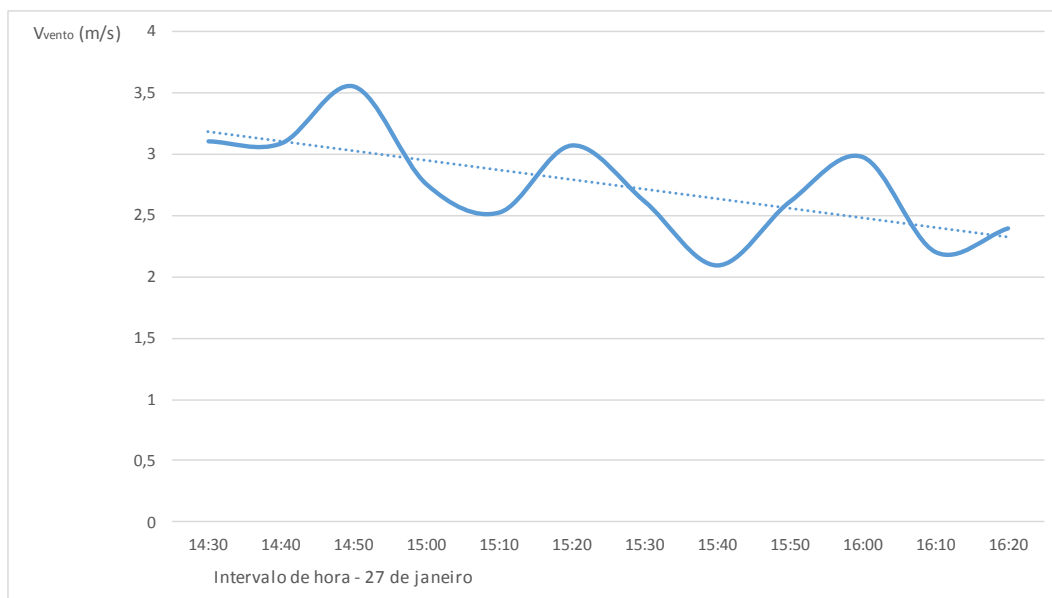


Figura 45 – Gráfico de variação da velocidade do vento

Ao comparar os gráficos é possível verificar algumas semelhanças nas curvas que indicam a sensibilidade do sistema. As linhas de tendência de ambos os gráficos demonstram

um decréscimo da velocidade dos ventos e das RPM ao longo do período amostral. Ao considerar estas linhas de tendência constata-se que o sistema operou entre 350 e 400 RPM enquanto o vento esteve entre 2 e 3,5 m/s no período estudado.

É possível também notar no gráfico de sensibilidade ao vento que, mesmo na média por minuto, há picos de mais de 600 RPM, justamente às 15:00, 15:25 e 15:50, que condizem com picos de velocidade de vento acima dos 3 m/s, observados nos mesmos horários próximos às 15:00, 15:25 e 15:50, respectivamente. Por outro lado, mesmo sob rajadas menos intensas de vento, o sistema foi capaz de se manter acima de 200 RPM.

Ainda que estes resultados representem uma sensibilidade notória do equipamento aos ventos, existiram dois fatores que interferiram nas leituras e nas análises, são estes: a oscilação de direção dos ventos predominantes que por sua vez prejudica a medição visto que a equipa de estudos tinha de permanecer junto ao equipamento, com interferência no processo de reorientação e aproveitamento do vento, e, atrasos nas leituras do tacómetro que podem influenciar nas médias obtidas. Como orientação para trabalhos futuros, foi já iniciado o desenvolvimento de um equipamento de registo automático de dados do regime do rotor, sincronizado com o tempo UTC, com o objectivo de aumentar a representatividade da amostragem para a avaliação do regime do rotor em função da velocidade do vento.

Ao considerar os picos de 600 RPM do sistema alcançados com a força de ventos da ordem dos 3,0 m/s e aplicá-los pela equação⁴ geral da taxa de velocidade de ponta (λ) é possível estimar a variável λ do sistema construído sendo:

- V = velocidade do vento = 3,05 m/s
- ω = velocidade angular de rotação = 600 RPM = 62,83 rad/s
- r = raio do rotor da turbina = 0,615m

Tem-se que o aproveitamento na condição em que houve o maior aproveitamento dos ventos durante o teste a taxa de velocidade de ponta é de $\lambda = 12,67$ e portanto o coeficiente de aproveitamento⁵ (C_p) do sistema está próximo de 0,35.

Contudo esta é apenas uma estimativa que considera momentos pontuais do sistema em operação e requer certamente uma bateria maior de ensaios e análises para estimar valores mais precisos.

⁴ Ver equação [3] – Capítulo 2.8.4 velocidade de ponta

⁵ A estimativa do coeficiente de aproveitamento (C_p) considera os valores dispostos na figura 2 - Relação: coeficiente de aproveitamento e taxa de velocidade de ponta. Fonte: BURTON, T. – 2001 (Adaptado pelo autor). Pág. 15

4.2 Desempenho elétrico

Durante o teste elétrico, foi possível perceber que numa rotação logo acima da faixa dos 800 RPM a tensão é estabilizada em 4,986 V sem mais aumentar mesmo com o incremento das rotações, o que já evidencia a eficácia do circuito eletrónico de regulação de tensão limitada a 5V e também uma condição de plena carga do gerador. A Tabela 2 exhibe as leituras feitas durante o ensaio descrito.

Tabela 2 – Regime do rotor (RPM) e Tensão eléctrica (V)

RPM	Tensão (V)	RPM	Tensão (V)
95	0,003	460	2,26
115	0,004	530	2,7
150	0,08	615	3,3
180	0,09	620	3,28
200	0,1	700	3,8
235	0,6	800	4,4
260	1,1	930	4,98
315	1,35	1100	4,98
320	1,4	1180	4,98
370	1,7	1250	4,98
420	2	1300	4,98

Visto isto, foi adicionalmente testada a capacidade de carregamento de um dispositivo eletro-eletrónico. O equipamento foi então novamente posto a trabalhar de maneira controlada, numa faixa superior aos 900 RPM, e o telemóvel (Apple / Iphone SE) foi conectado ao terminal USB previamente instalado no aerogerador. Nesta ocasião o multímetro também foi conectado ao circuito para realizar a leitura da energia consumida pelo carregamento do telemóvel.

Com o teste de desempenho elétrico, realizado sob condições controladas, foi possível estabelecer uma curva de tensão eléctrica em função do regime do rotor (RPM) do sistema e, deste modo, compreender o intervalo de regimes ideal para gerar energia eléctrica. O gráfico a seguir exhibe a curva de geração de energia em função das RPM.

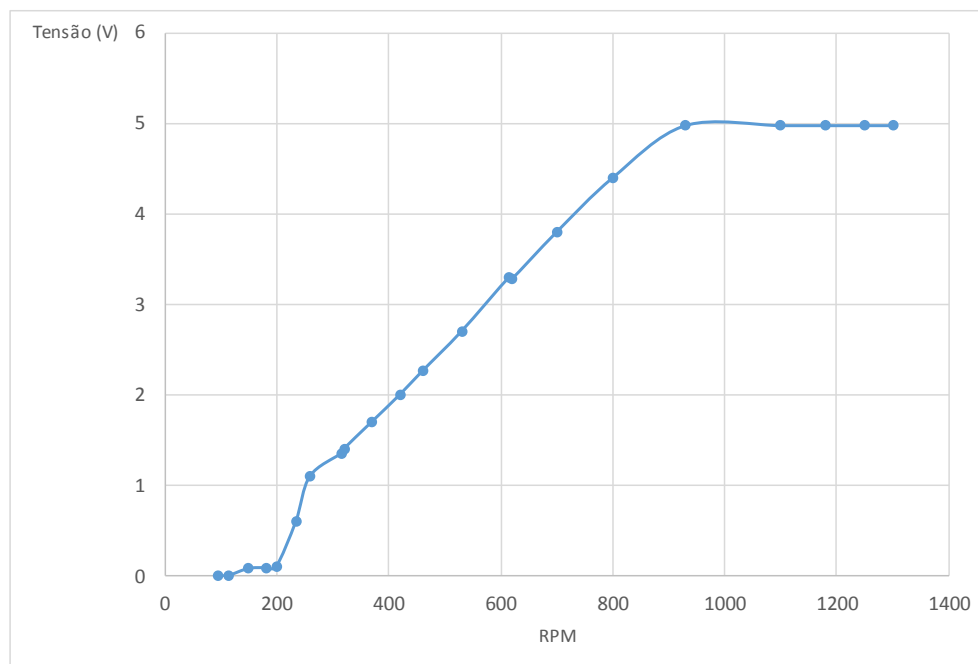


Figura 46 – Gráfico de tensão eléctrica em função do regime do rotor (RPM)

No teste de carregamento do telemóvel, com o funcionamento a plena carga observou-se que:

- O ecrã do telemóvel acende, vibra e indica continuamente a condição de carregamento.
- A tensão na ponta do sistema é estabilizada em 4,31 V.

Deste modo, entende-se que a energia é efetivamente transmitida e consumida, e, o circuito eletrónico demonstra a sua eficácia ao limitar a tensão distribuída a aproximadamente 5V.

De acordo com a curva de tensão eléctrica observa-se que a partir de 230 RPM aproximadamente se detecta 1 V de tensão eléctrica e o sistema alcança a condição de plena carga a partir de 850 RPM. Mesmo quando submetido a rotações de mais de 1300 RPM para simular condições mais extremas de vento, a tensão permaneceu estabilizada e o gerador suportou a velocidade sem ruídos e avarias.

5 Conclusões

Com o presente estudo foi possível compreender diversos aspetos relacionados com a tecnologia da energia eólica. A experiência realizada neste trabalho proporcionou ao aluno uma interação prática e aplicada com o laboratório de mecânica, a aprender a manusear ferramentas e a fabricar peças, bem como utilizar equipamentos de proteção individual. Além disso, ainda permitiu estimular processos criativos na solução de problemas e no reaproveitamento de sucatas metálicas, e finalmente, estabelecer procedimentos de avaliação do sistema construído com os recursos disponíveis no IPB.

O aerogerador apresentou além da boa robustez mecânica, uma sensibilidade satisfatória aos ventos, visto que durante os testes foram diversas vezes alcançadas rotações por minuto suficientes para gerar energia elétrica conforme planeado durante a concepção do protótipo. O carregamento do telemóvel verificado durante os ensaios elétricos reforça a condição de geração de energia elétrica.

Para estimar a potência do equipamento são necessários mais ensaios que permitam estabelecer um coeficiente de aproveitamento (C_p) geral do equipamento.

Mesmo com estes resultados, é importante ressaltar que os testes de avaliação da sensibilidade ao vento do equipamento precisam ser aprimorados, tanto por procedimentos que sofram menor interferência da variação direcional dos ventos quanto pelo uso de sensores mais modernos capazes de gerar e armazenar dados por um maior período de tempo.

Isto posto, fica à disposição do IPB um aerogerador concebido e construído por um aluno com o auxílio de professores e técnicos de laboratórios que pode futuramente ser estudado e aprimorado com uso de soluções não utilizadas neste protótipo, são elas:

- Instalação de baterias capazes de armazenar a eletricidade produzida.
- Substituição do atual gerador de energia de corrente contínua por um sistema de corrente alternada que possa de facto alimentar baterias e armazenar a energia gerada.
- Optimizar estrutura de sustentação para que o aerogerador esteja mais exposto aos ventos devido à maior distância do solo.
- Adaptar um rolamento no eixo de orientação para tornar o equipamento ainda mais sensível as variações direcionais do vento.
- Criação de novas pás com dimensões maiores para aumentar a área de captação de energia cinética dos ventos.

- Desenvolver novos procedimentos amostrais de velocidade angular sob condições reais que permitam perceber com maior precisão a taxa de velocidade de ponta (λ) e coeficiente de aproveitamento (C_p).
- Anexar o aerogerador a sistemas fotovoltaicos para geração complementar de energia.
- Adaptar o sistema de modo que seja possível sua utilização como ponto de carregamento de telemóveis para a comunidade estudantil do IPB.

Por fim, acredita-se que o aerogerador construído neste estudo sirva de base tecnológica, motivação e principalmente inspiração para alunos interessados na aprendizagem e entendimento desta tecnologia de geração renovável.

6 Referências bibliográficas

ALAWIN, A. A.; *et al.* **Renewable energy education in engineering schools in Jordan: Existing courses and level of awareness of senior students.** Faculty of Engineering Technology, Al-Balqa' Applied University, Jordania. Published by ed. Elsevier, Netherlands – 2016.

APREN. **Parques Eólicos em Portugal.** Associação Portuguesa de Energias Renováveis Energias endógenas de Portugal. Portugal – 2018.

BALLESTEROS, V. La educación en energías renovables como alternativa de promoción del compromiso público ascendente entre los Indígenas Wayuu en la Alta Guajira. Revista Facultad de Ingeniería. Colombia - 2019.

BURTON T. *et al.* **Wind Energy Handbook.** John Wiley & Sons, LTD. Baffins Lane, Chichester West Sussex. Inglaterra – 2001.

BURTON, T.; *et al.* **Wind Energy – Comes of Age.** New York –, Editora John Wiley & Sons. Estados Unidos da America - 1995.

CASTRO, R. M. G. **Energias Renováveis e Produção Descentralizada. Introdução à Energia Eólica.** Instituto Superior Técnico DEEC / Secção de Energia, Universidade Técnica de Lisboa. Portugal – 2005.

COSTA, P. A. S. **Atlas do Potencial Eólico para Portugal Continental.** Dissertação submetida para a obtenção do grau de Mestre em Ciências e Engenharia da Terra, Universidade de Lisboa. Portugal – 2004.

COSTA, R. F.; FIGUEIREDO, F. F. **Identificação dos impactos ambientais na instalação de um parque eólico.** Revista Lider N°34I/2019. Centro de Estudios del Desarrollo Local y Regional (Universidad de Los Lagos). Chile – 2019.

DIÁRIO DA REPUBLICA. **Decreto Lei n° 25/2013 – Microprodução de Energia.** Ministério da Economia e do Emprego. Portugal – 2013.

DIÁRIO DA REPUBLICA. **Decreto Lei n° 34/2011 – Produção descentralizada de energia.** Ministério da Economia da inovação e do desenvolvimento. Portugal – 2011.

DUNLOSKEY, J.; *et al.* **Improving Students' Learning With Effective Learning Techniques: Promising Directions From Cognitive and Educational Psychology.** Kent State University. Published by Association for Psychological Science. EUA – 2013.

DUTRA, R. M. **Viabilidade Técnico-Econômica da Energia Eólica Face ao Novo Marco Regulatório do Setor Elétrico Brasileiro**. Mestrado diss., Rio de Janeiro: COPPE/ Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil – 2001.

DUTRA, R. **Energia eólica princípios e tecnologias**. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. CEPEL – Sistema Eletrobrás. Brasil – 2008.

EEA. **Resource-efficient cities: vital step towards urban sustainability in Europe**. European Environment Agency News, disponível em: <https://www.eea.europa.eu/highlights/resource-efficient-cities-vital-step> . UE – 2020.

ESTEVES, S. T. **Base de dados do potencial energético do vento em Portugal – metodologia e desenvolvimento**. Dissertação submetida para a obtenção do grau de Mestre em Ciências e Engenharia da Terra. Universidade de Lisboa. Portugal – 2004.

GARRÉ, S. O. **Avaliação experimental do desempenho aerodinâmico de pequenas turbinas eólicas confeccionadas em prototipagem 3D**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Brasil – 2015.

GROSS, S. **Why are fossil fuels so hard to quit**. The Brookings Institution. Disponível em: <https://www.brookings.edu/essay/why-are-fossil-fuels-so-hard-to-quit/> . EUA – 2021.

HIESTER, T.R.; PENNELL, W.T. **The Siting Handbook for Large Wind Energy Systems**. Windbooks, New York. Estados Unidos da America – 1983.

INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANÇA – IPB. **Estudar na ESE**. Escola Superior de Educação. Link de acesso disponível em: <http://www.es.eipb.pt/index.php/ese/estudar-na-ese/cursos> . Portugal – 2020.

INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANÇA – IPB. **Estudar na ESTIG**. Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Bragança. Link de acesso disponível em: <http://www.estig.ipb.pt/index.php/estig/estudar-na-estig> . Portugal – 2020.

IPCC. **Renewable Energy Resources and Climate Change Mitigation. Summary for policymakers and technical summary**. Special Report of Intergovernmental Panel of Climate Change. Disponível em: https://archive.ipcc.ch/pdf/special-reports/srren/SRREN_FD_SPM_final.pdf . ONU – 2012.

IPCC. **AR6 Climate change 2021: mitigation of climate change**. Working Group III contribution to the Sixth Assessment Report. Intergovernmental Panel of Climatic Changes ONU – 2021.

JENNINGS, P; LUND, C. **Renewable energy education for sustainable development.** Australian Cooperative Research Centre for Renewable Energy, Murdoch University, Murdoch, WA6150. Australia – 2001.

KANDPAL, T. C.; BROMAN, L. **Renewable energy education for the future.** Indian Institute of Technology, New Delhi, India – 2016.

KANDPAL, T.; GARG, H. **Renewable Energy Education for Technicians/Mechanics,** Renewable Energy. Indian Institute Technology, New Delhi. India – 1999.

KANDPAL, T.; GARG, H. **Renewable Energy Education in Developing Countries: Indian Scenario.** Renewable Energy, Technology and the Environment, Indian Institute Technology, New Delhi. India – 1992.

KELLOGG, S.; PETTIGREW, S. **Toolbox for sustainable city living;** Cambridge MA – USA. Editora South and Press. Estados Unidos da America - 2008.

KOENEMANN, D.; LEHMANN, K. P. **Unlimited Opportunities.** Sun and Wind Energy. Alemanha - 2005.

LYDIA, M.; *et al.* **A comprehensive review on wind turbine power curve modeling techniques.** Karunya University, Tamil Nadu, India. Published by Renewable and Sustainable Energy Reviews, Ed. Elsevier. Netherlands – 2013.

MAKEZINE. **Wind Power Generator.** Maker Workshop – Make community LLC. Disponível em: <https://makezine.com/2009/02/13/maker-workshop-pdf-wind-power-gener/> . EUA – 2009.

MARTIN, S. S.; CHEBAK, A. **Concept of educational renewable energy laboratory integrating wind, solar and biodiesel energies.** Department of Computer Science and Engineering, University of Quebec at Rimouski, Canada – 2016.

MAY, R. **Paint it black: Efficacy of increased wind turbine rotor blade visibility to reduce avian fatalities.** Norwegian Institute for Nature Research. Ecology and Evolution magazine. Noruega – 2020.

MILLAR, R. **The role practical work in the teaching and learning of science.** The University of York, Department of Educational Studies. Inglaterra – 2004.

NATIONAL GEOGRAPHIC. **Distribution of Resources.** Resource Library I. Disponível em: <https://www.nationalgeographic.org/idea/distribution-resources/> . EUA – 2021.

NREL. **Science projects in renewable energy and energy efficiency. A guide for Secondary School Teachers.** A national laboratory of the U. S. Department of Energy. EUA – 2007.

PELLEGRINO, J, W.; *et al.* **Knowing what students know. The science and design of educational assessment.** National Research Council. EUA – 2001.

PEREIRA, A. H. **Modeling of Full-converter Wind Turbine Generators for Power System Studies.** Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG.. Brasil – 2015.

PEREIRA, O. A. M. **Infra-Estruturas Eólicas: Módulo Autónomo de Monitorização.** Departamento de eletrônica, telecomunicações e informática. Universidade do Aveiro – Portugal - 2010.

PINTO, L. I. C.; MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B. **O mercado brasileiro da energia eólica, impactos sociais e ambientais** – Artigo científico disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1980-993X2017000601082 , Revista Ambiente & Água. Brasil – 2017.

PINTO, M. **Fundamentos de Energia Eólica.** LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda. Grupo Editorial Nacional. Brasil – 2013.

POZO, M. I. **Aprendices y Maestros. La nueva cultura del aprendizaje.** – Alianza Editorial, Madrid. Espanha – 1996.

RAGHEB, M.; RAGHEB, A. M. **Wind turbines theory-the Betz equation and optimal rotor tip speed ratio.** INTECH Open Access Publisher, 2011.

SALDANHA, C. C.; *et al.* **Semana Pedagógica – Estilos de Aprendizagem.** SEED - Governo do Estado do Paraná. Brasil – 2016.

SALTELLI, A.; FUNTOWICZ, S. O. **What is Science's crisis really about?.** Centre for the Study of the Sciences and the Humanities (SVT), University of Bergen, Norway. Institute of Environmental Science and Technology (ICTA), Universidad Autonoma de Barcelona. Espanha – 2017.

SCHUMACHER, E. F. **Small Is Beautiful** Economics as if people mattered. London Blond & Briggs. Inglaterra – 1973.

SDG. **Voluntary National Review.** Sustainable Development Goals – Knowledge Platform. Disponível em: <https://sustainabledevelopment.un.org/memberstates/portugal> . ONU – 2017.

SILVA, F. Estudo aerológico na unidade piloto de sistemas de aproveitamento de energia eólica em Lourel – Sintra Lisboa, 1ª fase. Portugal - 1986.

SIMIUI, E.; SCANLAN, R.H. **Wind Effects on Structures**. Second Edition. Editora John Wiley and Sons. Estados Unidos da America – 1986.

TAVNER, P.; *et al.* **Influence of wind speed on wind turbine reliability**. Wind Engineering. Vol 30 n°1. Durham University. Inglaterra – 2006.

THILANKA, M. S.; *et al.* **Job creation potentials and skill requirements in, PV, CSP, wind, water-to-energy and energy efficiency value chains**. Institute Centre for Smart and Sustainable Systems, Masdar Institute of Science and Technology. Published by Renewable and Sustainable Energy Reviews. Ed. Elsevier, Netherlands – 2015.

WILSDON, J.; WILLIS, R. **See-through Science**. Why public engagement needs to move upstream. Editora Demos, Londres. Inglaterra – 2004.

7 Anexos

7.1 Anexo 1 – *Data sheet* do regulador de tensão



Continental Device India Limited

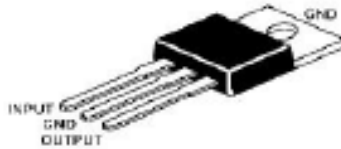
An ISO/TS 16949, ISO 9001 and ISO 14001 Certified Company



3-TERMINAL POSITIVE VOLTAGE REGULATOR

LM7808

**TO-220
Plastic Package**



The Voltages available allow these Regulators to be used in Logic Systems, Instrumentation, HI-FI Audio Circuits and other Solid State Electronic Equipment

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (T_a=25°C)

DESCRIPTION	SYMBOL	VALUE	UNIT
Input Voltage	V _{IN}	35	V
Power Dissipation at T _a =25°C	P _D	2	W
Power Dissipation at T _c =25°C	P _D	15	W
Operating Free Air, Case, or Virtual Junction Temperature Range	T _J	0 to +150	°C
Storage Temperature Range	T _{stg}	- 65 to +150	°C
Lead Temperature 1.6mm (1/16 Inch) from Case for 10 seconds	T _L	260	°C

Recommended Operating Conditions

DESCRIPTION	SYMBOL	MIN	TYP	MAX	UNIT
Input Voltage	V _I	10.5		25	V
Output Current	I _O			1.5	A
Operating Junction Temperature	T _J	0		125	°C

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (T_a=25°C unless specified otherwise)

V_{IN}=14V, I_O=500mA, T_a=25°C

DESCRIPTION	SYMBOL	TEST CONDITION	MIN	TYP	MAX	UNIT
Output Voltage	V _O	25°C	7.7		8.3	V
		I _O =5mA ~ 1A V _{IN} =10.5 ~ 23V, P _D ≤ 15W, 0°C ~ 125°C	7.6		8.4	V
Line Regulation	R _{REG}	V _{IN} =10.5 ~ 25V, 25°C			160	mV
		V _{IN} =11 ~ 17V, 25°C			80	mV
Ripple Rejection	R _{RR}	V _{IN} =11.5 ~ 21.5V, f=120Hz, 0°C~125°C	55			dB
Load Regulation	R _{DGL}	I _O =5mA ~ 1.5A, 25°C			160	mV
		I _O =250mA ~ 750mA, 25°C			80	mV
Output Resistance	r _O	f=1KHz, 0°C~125°C		0.016		Ω
Temperature Coefficient of Output Voltage	ΔV _O /ΔT	I _O =5mA, 0°C~25°C		-0.8		mV/°C
Output Noise Voltage	V _{NO}	f=10Hz ~ 100KHz, 25°C		52		μV
Dropout Voltage	V _{DF (min)}	I _O =1A, 25°C		2.0		V
Quiescent Current	I _Q	25°C			8.0	mA
Quiescent Current Change	ΔI _{QM}	V _{IN} =10.5 ~ 25V, 0°C~150°C			1.0	mA
		I _O =5mA ~ 1A, 0°C~150°C			0.5	mA
Short Circuit Output Current	I _{SC}	25°C		450		mA
Peak Output Current	I _{OMAX}	25°C		2.2		A

LM7808Rev. 1 070306E

7.2 Anexo 2 – Registo de velocidade de vento (m/s) e de regime do rotor (RPM).

hora	RPM	Média	hora	RPM	Média	hora	RPM	Média
14:49:00	420	351,8333	15:27:30	280	207,1667	15:52:50	190	325
14:49:10	340		15:27:40	160		15:53:00	340	
14:49:20	580		15:27:50	160		15:53:10	330	
14:49:30	354		15:28:00	350		15:53:20	440	
14:49:40	297		15:28:10	213		15:53:30	320	
14:49:50	120		15:28:20	80		15:53:40	330	
14:50:00	80	551,6667	15:28:30	300	460	15:53:50	600	505
14:50:10	470		15:28:40	400		15:54:00	750	
14:50:20	670		15:28:50	470		15:54:10	600	
14:50:30	380		15:29:00	490		15:54:20	350	
14:50:40	580		15:29:10	700		15:54:30	330	
14:50:50	1130		15:29:20	400		15:54:40	400	
14:51:00	790	413,3333	15:29:30	640	525	15:54:50	390	331,6667
14:51:10	100		15:29:40	500		15:55:00	200	
14:51:20	200		15:29:50	580		15:55:10	260	
14:51:30	570		15:30:00	450		15:55:20	200	
14:51:40	620		15:30:10	460		15:55:30	480	
14:51:50	200		15:30:20	520		15:55:40	460	
14:52:00	278	313	15:30:30	700	442,5	15:55:50	530	461,6667
14:52:10	300		15:30:40	560		15:56:00	560	
14:52:20	400		15:30:50	280		15:56:10	500	
14:52:30	520		15:31:00	380		15:56:20	550	
14:52:40	270		15:31:10	315		15:56:30	350	
14:52:50	110		15:31:20	420		15:56:40	280	
14:54:20	290	266,6667	15:31:30	200	288,5	15:56:50	280	507,5
14:54:30	250		15:31:40	330		15:57:00	530	
14:54:40	210			350		15:57:10	530	
14:54:50	200			311		15:57:20	530	
14:55:00	380		15:39:30	240		15:57:30	640	
14:55:10	270		15:39:40	300		15:57:40	535	
14:55:20	290	334,1667	15:39:50	120	218,3333	15:57:50	200	333,3333
14:55:30	380		15:40:00	140		15:58:00	230	
14:55:40	315		15:40:10	100		15:58:10	520	
14:55:50	260		15:40:20	70		15:58:20	290	
14:56:00	370		15:40:30	400		15:58:30	260	
14:56:10	390		15:40:40	480		15:58:40	500	
14:56:20	410	505	15:40:50	500	465	15:58:50	390	475
	500		15:41:00	750		15:59:00	610	
	600		15:41:10	500		15:59:10	490	
14:58:40	710		15:41:20	480		15:59:20	290	
14:58:50	580		15:41:30	280		15:59:30	360	
14:59:00	230		15:41:40	280		15:59:40	710	
14:59:10	340	266,3333	15:41:50	400	408,3333	15:59:50	400	308,3333
14:59:20	560		15:42:00	500		16:00:00	400	
14:59:30	95		15:42:10	450		16:00:10	300	
14:59:40	93		15:42:20	580		16:00:20	240	
14:59:50	130		15:42:30	290		16:00:30	120	
15:00:00	380		15:42:40	230		16:00:40	390	

hora	RPM	Média	hora	RPM	Média	hora	RPM	Média
15:00:10	460	508,3333	15:42:50	180	365	16:00:50	550	411,6667
15:00:20	440		15:43:00	430		16:01:00	480	
15:00:30	570		15:43:10	520		16:01:10	440	
15:00:40	390		15:43:20	240		16:01:20	480	
15:00:50	430		15:43:30	420		16:01:30	190	
15:01:00	760		15:43:40	400		16:01:40	330	
15:01:10	530	418,3333	15:43:50	280	252,6667	16:01:50	420	330
15:01:20	580		15:44:00	300		16:02:00	300	
15:01:30	370		15:44:10	200		16:02:10	260	
15:01:40	450		15:44:20	266		16:02:20	260	
15:01:50	360		15:44:30	340		16:02:30	440	
15:02:00	220		15:44:40	130		16:02:40	300	
15:14:30	300	593,3333	15:44:50	460	321,6667	16:02:50	470	298,3333
15:14:40	490		15:45:00	580		16:03:00	290	
15:14:50	670		15:45:10	260		16:03:10	350	
15:15:00	980		15:45:20	190		16:03:20	310	
15:15:10	680		15:45:30	300		16:03:30	190	
15:15:20	440		15:45:40	140		16:03:40	180	
15:15:30	610	508,3333	15:45:50	100	197,8333	16:03:50	210	235,5
15:15:40	500		15:46:00	147		16:04:00	100	
15:15:50	350		15:46:10	190			125	
15:16:00	590		15:46:20	200			198	
15:16:10	500		15:46:30	300		16:11:00	330	
15:16:20	500		15:46:40	250		16:11:10	450	
15:16:30	460	523,3333	15:46:50	380	389,6667	16:11:20	550	340
15:16:40	700		15:47:00	380		16:11:30	490	
15:16:50	450		15:47:10	420		16:11:40	360	
15:17:00	410		15:47:20	360		16:11:50	240	
15:17:10	420		15:47:30	380		16:12:00	260	
15:17:20	700		15:47:40	418		16:12:10	140	
15:17:30	620	481,6667	15:47:50	520	623,3333	16:12:20	280	405
15:17:40	620		15:48:00	530		16:12:30	310	
15:17:50	440		15:48:10	530		16:12:40	210	
15:18:00	280		15:48:20	780		16:12:50	640	
15:18:10	380		15:48:30	670		16:13:00	550	
15:18:20	550		15:48:40	710		16:13:10	440	
15:18:30	500	231,6667	15:48:50	700	335	16:13:20	340	266,6667
15:18:40	280		15:49:00	230		16:13:30	300	
15:18:50	220		15:49:10	440		16:13:40	220	
15:19:00	250		15:49:20	150		16:13:50	340	
15:19:10	80		15:49:30	270		16:14:00	250	
15:19:20	60		15:49:40	220		16:14:10	150	
15:19:30	180	350,8333	15:49:50	140	294,1667	16:14:20	450	251,6667
15:19:40	350		15:50:00	230		16:14:30	180	
15:19:50	280		15:50:10	195		16:14:40	125	
15:20:00	420		15:50:20	300				
15:20:10	560		15:50:30	360				
15:20:20	315		15:50:40	540				

hora	RPM	Média	hora	RPM	Média	hora	RPM	Média
15:20:30	300	360	15:50:50	490	425			
15:20:40	220		15:51:00	390				
15:20:50	400		15:51:10	360				
15:21:00	410		15:51:20	520				
15:21:10	400		15:51:30	350				
15:21:20	430		15:51:40	440				
15:21:30	400	356,6667	15:51:50	380	478,3333			
15:21:40	520		15:52:00	390				
15:21:50	360		15:52:10	650				
15:22:00	180		15:52:20	600				
15:22:10	150		15:52:30	330				
15:22:20	530		15:52:40	520				
15:22:30	410	303,3333						
15:22:40	240							
15:22:50	200							
15:23:00	400							
15:23:10	290							
15:23:20	280							
15:23:30	600	340,3333						
15:23:40	440							
15:23:50	325							
15:24:00	360							
15:24:10	225							
15:24:20	92							
15:24:30	150	198,8333						
15:24:40	177							
15:24:50	191							
15:25:00	195							
15:25:10	200							
15:25:20	280							
15:25:30	140	338,3333						
15:25:40	260							
15:25:50	680							
15:26:00	520							
15:26:10	290							
15:26:20	140							
15:26:30	130	235						
15:26:40	230							
15:26:50	410							
15:27:00	170							
15:27:10	280							
15:27:20	190							

TIMESTAMP	VelMed
TS	m/s
	WVc
27/01/2021 14:30	3,108
27/01/2021 14:40	3,091
27/01/2021 14:50	3,555
27/01/2021 15:00	2,757
27/01/2021 15:10	2,527
27/01/2021 15:20	3,074
27/01/2021 15:30	2,618
27/01/2021 15:40	2,096
27/01/2021 15:50	2,616
27/01/2021 16:00	2,92
27/01/2021 16:10	2,206
27/01/2021 16:20	2,398
27/01/2021 16:30	2,412