

UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA

FACULDADE DE ENGENHARIA, ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO ELETROMECAÂNICO PARA
GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA POR MEIO DE ACOPLAMENTO
EM UM EXAUSTOR EÓLICO**

RÔMULO AUGUSTO PADOVEZI FILLETI

ORIENTADOR: PROF. DR. APARECIDO DOS REIS COUTINHO

SANTA BÁRBARA D'OESTE, SP

2016

UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA

FACULDADE DE ENGENHARIA, ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO ELETROMECHANICO PARA
GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA POR MEIO DE ACOPLAMENTO
EM UM EXAUSTOR EÓLICO**

RÔMULO AUGUSTO PADOVEZI FILLETI

ORIENTADOR: PROF. DR. APARECIDO DOS REIS COUTINHO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da Faculdade de Engenharia Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Metodista de Piracicaba – UNIMEP, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Produção.

SANTA BÁRBARA D'OESTE, SP

2016

Prof. Dr. Aparecido dos Reis Coutinho

PPGEP - UNIMEP

Prof. Dr. Carlos Roberto Camello Lima

PPGEP - UNIMEP

Prof. Dr. Gilberto Petraconi Filho

ITA - Instituto Tecnológico da Aeronáutica

Aos meus anjos Ana Júlia, Raul e Juliana de Paula Filleti.

AGRADECIMENTOS

Com uma duração de 2 anos apenas, a realização do mestrado exige, como em qualquer outra atividade, tempo de dedicação. Sendo assim, por inúmeras vezes não pude estar na companhia de pessoas amadas, para aprofundar-me nos conceitos, realizar pesquisas e testes por várias vezes até alcançar resultados desejados ou satisfatórios.

Desta forma, gostaria de agradecer o apoio recebido de meus filhos Raul de Paula Filleti e Ana Júlia de Paula Filleti, por participarem e entenderem minha ausência ao longo destes anos.

Agradecimento especial para minha esposa Juliana de Paula Filleti por me apoiar em todas as decisões que tomei, estar sempre ao meu lado, me acalmar nas horas de tormenta e importar-se comigo. Além do apoio moral, teve uma participação fundamental neste trabalho, pois como mestre em estatística e doutora em economia, revisou minha dissertação e me ajudou a realizar o planejamento de projeto, quantificar os testes e analisar os resultados dos testes estatísticos.

Devo gratidão aos meu pais, Augusto José Filleti e Susi Lázara Padovezi Filleti, por me educarem, participarem de minha vida de forma ativa, discordarem de minhas opiniões quando necessário e dando-me bons exemplos ao longo de toda minha vida. Aos meus irmãos: Ramon Augusto Padovezi Filleti, por me ensinar a lidar com a frustração e com a perda; Remo Augusto Padovezi Filleti, por me mostrar que sempre há uma forma diferente de encarar o mundo.

Agradeço ao Prof. Dr. Aparecido dos Reis Coutinho, por toda paciência e apoio que me prestou durante esta jornada e a todos seus colaboradores da UNIMEP que, me ajudaram a conquistar mais uma vez meus objetivos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES - Brasil.

"Quem nunca errou nunca experimentou nada novo".

Albert Einstein

RESUMO

Desde a segunda revolução industrial, a energia elétrica se tornou essencial no cotidiano humano, sendo amplamente usada nos setores residencial e industrial. Apesar dos benefícios e comodidades, o uso cada vez mais intenso desse tipo de energia está intimamente ligado ao aquecimento global. Atualmente, 67% da matriz energética elétrica mundial é formada por combustíveis com alta intensidade de carbono como carvão, petróleo e gás natural, que são as principais fontes dos gases de efeito estufa (GEE). Nessa perspectiva, a produção de energia elétrica a partir de fontes de energia com baixa intensidade de carbono, como hidráulica, solar, eólica e nuclear, se apresenta como uma alternativa relevante na redução da emissão de GEE. Neste sentido, o presente estudo tem por objetivo o desenvolvimento de um dispositivo eletromecânico para geração de energia elétrica por meio do aproveitamento de energia eólica proveniente de sistemas exaustores de ar. Para alcançar este objetivo, foi empregada a metodologia de pesquisa exploratória, para avaliar o cenário mundial e brasileiro de geração de energia, e do trabalho experimental, para desenvolvimento e construção do dispositivo eletromecânico de geração energética por meio do uso de um exaustor eólico. Além da construção, o presente estudo permitiu quantificar a energia elétrica gerada e armazenada pelo dispositivo, de acordo com a velocidade do vento captado pelo exaustor eólico.

Palavras-chave: energia, energia eólica, geração de energia, exaustores eólicos, sustentabilidade.

ABSTRACT

Since the second industrial revolution, electricity became essential in our daily life and widely used by both residential and industrial sectors. Besides the benefits and convenience, the increasingly intense use of this type of energy is strictly linked with the global warming issues. Today, 67% of the global electricity energy matrix is based in high carbon intensive fuels, such coal, oil and natural gas, which are the main sources of greenhouse gases (GHG). Thus, the power generation from low carbon intensive sources, e.g., hydraulic, solar, wind and nuclear, appears as a relevant alternative to reduce the GHG emissions. In this sense, the aim of this study is the development of an electric-mechanic device, which generates electricity from exhausts systems. First, an exploratory research was performed in order to map the both local and global power generation scenarios, and then an experimental work was performed to develop and build the electric-mechanic device, which generates electricity from an exhaust fan. Besides the construction, the present work aims to quantify the amount of electricity that could be generated and stored by the device, according to the wind velocity received by the exhaust fan.

Keywords: clean energy, wind energy, power generation, sustainability.

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Justificativa e Relevância	3
1.2	Problema de Pesquisa.....	4
1.3	Objetivos da Pesquisa.....	4
1.4	Visão Macro da Pesquisa.....	5
1.5	Estrutura do Trabalho	6
2	Referencial Teórico	7
2.1	Demanda Energética Mundial.....	8
2.2	Demanda Energética Brasileira	12
2.3	Formas de Conversão de Energia	15
2.3.1	Conversão de Energia Térmica em Elétrica.....	16
2.3.2	Conversão de Energia Hidráulica em Elétrica.....	18
2.3.3	Conversão de Energia Nuclear em Elétrica.....	20
2.3.4	Conversão de Energia Solar em Elétrica	21
2.3.5	Conversão de Energia Eólica em Elétrica	24
2.4	Aproveitamento Energético - Novos Estudos	28
2.5	Análise de Circuitos	30
2.5.1	Circuito Retificadores de Meia Onda.....	30
2.5.2	Circuito Retificadores de Onda Completa em Ponte	31
2.6	Planejamento de Experimento.....	32
3	Materiais e Métodos	33
3.1	Materiais e Instrumentos.....	35

3.2 Desenvolvimento Experimental do Sistema de Geração de Energia: Construção dos protótipos.....	38
3.2.1 Protótipo 1	39
3.2.2 Protótipo 2	40
3.2.3 Protótipo 3	40
3.2.4 Protótipo 4	41
3.2.5 Protótipo 5	42
3.3 Planejamento do Experimento.....	43
4 Resultados	47
4.1 Protótipos 1, 2, 3 e 4.....	47
4.2 Protótipo 5.....	50
4.2.1 Planejamento do Experimento	55
5 Conclusões	58
5.1 Trabalhos futuros	58
Referências Bibliográficas	60

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Visão geral da metodologia de sequência do trabalho.	5
Figura 2 - Produção mundial de energia primária entre 1971 e 2013	8
Figura 3 - Produção total de energia primária no mundo em 1973	9
Figura 4 - Produção mundial de energia primária em 2013	10
Figura 5 - Consumo de energia primária mundial em 2001	11
Figura 6 - Consumo de energia primária mundial em 2013	11
Figura 7 - Consumo de energia brasileira por setores em 2013	13
Figura 8 - Consumo energético brasileiro de 1970 a 2013	13
Figura 9 - Comparação da produção de energias renováveis	14
Figura 10 - Oferta de energia elétrica por fonte	15
Figura 11 - Processo de conversão energética.....	16
Figura 12 - Principais fontes de combustíveis usados em termoelétricas	17
Figura 13 - Funcionamento simplificado de uma planta termoelétrica	17
Figura 14 - Geração energética mundial por hidroelétricas de 1965 à 2011....	19
Figura 15 - Esquema de funcionamento de uma hidroelétrica.....	19
Figura 16 - Perfil esquemático de uma usina nuclear.	21
Figura 17 - Configuração de um sistema energia solar <i>off-grid</i> , utilizando bateria e células de hidrogênio	22
Figura 18 - Esquema de interligação do sistema de geração de energia solar interligado a rede.	23
Figura 19 - Projeção da capacidade instalada e custos até 2050.....	23
Figura 20 - Geração de energia eólica do Brasil, entre 2005 e 2014.....	24
Figura 21 - Desenho esquemático de uma turbina eólica.	26

Figura 22 - Sistema de geração eólica com GIGE	27
Figura 23 - Distribuição da capacidade instalada de geradores eólicos	27
Figura 24 - Modelos de exaustores eólicos.....	28
Figura 25 - Circuito retificador meia onda	30
Figura 26 - Circuito retificador de onda completa em ponte.....	31
Figura 27 - Sinal de onda gerado pelo retificador ligado ao capacitor.	31
Figura 28 - Fluxograma de desenvolvimento do projeto.	34
Figura 29 - Dimensões do exaustor eólico utilizado.....	35
Figura 30 - Dínamo utilizado para geração de energia.	36
Figura 31 - Circuito retificador de tensão.	36
Figura 32 - Sinal de onda da tensão (Vcc) fornecida pelo gerador.	37
Figura 33 - Formato de onda da Tensão (Vcc) formado pelo gerador com sistema de retificação de sinal.	37
Figura 34 - Fluxograma da elaboração dos protótipos.....	39
Figura 35 - Gerador acoplado na parte externa com transmissão por atrito à base giratória.	39
Figura 36 - Gerador com transmissão por atrito em chapa cilíndrica sem deformidades.	40
Figura 37 - Gerador realocado para gerar menos atrito entre o cilindro e a chapa.	41
Figura 38 - Gerador com transmissão por magnetismo.....	41
Figura 39 - Gerador com transmissão por engrenagens.....	42
Figura 40 - Dispositivo eletromecânico para amplificar a rotação do exaustor eólico.....	42
Figura 41 - Diodo e capacitor implementado no circuito eletrônico.....	43
Figura 42 - Tensão gerada pelo protótipo 1, em relação ao giro do gerador. ...	47

Figura 43 - Valores de tensão adquiridos pelo protótipo 2 em função da rotação do gerador.....	48
Figura 44 - Variação da tensão Vcc coletada do protótipo 3 com base na rotação do gerador.....	48
Figura 45 - Valores de tensão Vcc do protótipo 4, com relação ao giro do gerador.	49
Figura 46 - Valores de tensão do protótipo 1 ao 4 em função da rotação do gerador.....	50
Figura 47 - Dados de tensão do protótipo 5 sem carga.	50
Figura 48 - Medições do dispositivo em função do tempo de: (A) Rotação do eixo do exaustor; (B) Tensão gerada; (C) Corrente elétrica gerada.....	51
Figura 49 - Medições do dispositivo com diodo em função do tempo de: (A) Rotação do eixo do exaustor; (B) Tensão gerada; (C) Corrente elétrica gerada.....	52
Figura 50 - Queda de tensão da bateria comparada pelo consumo das lâmpadas LED.....	53
Figura 51 - Dados coletados do DETE com bateria e lâmpadas LED em função do tempo em relação a: (A) Rotação do eixo do exaustor; (B) Tensão gerada; (C) Corrente elétrica gerada.	54
Figura 52 - Boxplot dos dados do protótipo 5.....	55

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Tabela para realização da ANOVA.	44
Tabela 2 - Dados amostrais da ANOVA.....	55
Tabela 3 - Resultados do teste MDS para protótipo 5.	56

Lista de Equações

Equação 1	44
Equação 2.....	44
Equação 3.....	44
Equação 4.....	45
Equação 5.....	45
Equação 6.....	45
Equação 7.....	45
Equação 8.....	45
Equação 9.....	46
Equação 10.....	46
Equação 11.....	56

LISTA DE SIGLAS

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica
BEN - Balanço Energético Nacional
CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CBEE - Centro Brasileiro de Energia Eólica
CCEE - Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CNI - Confederação Nacional da Indústria
CC - Corrente Contínua
DETE - Dispositivo Eletromecânico de Transformação de Energia
DOE - *Design Of Experiments*
EPE - Empresa de Pesquisa Energética
GEE - Gases de Efeito Estufa
GHG - *Greenhouse Gas*
GIGE - Geradores de Indução com Rotor em Gaiola de Esquilo
glRes - Graus de liberdade dos resíduos
glTotal - Graus de liberdade totais
glTrat - Graus de liberdade do tratamento
GTEP - Giga Toneladas Equivalente de Petróleo
GW - Giga *Watt*
GWEC - *Global Wind Energy Council*
IAEA - *International Atomic Energy Agency*
IEA - *International Energy Agency*
IPCC - *Intergovernmental Panel of Climate Changes*

ISO - *International Organization for Standardization*

LED - *Light Emitting Diode*

MWh - *Mega Watt hora*

OCDE - *Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico*

ONG - *Organização Não Governamental*

ONU - *Organização das Nações Unidas*

PDCA - *Plan, Do, Check, Act*

RPM - *Rotação Por Minuto*

SIGFI - *Sistemas Individuais de Geração de Energia Elétrica com Fontes Intermitentes*

SQRes - *soma dos resíduos*

SQT - *Soma total*

SQTrat - *Soma dos tratamentos*

TBL - *Triple Bottom Line*

TWh - *Tera Watt hora*

UNDP - *United Nations Development Programme*

UNEP - *United Nations Environment Programme*

Vcc - *Tensão de Corrente Contínua*

Vin - *Tensão de Entrada*

Vout - *Tensão de Saída*

Vp - *Tensão de Pico*

WMO - *World Meteorological Organization*

1 INTRODUÇÃO

Desde a segunda revolução industrial, os seres humanos vêm mudando o ecossistema do planeta de forma rápida, devido ao aumento da poluição causada pela queima de combustíveis fósseis, como carvão e petróleo. Outros fatores que contribuem para esta mudança são os desmatamentos, a extinção de espécies da fauna e da flora e, principalmente, o aumento na emissão de gases de efeito estufa (GEE). Estes fatores, de acordo com a UNEP (2008), aceleram o processo natural de mudança climática, tornando mais rápida a elevação de temperatura na Terra e, conseqüentemente, as discussões acerca dessa questão estão cada vez mais presentes.

No decorrer do tempo, para atingir a expansão industrial e urbana alcançada nos últimos dois séculos, foi necessário o aumento da queima de combustíveis fósseis como o carvão mineral, o gás natural e os derivados de petróleo para geração da energia, com conseqüentes danos causados ao meio ambiente.

O advento da energia elétrica, somado à facilidade de transporte do ponto de geração ao ponto de consumo e o bom índice de eficiência energética, fez com que o seu uso se tornasse cada vez mais viável, tanto para o setor industrial, como para o doméstico (CCEE, 2015).

De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA - *International Energy Agency*), em 1971, foram gerados pelos países membros da Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) 3.837 TWh de energia elétrica, sendo que 39% foram produzidos pela queima de carvão mineral, 22% por meio do uso do petróleo e seus derivados, 13% pela combustão do gás natural, 3% pelo uso da energia nuclear e 23% pela geração em usinas hidroelétricas (IEA, 2015a). Isso significa que 74% da energia produzida foi oriunda de combustíveis fósseis, ou seja, de fontes não renováveis.

Isso aumentou os índices de emissões de GEE, ocasionando mudanças climáticas ano após ano, mobilizando assim a comunidade internacional a se reunir e realizar a primeira conferência mundial sobre o meio ambiente, a conferência de Estocolmo, em

1972. Outra reunião organizada pela ONU aconteceu 20 anos mais tarde, denominada RIO-92 ou ECO-92, na cidade do Rio de Janeiro. Desta reunião, foram elaborados alguns documentos, dentre eles a Agenda 21, contendo o tema "desenvolvimento sustentável". Somente em 1998, foi gerado um documento em que os países desenvolvidos e em desenvolvimento se comprometeram a reduzir a emissão de GEE, denominado Protocolo de Quioto (PASSOS, 2009).

Nos anos seguintes, o cenário de geração de energia alterou-se positivamente com uma redução significativa no uso de combustíveis fósseis. Segundo a IEA (2015b), em 2013, foram produzidos 10.796 TWh de energia elétrica, dos quais 33% oriundos da queima do carvão mineral, 3% do petróleo, 24% de gás natural, 18% de energia nuclear, 13% hidráulica, 3% de biocombustíveis e 6% de outras fontes (solar, eólica, geotérmica, etc.). A redução do uso de combustíveis fósseis foi de 14%, com maior diversidade do uso de outros tipos de fontes, como, por exemplo, biocombustível, solar, eólica e geotérmica.

O uso de fontes alternativas de energia, principalmente, renováveis, é necessário para minimizar o aquecimento global. O desenvolvimento sustentável, de acordo com a ONU (1987), consiste em: "atender as necessidades das gerações atuais sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atender a suas necessidades e aspirações". A substituição dos combustíveis fósseis ou fontes não renováveis de energia pelas fontes limpas (renováveis ou nucleares) pode ser facilitada com a presença de uma contrapartida social, ambiental ou, principalmente, econômica.

Segundo Elkington (1998), para que se possa atingir a sustentabilidade, deve-se extrapolar sua meta de impacto econômico positivo (lucro) e considerar com o mesmo grau de importância os impactos sociais e ambientais gerados por suas atividades. Dessa maneira, o autor estruturou um modelo de desenvolvimento sustentável baseado em três pilares: econômico, ambiental e social, denominado TBL (*Triple Bottom Line*). Tal modelo apresentou outras possibilidades ao padrão de desenvolvimento seguido até aquele momento, no qual a geração de riqueza (impacto econômico) era o objetivo maior; e enfatizou pontos fundamentais e muitas vezes esquecidos, como os impactos ambientais.

O Brasil possui uma matriz energética para geração de energia elétrica com um alto índice de energias limpas: no ano de 2013, gerou 82,5% de eletricidade a partir de energias renováveis (sendo que 75% foram geradas por hidroelétricas), além de 2,9% de energia nuclear (IEA, 2015a; EPE, 2015).

Entretanto, a dependência de praticamente um tipo de fonte de energia renovável torna esta matriz frágil, uma vez que, nos anos de 2013 e 2014, o Brasil teve problemas hídricos e precisou aumentar sua produção de energia elétrica por meio de fontes não renováveis, como as usinas térmicas (EPE, 2014), acarretando o aumento do custo de produção de energia elétrica e maior índice de emissão de GEE.

Para manter o custo de produção, as indústrias buscam oportunidades para redução no consumo de energia elétrica, tanto quanto para emissão de GEE. Segundo Rietbergen (2010), desde o protocolo de Quioto, muitos países colocam objetivos de redução de emissões de GEE e consumo de energias limpas, para instituições do governos, ONGs (Organização Não Governamentais) e indústrias para atenderem o tratado firmado. Como exemplo destas empresas, a montadora de veículos automotivos Honda demonstra seu compromisso em seu relatório de sustentabilidade (HONDA, 2015), em que assume a redução em 30% das emissões de CO₂ para 2020, com base no ano de 2000. Para isso, em 2014, inaugurou um parque eólico com capacidade de produção de 95 MWh por ano, capaz de abastecer a unidade de produção de carros situada na cidade de Sumaré/SP.

Como forma de redução do uso de energia elétrica dentro das indústrias, o presente trabalho tem por objetivo o aproveitamento e transformação de energia eólica em energia elétrica, por meio do uso de um Dispositivo Eletromecânico Transformador de Energia (DETE), para conversão de energia eólica gerada por um exaustor em energia elétrica.

1.1 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

Existem diversos tipos de exaustores eólicos, dos mais variados tamanhos, com finalidade de trazer um conforto térmico ao ambiente, por meio da troca de ar quente interno pelo externo. Isso se torna possível, pois o exaustor gira, seja pelo vento externo ou pela diferença de temperatura interna e externa.

O exaustor executa um movimento mecânico, devido à passagem de ar pelas hélices, o que permite acoplar um gerador capaz de transformar a força mecânica do eixo de rotação, proveniente do deslocamento de ar (vento), em energia elétrica.

Desta forma, o sistema provê geração de energia por meio de fontes renováveis, além da minimização dos impactos recorrentes ao meio ambiente pela redução do uso de energias proveniente de fontes não renováveis e o desenvolvimento de dispositivo inovador, que, acoplado ao eixo de exaustores eólicos, podem gerar energia elétrica, mesmo com baixa potência.

1.2 PROBLEMA DE PESQUISA

Considerando o cenário exposto, a questão relevante a ser respondida é:

Como gerar e armazenar energia elétrica a partir de um exaustor eólico?

1.3 OBJETIVOS DA PESQUISA

O presente trabalho tem por objetivo geral o desenvolvimento de um dispositivo eletromecânico para geração de energia elétrica por meio do aproveitamento de energia eólica. Além disso, tem como objetivos específicos:

- Contribuir com as questões voltadas à geração e uso de energias renováveis, especialmente a conversão de energia eólica em elétrica;
- Promover uso e armazenamento de energia elétrica gerada;

1.4 VISÃO MACRO DA PESQUISA

Para atender a pergunta de pesquisa e seguir os objetivos traçados, foi pesquisado no referencial teórico a evolução da demanda energética mundial e brasileira, tanto quanto as formas de conversão de energia para energia elétrica. A partir do referencial teórico, foram desenvolvidos projetos do dispositivo eletromecânico para transformação de energia (DETE) que resultaram em protótipos e, a partir destes, foram coletados dados para efetuar análises e conclusões sobre o tema de conversão de energia eólica em elétrica.

O trabalho foi desenvolvido de acordo com o roteiro mostrado na Figura 1.

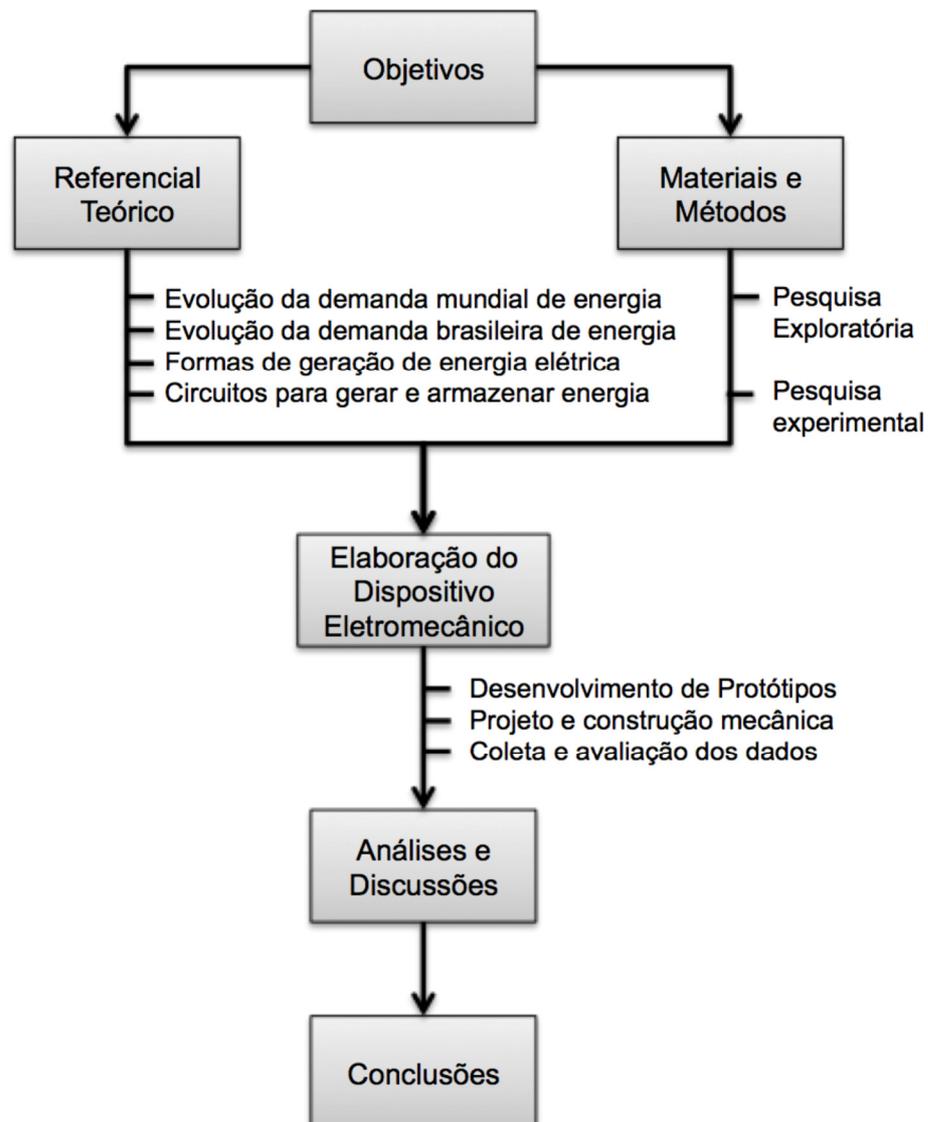


Figura 1 - Visão geral da metodologia de sequência do trabalho.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em 5 capítulos, descritos a seguir.

Capítulo 1 - Introdução - São apresentados a relevância do trabalho, a justificativa, o problema a ser examinado, os objetivos, a visão geral do trabalho e a estrutura do trabalho.

Capítulo 2 - Referencial Teórico - consiste de levantamento em literatura científica que traz informações para sustentação da pesquisa, análise dos resultados e conclusões finais. Para isso, são abordados tópicos das formas de conversão de energia, panorama de consumo energético mundial, brasileiro e por fonte.

Capítulo 3 - Materiais e Métodos - Apresenta-se os materiais, instrumentos e metodologia utilizada para desenvolvimento do equipamento para geração e armazenamento de energia elétrica, e a coleta de dados experimentais.

Capítulo 4 - Resultados - Mostra os resultados obtidos por meio dos testes, assim como discussões a respeito da aplicação deste dispositivo eletromecânico.

Capítulo 5 - Conclusões - São apresentadas conclusões com base nos resultados obtidos, nos objetivos propostos e por meio do desenvolvimento experimental.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Com o aumento da necessidade humana pelo consumo de energia, seja na indústria, no transporte, no comércio, nas residências ou no campo, sua produção é diretamente proporcional aos danos que ela causa ao meio ambiente, conduzindo a busca de meios em que a produção seja sustentável e reduza a agressão ao meio ambiente (TOLMASQUIM *et al.*, 2007).

De acordo com Blok *et al.* (2015), tanto a produção como o consumo não são sustentáveis e haverá uma fase de transição para obtê-las. Para a produção se tornar sustentável, existem caminhos como a eco-eficiência, redução de desperdício e o uso de energias renováveis.

Desta forma, a utilização das fontes renováveis de energia, como hidráulica, eólica, solar, biocombustíveis tornam essenciais para alcançar a sustentabilidade dentro do setor produtivo. Segundo a IEA (2015c), este uso, olhando a produção mundial de energia elétrica mundial, ainda tem pouca significância, representando menos de 22,3% do total das fontes de energias disponíveis e usadas, sendo 16,6% geradas por hidroelétricas, 2% por biocombustíveis e 3,7% por outras fontes, como solar e eólica.

Segundo Reis (2006), para construção de um modelo sustentável no setor energético, tanto para geração, quanto para distribuição, deve-se considerar as constatações observadas e recomendações recebidas dos setores competentes, como substituição de combustíveis fósseis, como carvão, óleo e gás, por fontes menos agressivas ao meio ambiente, promovendo o aumento da eficiência em toda a cadeia do setor energético, desde a geração, até o consumo.

Portanto, o uso de energia proveniente de fontes renováveis traz a oportunidade para a humanidade se desenvolver em uma trajetória econômica inclusiva e ao mesmo tempo diminuir a emissão de GEE (PEREIRA *et al.*, 2012).

2.1 DEMANDA ENERGÉTICA MUNDIAL

O órgão denominado *Intergovernmental Panel of Climate Changes* (IPCC) afirma, em seu Quinto Relatório Analítico, que a influência humana sobre as mudanças climáticas é clara e um dos principais fatores é a crescente emissão de gases do efeito estufa antropogênicos, responsável pelo aumento da temperatura média da terra nos últimos séculos (IPCC, 2013).

Esse quadro tende a se agravar ainda mais nos próximos anos. Segundo Gutowski *et al.* (2013), o crescimento natural da produção industrial traz acréscimo na demanda por energia, ocasionando, por consequência, o aumento das emissões de carbono na atmosfera. Com o aumento da produção industrial, se faz necessário o crescimento da capacidade energética. A Figura 2 mostra a produção total de energia mundial, independente de sua fonte de origem, entre os anos de 1971 e 2013 (OCDE, 2015).

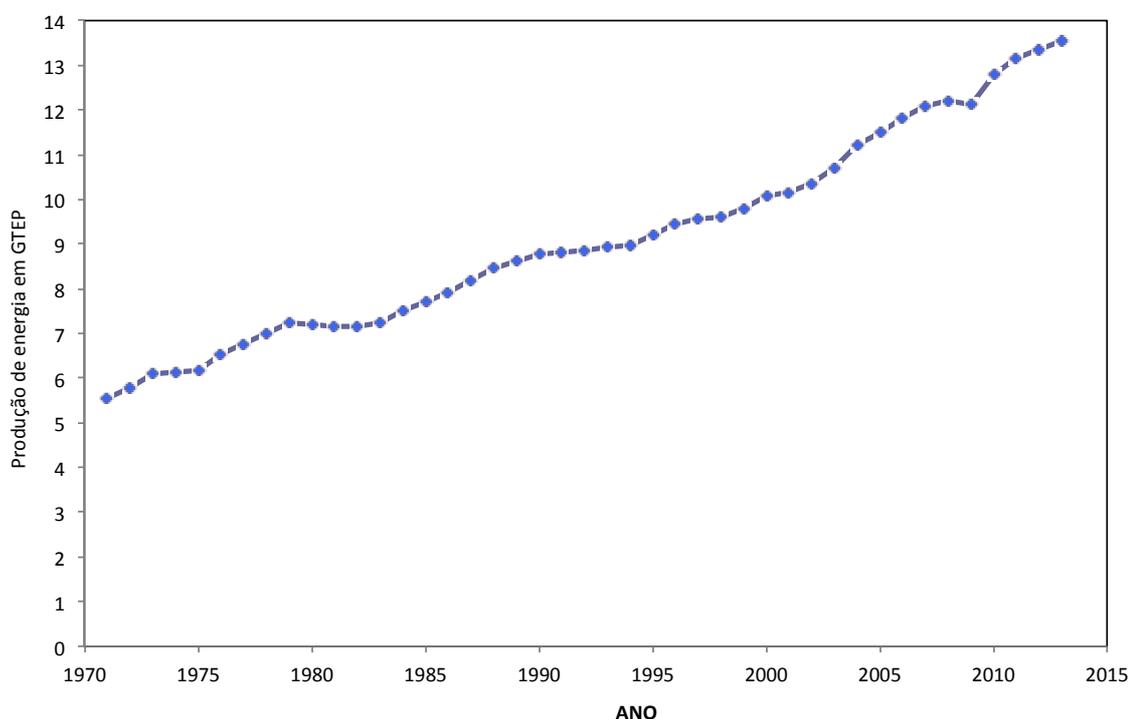


Figura 2 - Produção mundial de energia primária entre 1971 e 2013 (OCDE, 2015).

Pode-se observar na Figura 2 que, no ano de 1971, a produção de energia foi da ordem de 5,5 GTEP (Giga Toneladas Equivalente de Petróleo), seguida de um

acréscimo acentuado até 2013, atingindo valores superiores a 13 GTEP. Apenas no ano de 2009, observa-se um ligeiro decréscimo na produção de energia como reflexo da crise mundial iniciada no ano de 2008 (BURTLESS, 2009).

Apesar do aumento da demanda energética, destaca-se as alterações no uso das fontes de energia. Em 1973, a produção de energia primária alcançou 6,1 GTEP, sendo a maior parte da energia produzida, praticamente 87,5%, oriunda do petróleo, gás natural, nuclear, carvão e turfa, fontes não renováveis, como mostra a Figura 3 (IEA, 2013).

A produção de energias renováveis, como geotérmica, eólica, solar fotovoltaica e térmica, representou apenas 0,1% de toda produção energética mundial. As demais renováveis, como biomassa e hidroeletricidade, representavam 12,4%.

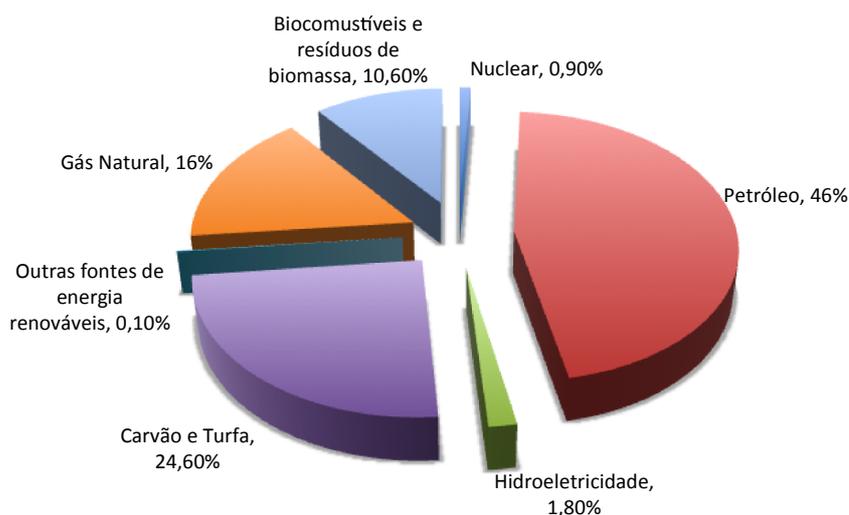


Figura 3 - Produção total de energia primária no mundo em 1973 (IEA, 2013).

No ano de 2013, houve uma alteração no cenário em comparação à década de 1970. A produção energética ultrapassou a marca de 13 GTEP, com o uso do petróleo, gás natural, nuclear, carvão e turfa, representando aproximadamente 86,7%, e a produção de energias renováveis, atingindo 13,3% conforme mostra a Figura 4 (IEA, 2013).

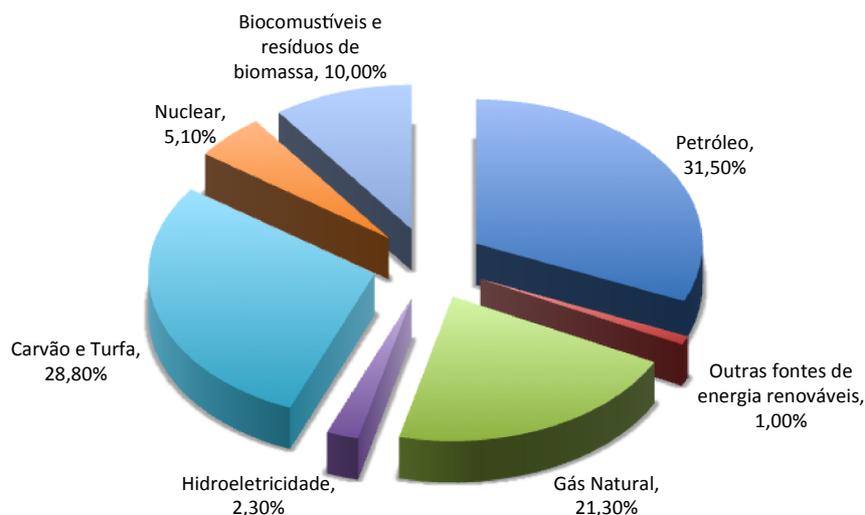


Figura 4 - Produção mundial de energia primária em 2013 (IEA, 2013).

Observa-se a diminuição do uso do petróleo como fonte de energia, com uma queda na participação de 46% em 1973 para 31,5% em 2013. Além disso, houve um aumento no uso do gás natural de 16% para 21,3% e carvão e turfa 24,6% para 28,8%, também fontes não renováveis. Um outro fator importante foi o aumento do uso da energia nuclear, saltando de 0,9% para 5,1% em 2013. Com relação a outras fontes de energias renováveis, incluindo a eólica e solar, passou de 0,1% para 1,0%, com aumento de 10 vezes.

Para tornar a produção energética sustentável, será necessária a troca gradual das fontes de combustíveis fósseis, por fontes de energias renováveis, que, de acordo com Silva (2010), são consideradas intrinsecamente limpas e capazes de minimizar os danos gerados pelos combustíveis fósseis.

A Figura 5 mostra, para o ano de 2001, um maior consumo das energias renováveis por parte dos países em desenvolvimento, comparado aos desenvolvidos, segundo Goldemberg (2006) e UNDP (2004).

O destaque se deu para o uso de resíduos de biomassa, sendo 3,30% nos países desenvolvidos contra 19,60% para os países em desenvolvimento. Com relação às energias renováveis geotérmica, solar, eólica e outras, o uso mundial ficou próximo de 1%. Porém, continua preocupante a produção de energia por fontes não renováveis, sendo mais de 80% para países desenvolvidos e mais de 75% para países em desenvolvimento.

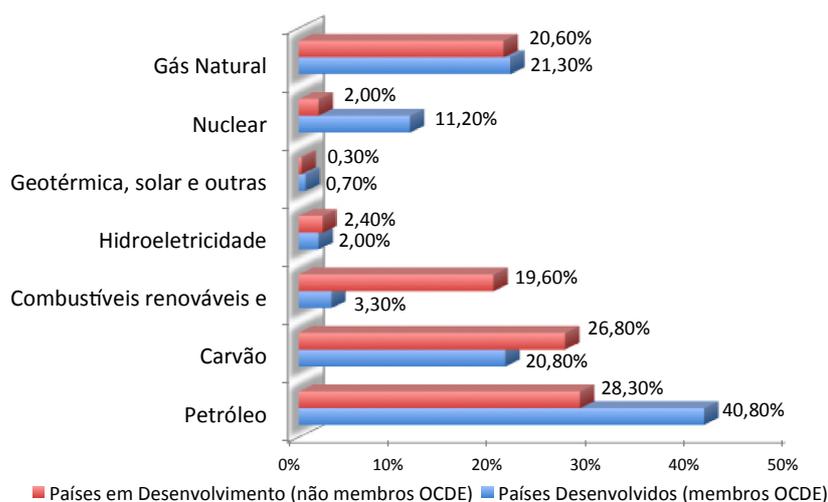


Figura 5 - Consumo de energia primária mundial em 2001 (UNDP, 2004).

Os países em desenvolvimento, em 2001, conseguiram ocupar uma fatia grande com combustíveis renováveis e resíduos, chegando a quase 20%, enquanto os países desenvolvidos se aprimoraram na produção de energia nuclear, chegando a 11,2% do total de sua energia produzida.

A Figura 6 mostra um comparativo no consumos de energia por tipos de fontes de geração no ano de 2013, entre países desenvolvidos e em desenvolvimento, de acordo com a IEA (2015a).

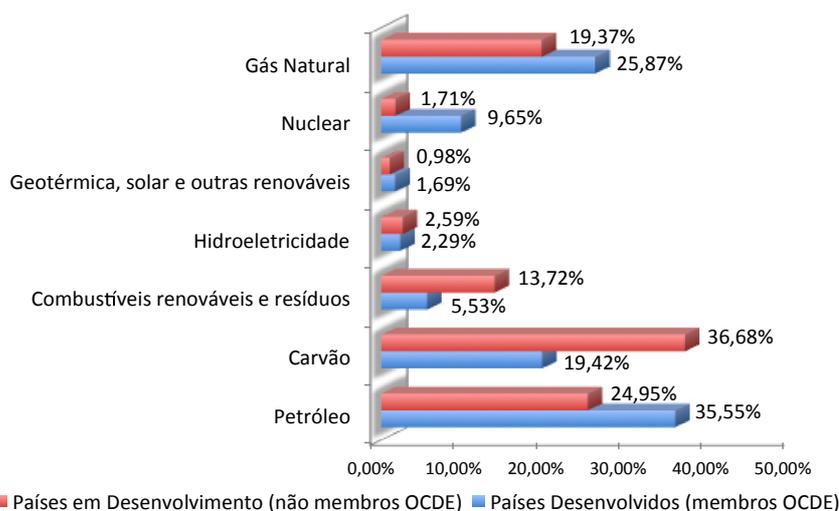


Figura 6 - Consumo de energia primária mundial em 2013 (IEA, 2015a).

Segundo a IEA (2015a), em 2013, o cenário foi alterado com relação a 2001, como exemplo, o consumo de combustíveis renováveis nos países em desenvolvimento diminuiu de 19,60% para 13,72%, enquanto nos países desenvolvidos aumentou de 3,30% para 5,53%. Com relação ao consumo de carvão, os países em desenvolvimento, saltou de 26,80% para 36,68%, enquanto os países desenvolvidos se mantiveram praticamente estáveis.

Ainda pouco explorada e de fonte renovável, a energia solar pode ser uma opção para a substituição do uso de energias fósseis. Para Silva (2010), se a humanidade conseguisse utilizar 1% desta energia, ter-se-ia 100 vezes a energia necessária nos dias atuais. De acordo com a IEA (2015a), tanto países desenvolvidos, como os em desenvolvimento não utilizam nem 1% desta energia em sua matriz energética.

Um estudo realizado pelo Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito (CRESESB, 2001) apresentou outra possibilidade de energia limpa, citando o uso da fonte eólica para o Brasil, com capacidade estimada de produção em valores próximos a 143 GW ao longo de todo o território nacional.

2.2 DEMANDA ENERGÉTICA BRASILEIRA

Neste último século, países na liderança econômica como Estados Unidos da América, Inglaterra e Alemanha, notoriamente se valeram de suas indústrias manufatureiras como plataforma para seus desenvolvimentos econômicos. É esperado o uso do mesmo expediente por parte dos países emergentes, como a China, Rússia, Índia e o Brasil, para alavancar suas economias. Este foco na manufatura implica em maior consumo de energia (GUTOWSKI *et al.*, 2013).

Segundo a Confederação Nacional da Indústria - CNI (2012) “[...] *em termos mundiais, a indústria é responsável por cerca de 35% do consumo de energia*”. Nesse cenário, o Brasil não ficou atrás, sendo que, em 2013, a indústria consumiu cerca de 36% da energia nacional disponível (EPE, 2014).

A Figura 7 mostra a indústria como maior consumidor de energia, com 36%, seguida pelo setor de transporte, com 34%, setor energético, com 11%, residencial, com 10% e outros totalizando 9% de todo o consumo brasileiro.

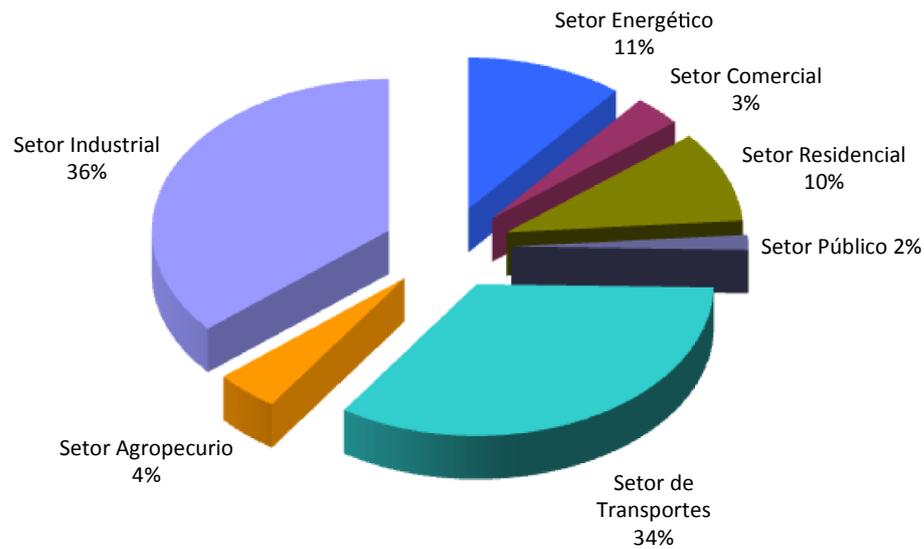


Figura 7 - Consumo de energia brasileira por setores em 2013 (EPE, 2014).

O setor industrial, responsável pelo maior consumo de energia, usou mais de 70% de fontes renováveis, enquanto para o transporte, 85% do consumo foi proveniente de fontes não renováveis, na sua maioria pelo petróleo (EPE, 2014).

Historicamente, o Brasil tem acompanhado o crescimento no consumo de energia mundial e vem aumentando sua produção dos mais diversos tipos. Em 2013, comparado a 1970, o país aumentou em mais de 13 vezes seu consumo, como pode ser visto na Figura 8 (EPE, 2014).

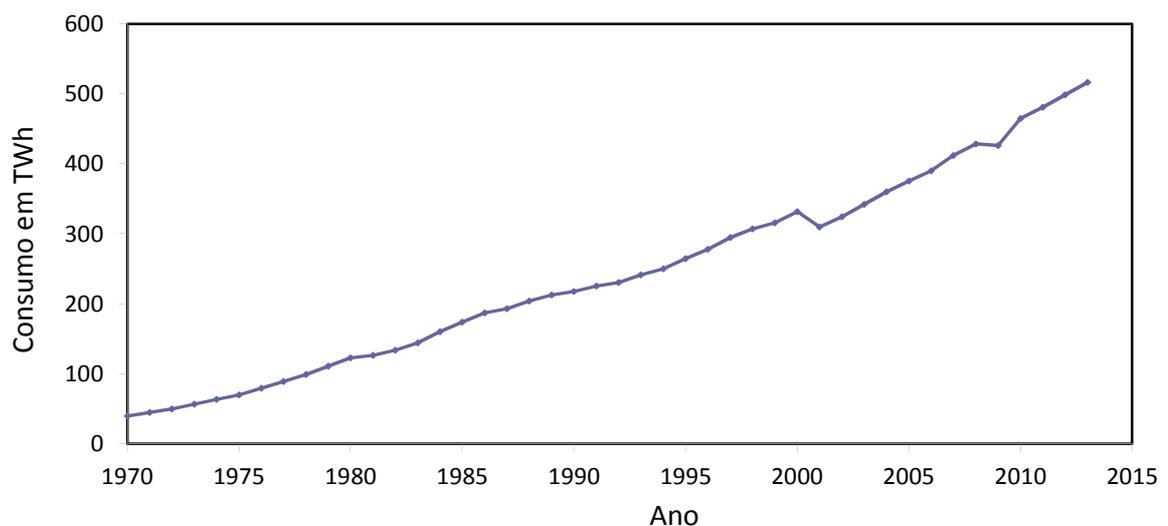


Figura 8 - Consumo energético brasileiro de 1970 a 2013 (EPE, 2014).

Em comparação com a matriz energética mundial, o Brasil se encontra em uma posição de destaque com relação ao uso de energias renováveis, dado a média mundial de 13%, em 2011, e ao Brasil de 41%, em 2013, conforme ilustra a Figura 9.

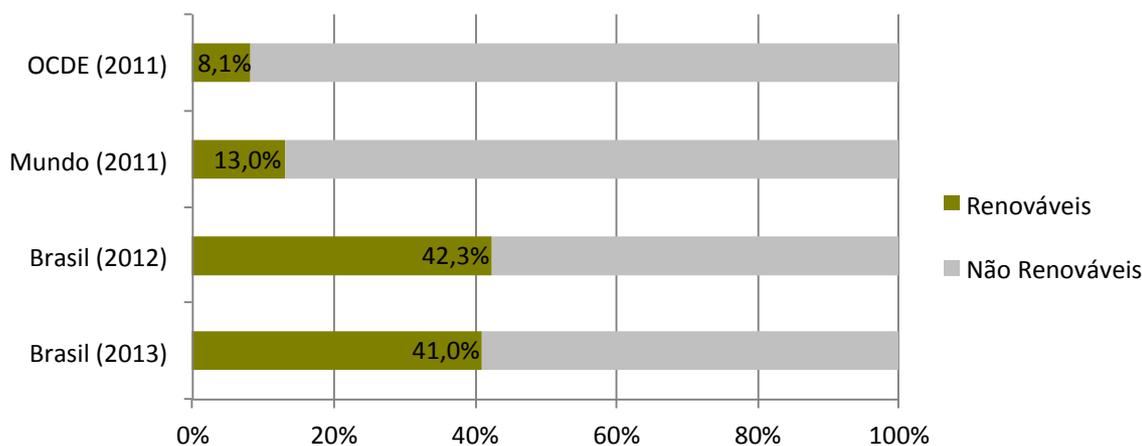


Figura 9 - Comparação da produção de energias renováveis (EPE, 2014).

Segundo relatório do Balanço Energético Nacional (BEN), ano base de 2013, o Brasil, devido a problemas hídricos, teve 41% de sua energia gerada por fontes renováveis, diminuição de 1,3% com relação ao ano anterior. Dessa energia, 16,1% foi queima da biomassa da cana-de-açúcar, 12,5% proveniente de hidroelétricas, 8,3% da queima de carvão e lenha vegetal, e 4,2% de lixo e outras energias renováveis. Em contrapartida, dos 59% da energia não renovável, 39,3% foi do uso de petróleo e seus derivados, 12,8% de gás natural, 5,6% de carvão mineral e 1,3% de urânio (EPE, 2014).

O país ainda é muito dependente do uso do petróleo e seus derivados, no transporte. Porém, segundo a Empresa de Pesquisa Energética - EPE (2014), em termos de oferta de energia elétrica por fonte, praticamente 80% é proveniente de energias renováveis, com 70,6% sendo gerada por hidroelétricas, como mostra a Figura 10.

No Brasil, o uso da energia hidráulica é predominante, porém em uma escassez de água como ocorrido nos anos de 2013 e 2014, há necessidade do uso de energias alternativas para suprir a demanda energética, como o aumento da geração de energias solar e eólica.

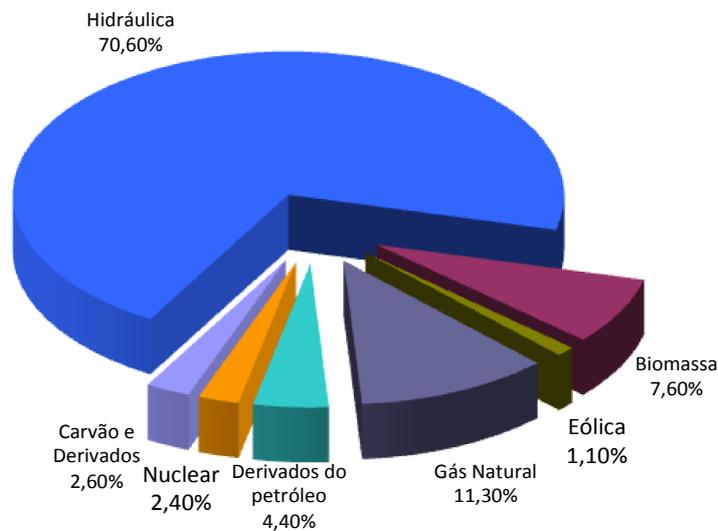


Figura 10 - Oferta de energia elétrica por fonte (EPE, 2014).

Outro exemplo, o uso de biocombustíveis e derivados da cana-de-açúcar, como biomassa, tem um impacto grande na geração de energia para o país. Em 2013, a produção de etanol aumentou 9,2% com relação a 2012, totalizando 593,6 milhões de toneladas (EPE, 2014).

2.3 FORMAS DE CONVERSÃO DE ENERGIA

A conversão ou transformação de energia se dá pela necessidade que os seres humanos têm em melhorar o ambiente ao seu redor, assim trazendo mais conforto para o seu dia-a-dia.

Segundo Haddad (2001), existem seis formas básicas de conversão de energia, sendo algumas induzidas pelo ser humano e outras obtidas da natureza. Estes tipos de transformação de energia são denominadas: térmica por radiação, química, nuclear, térmica pela energia interna, mecânica e elétrica como mostra a Figura 11.

Independentemente do tipo de conversão energética a ser adotada, é necessário o embasamento em duas leis fundamentais da física, que são: lei da conservação de energia ou primeira lei da termodinâmica, formulado por Joule e Meyer em meados de 1840 e, pela lei da dissipação de energia ou segunda lei da termodinâmica, estabelecida por Clausius, em 1865.

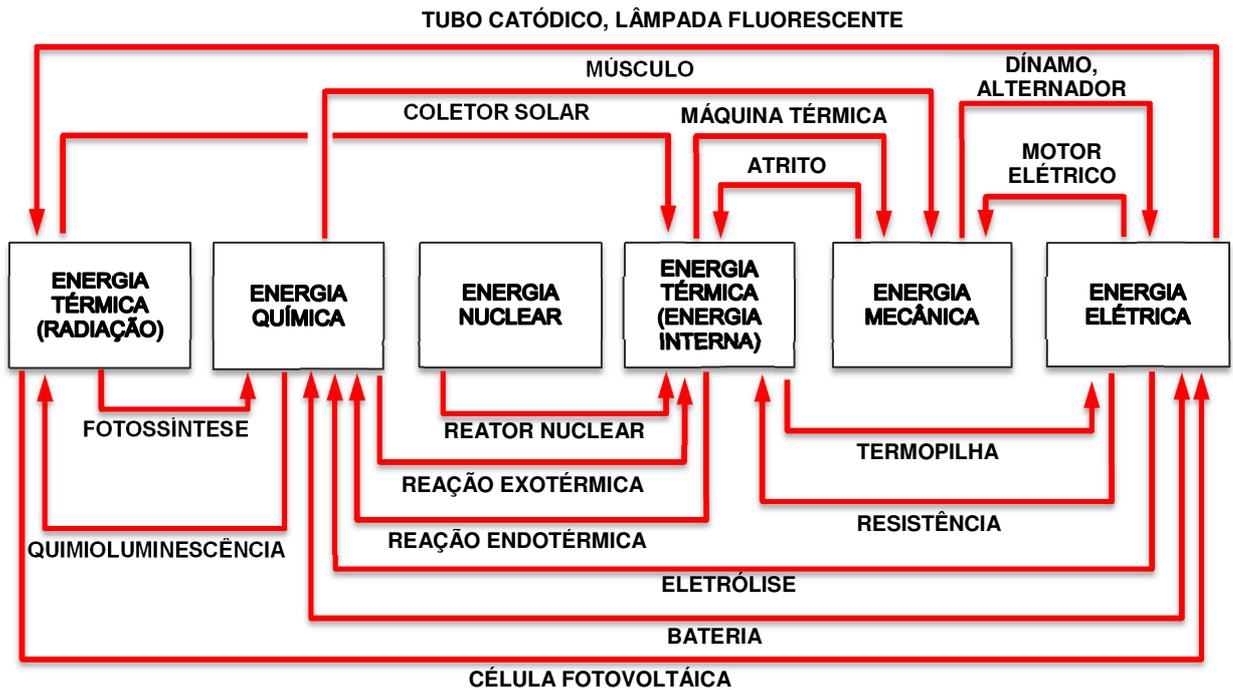


Figura 11 - Processo de conversão energética (HADDAD, 2001).

Todo processo real possui imperfeições de conversão de energia, podendo gerar perda por calor para realizar a transformação energética, como atrito, isolamento térmico deficiente, etc.

A energia elétrica pode ser obtida de formas diferentes, em que os principais processos de conversão são: o primeiro, por meio da energia térmica (radiação) utilizando placas fotovoltaicas; o segundo, pela transformação da energia mecânica por meio da utilização de turbinas a vapor, hidráulicas e eólicas; e o último, alcançado pelas reações químicas, como exemplo as células de combustíveis (REIS, 2006).

2.3.1 CONVERSÃO DE ENERGIA TÉRMICA EM ELÉTRICA

A queima de combustíveis, como carvão, derivados de petróleo, biomassa, entre outros, faz das usinas termoelétricas as responsáveis por grande parte da produção de energia elétrica para os países membros da OECD. De acordo com o relatório da OECD/IEA (2015b), 63% da energia elétrica gerada foi pela queima de combustíveis fósseis e renováveis, sendo a maior parte pelo carvão, com 32,6%, em seguida pelo gás natural, com 24,4%, 3,1% do uso do petróleo e os 2,9% restantes pela queima de biocombustíveis, como mostra a Figura 12.

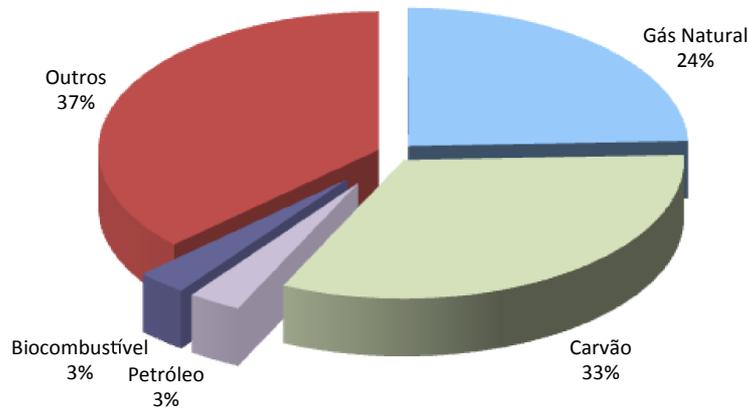


Figura 12 - Principais fontes de combustíveis usados em termelétricas (IEA, 2015b).

Independentemente do material usado como combustível, renovável ou não, as usinas termelétricas têm um funcionamento similar, conforme mostra a Figura 13.

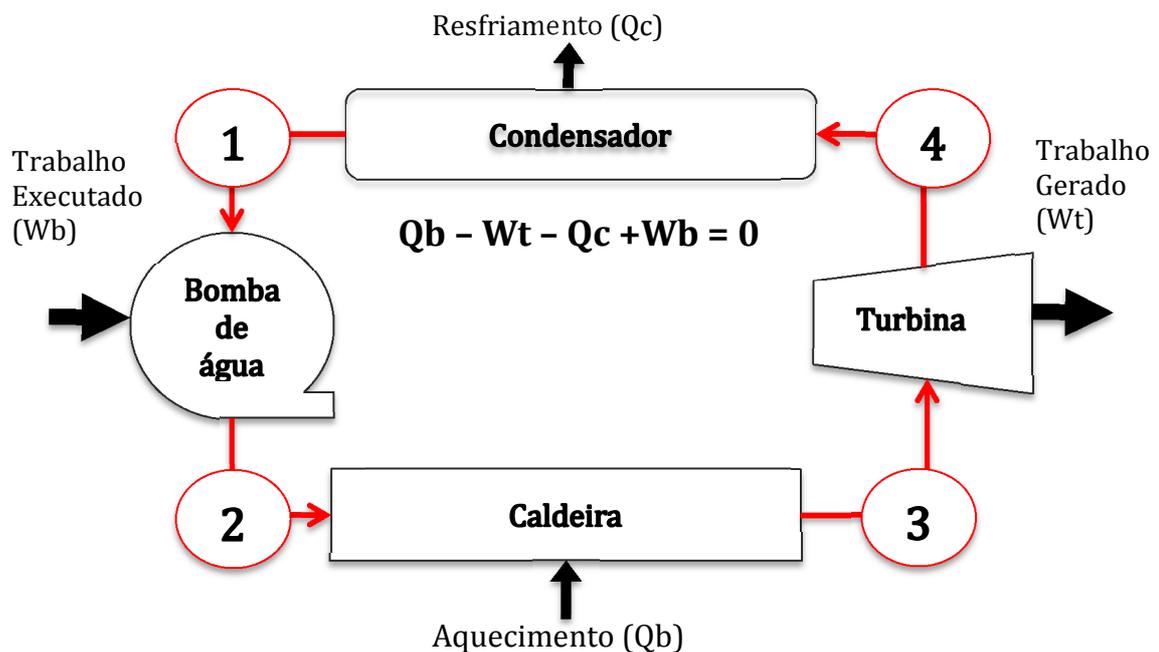


Figura 13 - Funcionamento simplificado de uma planta termelétrica (WALKER *et. al.*, 2012).

De acordo com Walker *et. al.* (2012), o processo deste tipo de geração consiste em um ciclo iniciado pelo bombeamento de água fria, encontrada dentro do reservatório (condensador), ou mesmo em locais abertos como rios ou mares, para uma caldeira. Esta recebe o calor gerado pela queima dos combustíveis, levando ao aquecimento da água e sua transformação em vapor sob pressão. Com o sistema pressurizado, é

possível movimentar a turbina, acoplada a um gerador. Este, por sua vez, gera energia elétrica para abastecer a rede, ou para consumo próprio, em caso de grandes indústrias ou usinas. Após passar por este processo, o vapor sem pressão precisa ser resfriado para voltar ao meio ambiente na forma de água, onde se reinicia o ciclo.

Este sistema possui algumas vantagens econômicas, porém desvantagens ambientais, podendo ser muito poluente. Como vantagem, esta planta pode ser instalada em praticamente qualquer região, pois é necessário um ponto de captação de água e algum tipo de combustível para queima. Isto leva à redução de custos com linhas de transmissão, caso haja necessidade de um volume grande de energia em pontos remotos. Em contrapartida, tem-se desvantagens como: o aumento na temperatura das águas, pois a água de processo devolvida ao ecossistema sempre está em temperatura mais elevada; por haver queima de combustível, produz-se vários tipos de gases poluentes, dentre eles os responsáveis pelo aquecimento global (MOHEDANO, 2015).

2.3.2 CONVERSÃO DE ENERGIA HIDRÁULICA EM ELÉTRICA

Considerada uma forma de conversão de energia limpa por não produzir gases poluidores e não gerar resíduos sólidos, a energia elétrica proveniente de usinas hidroelétricas é responsável por fornecer 13% de toda energia de países membros da OECD em 2014 (IEA, 2015b).

O Brasil possui recursos hídricos em abundância por quase toda sua extensão. Em 2010, foi abastecido por 80,2% de energia elétrica, equivalente a 403 TWh, oriundas de fontes hidráulicas, perdendo em volume de produção somente para China, com geração de 694 TWh (IEA, 2012). Entretanto, em 2013, esta taxa caiu para 70,6%, devido à crise hídrica vivida pelo país. Mesmo assim, a produção hídrica é considerada elevada, se comparado a padrões internacionais (EPE, 2014).

Mundialmente, a produção energética desta fonte vem crescendo em média 500 TWh a cada década, conforme mostra o gráfico da Figura 14. Nos últimos 15 anos, o crescimento foi maior na Ásia em relação aos outros continentes.

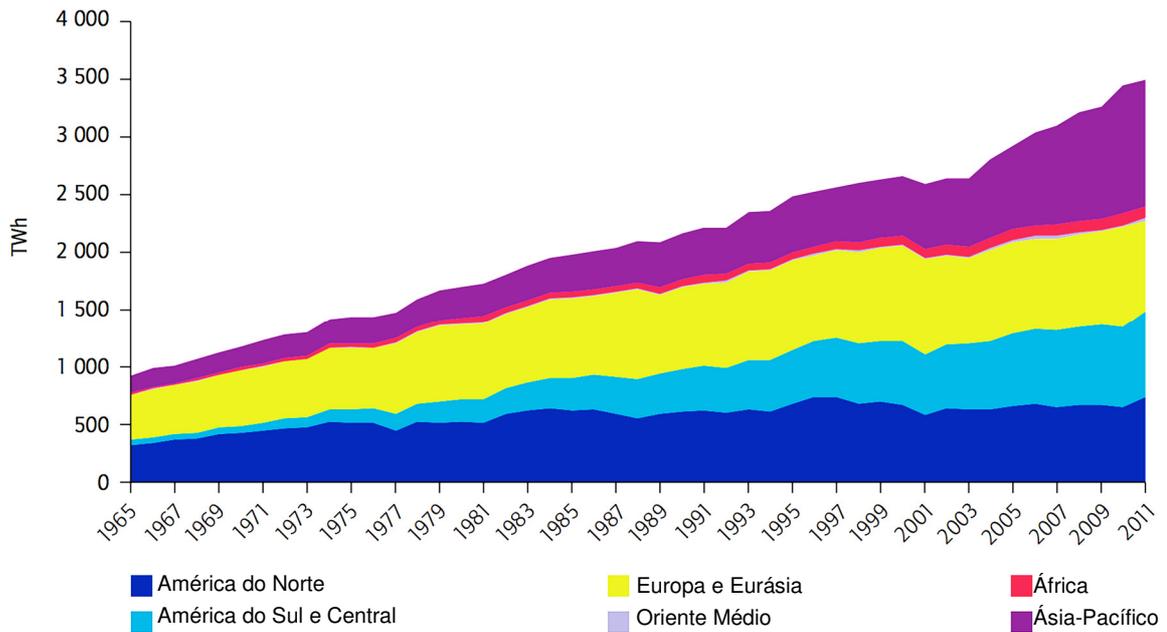


Figura 14 - Geração energética mundial por hidroelétricas de 1965 à 2011 (IEA, 2012).

Segundo a IEA (2012), uma das maiores vantagens da energia hidráulica como fonte de energia limpa, é o custo de produção e manutenção baixo, comparado a outras fontes. Como não depende de nenhum tipo de combustível derivado do petróleo, não possui grandes oscilações de preços. É possível estocar a energia hídrica e utilizar quando houver demanda, dando flexibilidade ao sistema.

A Figura 15 mostra o funcionamento de uma usina hidroelétrica desde o armazenamento de água até a transmissão da energia elétrica ao cliente final.

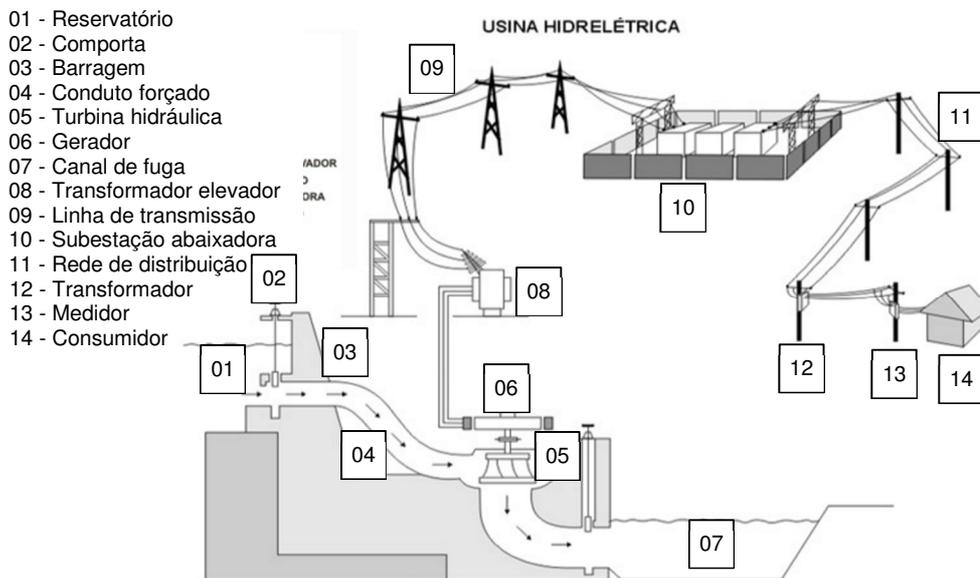


Figura 15 - Esquema de funcionamento de uma hidroelétrica (FURNAS, 2016).

Para controlar a quantidade de água no reservatório e também determinar a produção energética, se faz necessário uma comporta, alocada na barragem. Na comporta, está interligado um duto forçado para levar a água do reservatório até a turbina hidráulica, interligada ao gerador de energia. Este, por sua vez, está ligado a um transformador de elevação para aumentar a tensão da energia gerada para ser transmitida pelas linhas de transmissão e assim segue o fluxo até chegar no cliente final, podendo ser um usuário doméstico, comércio ou indústria.

Entretanto, as usinas hidroelétricas, para operar, necessitam de reservatórios de água e, para isso, da construção de barragens. Com o represamento da água, formam-se grandes áreas alagadas, mudando o cenário e gerando impactos ambientais, como inundação de florestas, acarretando também problemas à fauna e flora local, além dos socioeconômicos (IEA, 2012).

2.3.3 CONVERSÃO DE ENERGIA NUCLEAR EM ELÉTRICA

A energia nuclear, apesar de perigosa se não for devidamente manuseada, é conhecida desde a década de 1940 e está sendo considerada um tipo de energia limpa, pois possui baixa emissão de GEE. O processo de conversão de energia é chamado de termonuclear, de uma forma simplificada, transforma a reação nuclear em calor e por meio deste, gera-se vapor, que movimenta a turbina interligada a um gerador e obtém-se a energia elétrica. O processo é formado por dois circuitos, como pode ser visto na Figura 16.

De acordo com ANEEL (2008), o primeiro, também chamado de circuito primário, possui um vaso de pressão, no qual a água responsável pela refrigeração do reator nuclear é armazenada e, também, onde se encontram os elementos combustíveis. Esta água é quente e altamente radioativa, porém está dentro de um circuito fechado. O segundo processo, ou circuito secundário, é responsável por produzir vapor, girar a turbina e gerar energia. A geração do vapor é dada pela troca de calor entre o circuito primário e o secundário.

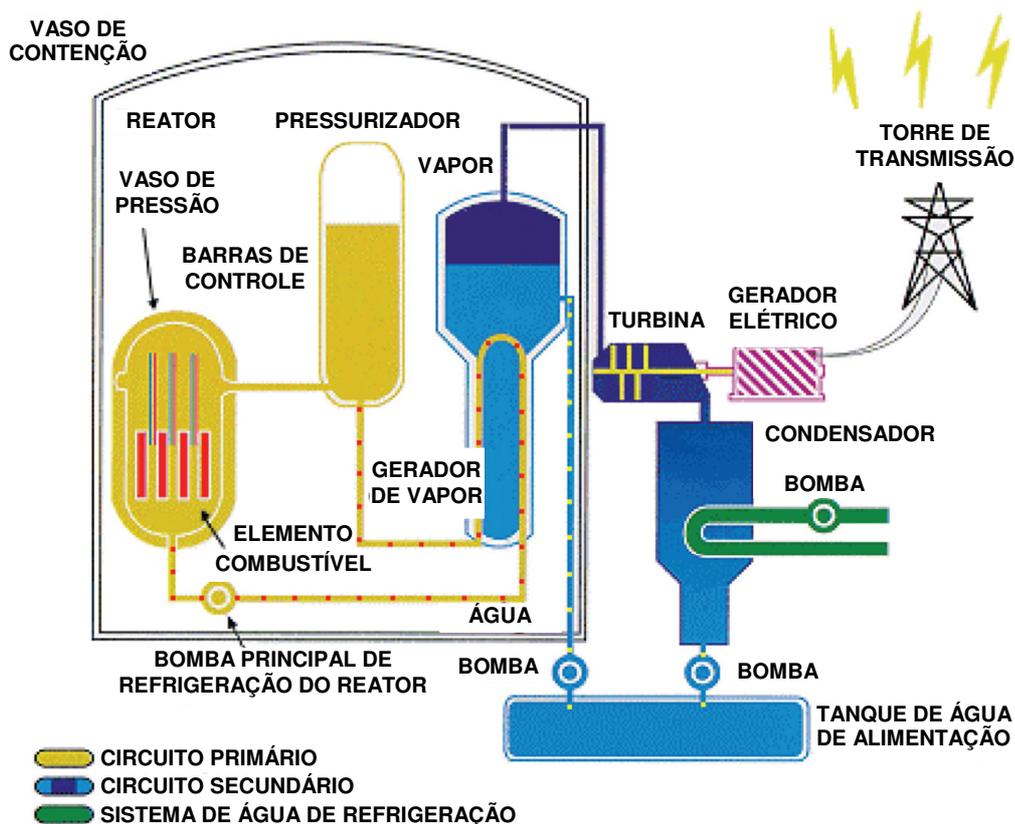


Figura 16 - Perfil esquemático de uma usina nuclear (EPE, 2007).

Apesar do aumento da produção do uso da energia elétrica oriunda de fontes nucleares, as usinas nucleares possuem tecnologia sólida e superior às outras formas de energia e, o risco em sua implementação é devido ao uso de elementos radioativos. Existem casos de acidentes com usinas nucleares, como o de *Three Mile Island*, nos Estados Unidos da América em 1979, o acidente com o reator nuclear na cidade de *Chernobyl*, em 1986, na Ucrânia (ISHIGURO, 2002), e, mais recentemente, na cidade de *Okuma*, no Japão, em 2011, em que houve a explosão da central nuclear de Fukushima I devido a um *tsunami* (IAEA, 2014).

2.3.4 CONVERSÃO DE ENERGIA SOLAR EM ELÉTRICA

A energia solar é uma fonte alternativa que pode ser obtida em, praticamente, qualquer lugar. Para isso, são necessárias placas solares, conjunto de baterias e, caso não seja interligado à rede elétrica, um inversor de frequência e um sistema de proteção contra curto-circuito.

Segundo Schepper (2015), o uso combinado da energia solar (painéis solares em conjunto ao uso de baterias, por exemplo) traz um retorno econômico melhor ao consumidor. Além disso, resulta em benefícios ao meio ambiente, como diminuição da emissão de gases de efeito estufa, independência da rede elétrica, entre outros.

Desta maneira, o sistema de conversão solar com uso de placas fotovoltaicas pode ser utilizado interligado à rede elétrica ou não. Um exemplo do sistema de geração de energia que não está interligado à rede (*off-grid*) é representado pela Figura 17.

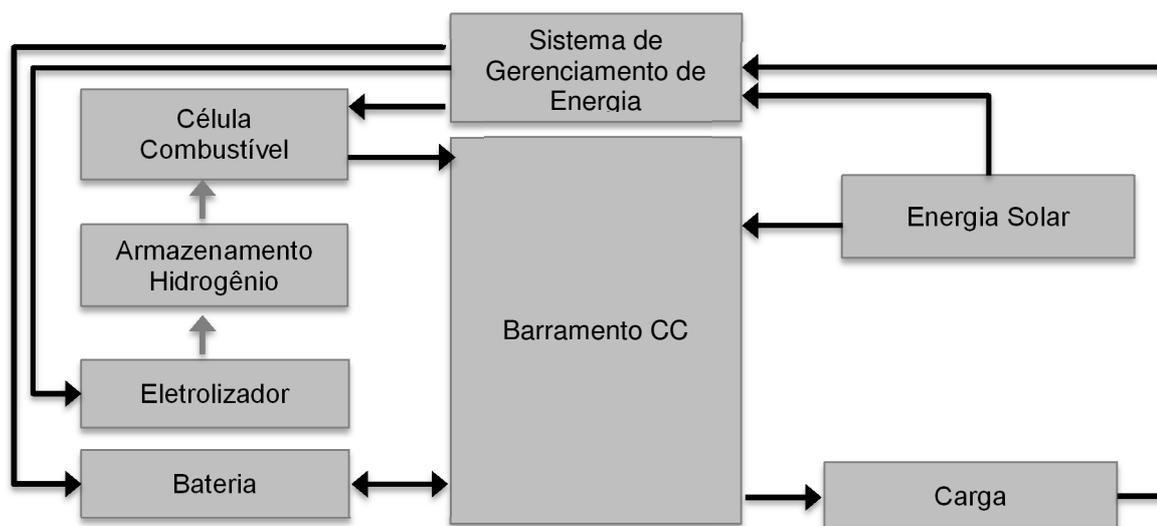


Figura 17 - Configuração de um sistema energia solar *off-grid*, utilizando bateria e células de hidrogênio (ZHANG, 2013).

Este sistema pode conter, ou não, o conjunto de células de hidrogênio, que servem para armazenamento da energia, tanto quanto a bateria. Para geração, são necessárias placas fotovoltaicas para capturar a energia solar e convertê-la em elétrica, a ser enviada ao barramento CC. Este, por sua vez, tem a função de armazenar a energia oriunda entre os sistemas de geração. O sistema de gerenciamento de energia pode conter um inversor de frequência para converter a energia de corrente contínua em corrente alternada (ZHANG, 2013).

O Brasil, por meio de Sistemas Individuais de Geração de energia elétrica com Fontes Intermitentes (SIGFI), possibilitou o uso de energia elétrica em comunidades isoladas e também elaborou projetos para instalação de placas fotovoltaicas em residências conectadas à rede elétrica, trazendo renda a estas famílias (EPE, 2014; MIKI, 2015).

Para sistemas interligados à rede elétrica (*on-grid*), conforme mostrado na Figura 18, o funcionamento é similar, porém pode-se utilizar a rede como armazenamento da energia, uma vez que, quando se produz mais do que se consome, ganha-se um crédito com a concessionária, que pode utilizar em horário em que a produção é reduzida.

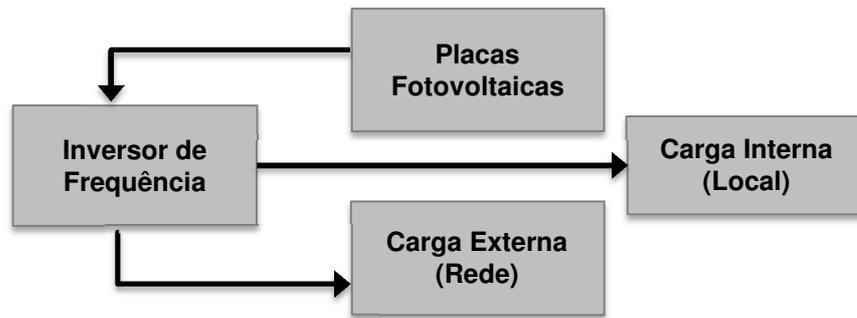


Figura 18 - Esquema de interligação do sistema de geração de energia solar interligado a rede (YANG, 2004).

De acordo com a EPE (2014), a produção de energia elétrica por meio de placas fotovoltaicas terá um salto de 27 GW, em 2010, para 280 GW, em 2020, e mais de 2000 GW, em 2050. Isso se deve à diminuição do custo de implementação desta tecnologia. Fazendo um comparativo entre 2010 e 2020, o custo da produção energética cairá para praticamente metade; em contrapartida, entre as décadas de 2030 e 2050, a capacidade instalada terá um aumento na ordem de 750 GW a cada década, como mostra a Figura 19.

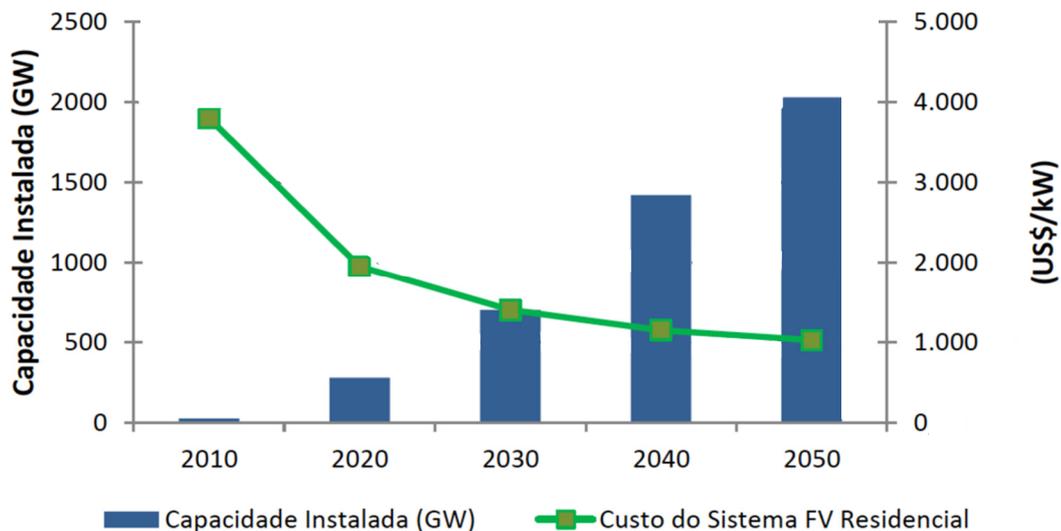


Figura 19 - Projeção da capacidade instalada e custos até 2050 (EPE, 2014).

2.3.5 CONVERSÃO DE ENERGIA EÓLICA EM ELÉTRICA

A capacidade instalada de energia eólica no mundo, em 2010, estava em torno de 13,5 GW, e poderá ultrapassar a marca dos 30 GW até 2030 (SILVA, 2010).

O Brasil, em 2013, tinha uma base instalada com capacidade de aproximadamente 2,7 GW, saltando para 4,9 GW em 2014, obtendo um aumento de mais de 80% (EPE, 2015). De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2008), o Brasil possui um potencial de produção energética elevado. Dados atuais apontam o potencial para obtenção de valores superiores a 60 GW.

A geração de energia elétrica a partir da eólica, no Brasil, teve uma expansão representativa nos últimos anos, saindo de 93 GWh, em 2005, para 12.210 GWh, em 2014, conforme mostra a Figura 20. Isso mostra como o país tem se preocupado com formas sustentáveis de produção de energia, para diminuição da dependência do uso de energias não renováveis, como carvão, petróleo e seus derivados.

O Conselho Global de Energia Eólica (GWEC - *Global Wind Energy Council*), organização não governamental, fundada em 2005, estabeleceu como meta que a geração de 20% da eletricidade consumida na comunidade europeia deverá originar-se de fonte eólica até 2020 (GWEC, 2008).

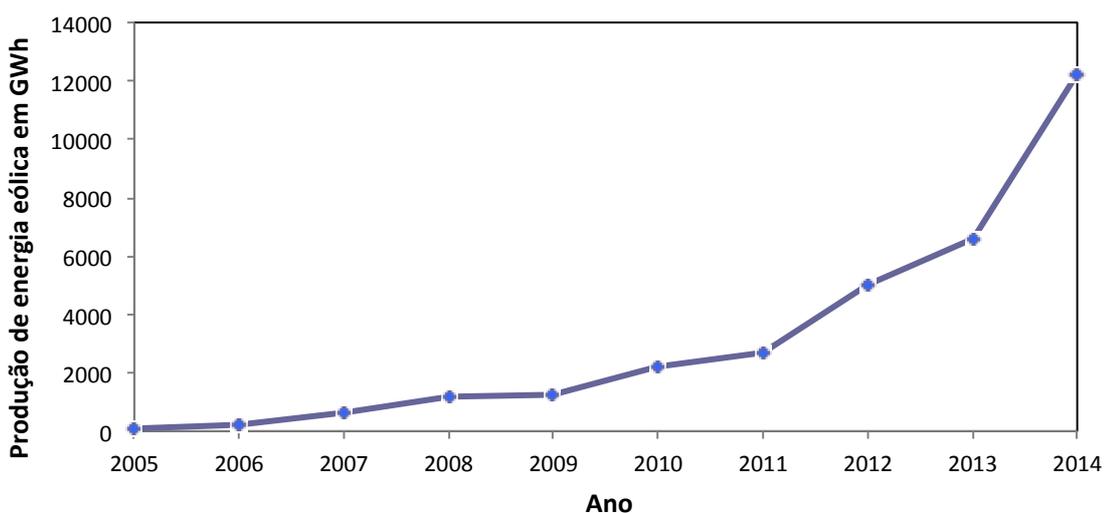


Figura 20 - Geração de energia eólica do Brasil, entre 2005 e 2014 (EPE, 2014).

As vantagens do uso deste tipo de energia consistem na utilização de fonte limpa e abundante em algumas regiões e requer baixo tempo de construção, comparado com uma usina hidroelétrica ou até mesmo uma termoelétrica. Em contrapartida, um dos grandes pontos negativos é sua poluição visual e ameaça aos pássaros, caso instalados em rotas de migração.

Para alcançar os níveis desejados de produção de energia elétrica, são necessários ventos de velocidade mínima de 7 a 8 m/s, que são encontrados, de acordo com a Organização Mundial de Meteorologia (WMO - *World Meteorological Organization*), em 13% da superfície terrestre. Segundo Favera (2012), estima-se que o potencial bruto está na ordem de 500.000TWh por ano, contudo, por restrições socioambientais, somente 10% estariam disponíveis, correspondendo a quatro vezes a demanda mundial de energia elétrica.

2.3.5.1 GERADORES EÓLICOS

A energia eólica é produzida por moinhos ou geradores eólicos, formados por um eixo horizontal com uma grande hélice coletora do vento necessário para mover uma turbina. Atualmente, de forma consolidada, os projetos de turbinas eólicas têm as seguintes características: três pás, alinhamento ativo, rotor horizontal, gerador de indução e estrutura não flexível, conforme Figura 21.

De acordo com Houssain (2015), nos dias atuais, existem dois tipos de sistemas de geração de energia elétrica a partir da força do vento: os que usam geradores síncronos; ou os que utilizam geradores por indução (também chamados de assíncronos), sendo o segundo o mais utilizado.

O gerador síncrono permite operar a turbina com modos de variação na velocidade, assim conseguindo gerar energia com uma intensidade menor de vento. Não há necessidade do uso de multiplicador de velocidade, ou caixas de transmissão, porém seu custo é mais elevado. O gerador assíncrono, ou por indução, trabalha com uma velocidade de vento constante, precisa da caixa de transmissão, gera mais energia que o síncrono, tem um custo menor, porém necessita de uma velocidade de vento maior para trabalhar (HOUSSAIN, 2015).

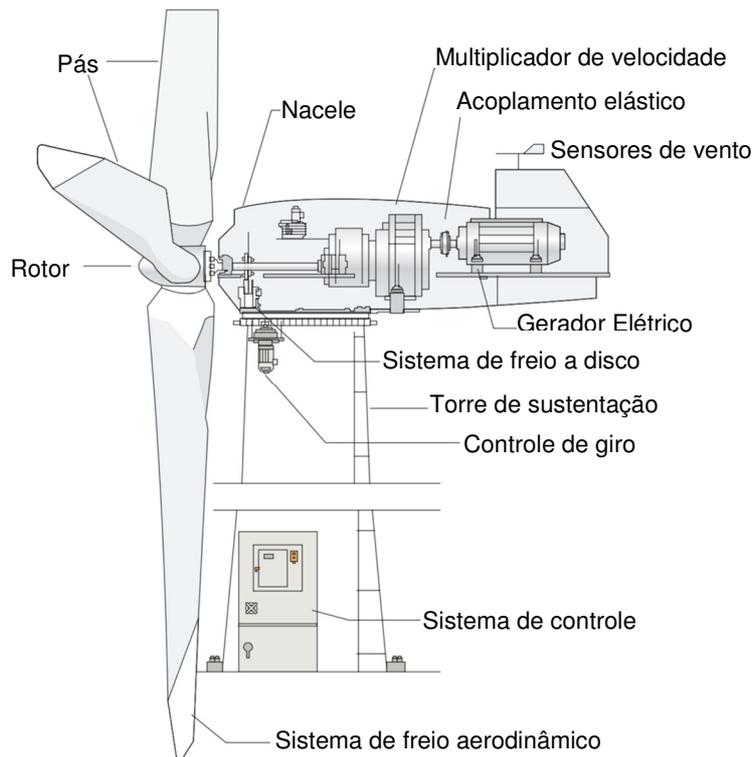


Figura 21 - Desenho esquemático de uma turbina eólica (CBEE, 2015).

A lei da conservação de energia estabelece que a quantidade total energética em um sistema isolado permanece constante. Portanto, para qualquer movimento gerador de energia mecânica, como movimento de uma turbina hidráulica, turbina a vapor ou turbina eólica, é possível acoplar um gerador para convertê-la, parte em energia elétrica, parte em calor (HALLIDAY *et al.*, 2013).

De acordo com Silva (2008), os Geradores de Indução com rotor em Gaiola de Esquilo (GIGE) são compostos por uma máquina de indução e ligados diretamente à rede e possuem menor custo de mercado. Estes trabalham com velocidade fixa, precisam de um banco de baterias compensadoras para corrigir seu fator de potência. Na Figura 22, é demonstrado o sistema de geração eólica com o uso de um sistema GIGE.

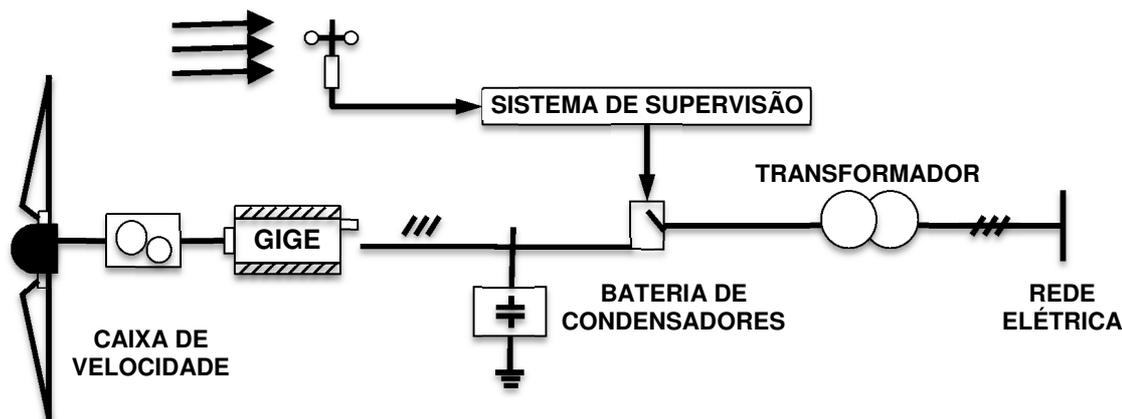


Figura 22 - Sistema de geração eólica com GIGE (SILVA, 2008).

De forma histórica, o primeiro gerador de energia eólica ligado ao sistema de rede pública surgiu em 1976, na Dinamarca. Atualmente, o maior produtor de energia eólica no mundo é a Alemanha, seguida pelos Estados Unidos da América, Espanha, Dinamarca e o resto do mundo, conforme ilustra a Figura 23 (ANEEL, 2008).

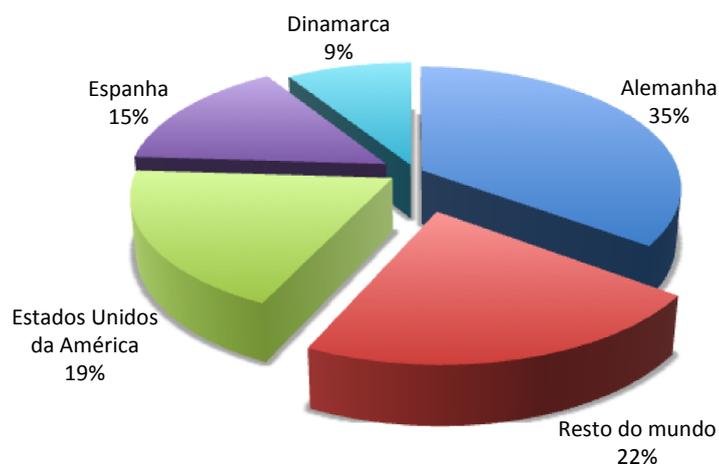


Figura 23 - Distribuição da capacidade instalada de geradores eólicos (ANEEL, 2008).

2.3.5.2 EXAUSTORES EÓLICOS

Para Khan *et al.* (2008), exaustores eólicos têm a função combinada de turbina de vento e exaustor. São peças usadas para substituição dos ventiladores de teto, pois usam a energia do vento para circulação de ar. Na Figura 24, são apresentados quatro modelos de exaustores, com tamanhos diferentes, porém com a mesma função, que é de manter o ambiente ventilado.

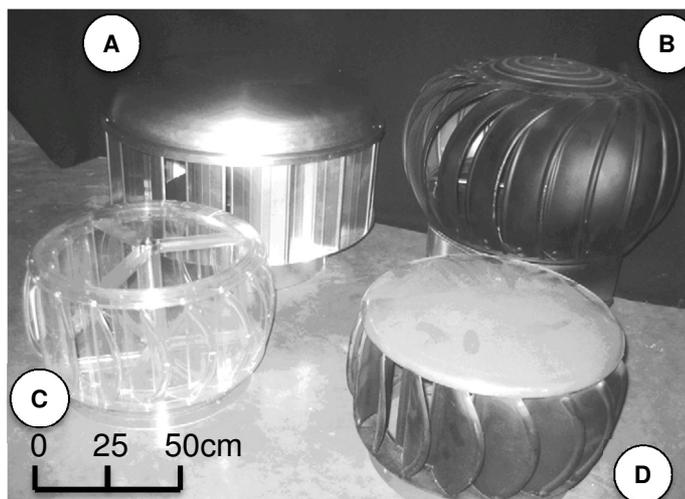


Figura 24 - Modelos de exaustores eólicos (KHAN *et al.*, 2008).

Estes exaustores são utilizados em locais onde formam bolsas de ar quente, como o telhado de indústrias, pois trabalham com a diferença de temperatura interna e externa destes locais, e também pela força do vento externo.

Os modelos expostos na Figura 24 têm algumas particularidades, porém todos seguem o mesmo conceito: devem ser a prova de água, refrigerar o ambiente em que foram instalados e serem construídos de um material leve (KHAN *et al.*, 2008).

Os modelos A, C e D têm formatos cilíndricos similares, porém são construídos com materiais diferentes. O modelo C tem a particularidade de aproveitar a iluminação solar, pois é construído por material transparente.

2.4 APROVEITAMENTO ENERGÉTICO - NOVOS ESTUDOS

A preocupação por aproveitamento de energia já está no cotidiano das pessoas. Pode-se encontrar sistemas de geração de energia em casas, ambientes públicos, indústrias, carros, barcos, etc.. Para Lee e Cheng (2016), entre os anos de 1982 e 2014, de acordo com a base de dados da *Science Direct*, foram publicados 357.030 artigos relacionados com o tema.

Para Lazos *et al.* (2014), o investimento em geração e aproveitamento energético tem ganhado força devido ao maior custo da energia elétrica e aumento da emissão de GEE. Diversas construções residenciais e comerciais têm utilizado recursos como geração de energia elétrica através de painéis solares, geradores eólicos,

aquecimento de água. Em muitos casos, estas propriedades, além de deixar de gastar com energia elétrica, tornam-se produtoras.

Um ponto de consumo de energia presente em todos os estabelecimentos é a iluminação. De acordo com Görgülü e Ekren (2013), 20% de toda energia consumida no mundo é para a iluminação. Ambos desenvolveram um sistema para manter a luminosidade de uma determinada sala em 350 lumens. Uma tubulação que reflete 98% da luminosidade captada da área externa foi instalada dentro da sala; caso a claridade esteja abaixo do desejado, o sistema utiliza iluminação artificial para fornecer somente o necessário, pois possui um sensor aferido para medir a quantidade de luminosidade e um controlador analógico para aumentar a luz artificial na porcentagem desejada.

Em Teerã, capital do Irã, foi feito um estudo para recuperação de energia a ser implementado na linha 3 do metrô, com o uso de super capacitores por meio da frenagem dinâmica dos trens. De acordo com Teymourfar *et. al.* (2012), a economia de energia com o uso deste sistema pode chegar a 44% em horários normais e 42% em horários de pico.

Em 2011 a *International Organization for Standardization (ISO)* publicou a ISO 50001 como padrão a ser aplicado para gerenciamento de energia dentro das indústrias. Para Müller *et. al.* (2013), a função da ISO 50001 é melhorar o desempenho energético dentro das empresas. Este é embasado na melhoria contínua seguindo os procedimentos do PDCA (*Plan - Do - Check - Act*) para integrar as operações das empresas e uso consciente da energia.

Cagno *et. al.* (2015) fizeram uma pesquisa sobre a relação entre a inovação e o uso de recursos para melhoria da eficiência energética em fundições. Eles mostraram que as empresas que possuem melhor eficiência energética são aquelas que utilizam de recursos inovadores (como produção intelectual dentro da empresa, engenharia reversa, monitoramento de processo, entre outras), tanto para atender as normas vigentes, como para redução de custos.

Hoje, uma alternativa para diminuição da emissão de GEE é o uso de carros híbridos, que utilizam tanto um motor a explosão, quanto um motor elétrico para se locomover,

pois quando o carro está utilizando o motor elétrico o mesmo não está poluindo. Neste sentido, Sun e Zhou (2016) propõem um algoritmo para calcular a rota que utilize menos combustíveis fósseis. Sendo assim, a trajetória consideraria a frenagem, tempo de carro parado e postos que possuam tomadas para recarga das baterias elétricas. Os algoritmos atuais, segundo eles, se preocupam somente com a menor rota ou a rota mais rápida.

2.5 ANÁLISE DE CIRCUITOS

Para conversão de energias mecânica, química, térmica, entre outras para energia elétrica é necessário o uso de um gerador, circuitos elétricos e eletrônico (YILMAZ, 2014). A seguir serão apresentados alguns circuitos que auxiliam na geração de energia em corrente contínua.

2.5.1 CIRCUITO RETIFICADORES DE MEIA ONDA

Segundo LaLond *et. al.* (1994), a função de um retificador é obter corrente contínua por meia da corrente alternada. Para isso, a forma mais simples de conseguir esta conversão é com o uso do retificador de meia onda. O circuito pode ser representado pela Figura 25.

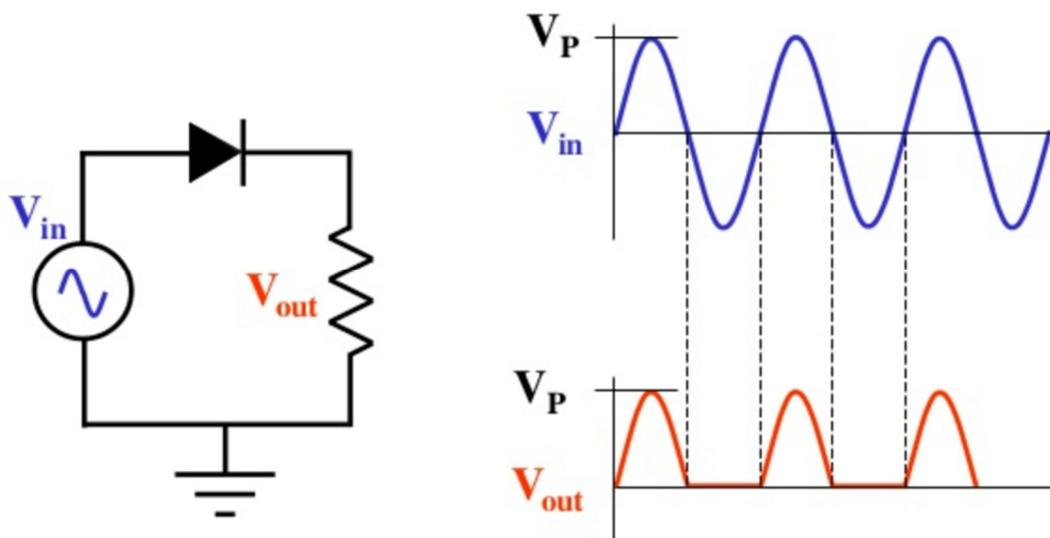


Figura 25 - Circuito retificador meia onda (adaptado LALOND *et. al.*, 1994)

Onde V_{in} é a tensão de entrada do circuito, V_{out} a tensão resultante e V_p a tensão de pico.

2.5.2 CIRCUITO RETIFICADORES DE ONDA COMPLETA EM PONTE

Também conhecido como retificador em ponte, tem a finalidade de retificar uma onda senoidal completa. Este circuito é responsável por refletir a parte negativa da onda para parte positiva, transformando o sinal somente em sinal positivo, conforme Figura 26 (HELJO, 2013).

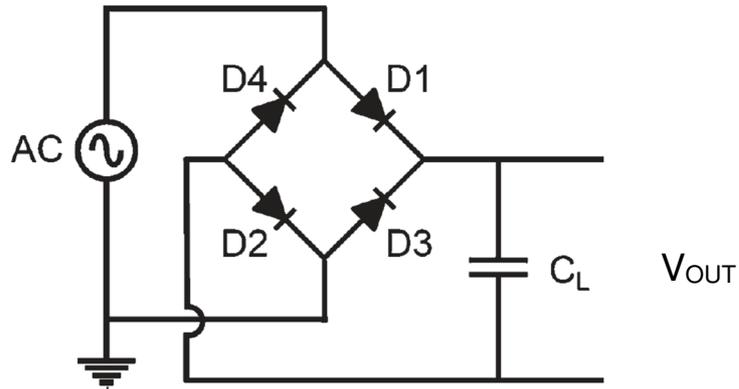


Figura 26 - Circuito retificador de onda completa em ponte (HELJO, 2013).

Onde AC representa a tensão de corrente contínua de entrada, D1 a D4 são os diodos utilizados para fazer a ponte retificadora, C_L o capacitor usado para atenuar as oscilações do sinal e V_{OUT} a tensão de corrente contínua de saída.

Para que seja possível atenuar o sinal de onda gerado pelo retificador em ponte, é colocado em paralelo a carga, um capacitor, reduzindo as oscilações e funcionando como um filtro. Isso ocorre pois enquanto a onda está na parte positiva o capacitor se carrega e, quando o sinal desce a uma tensão inferior a do capacitor ele se descarrega. A Figura 27 mostra o sinal de onda gerado (em pontilhado) pelo retificador, enquanto o sinal gerado do retificador interligado ao capacitor, está representado pela linha contínua (LALOND *et. al.*, 1994).

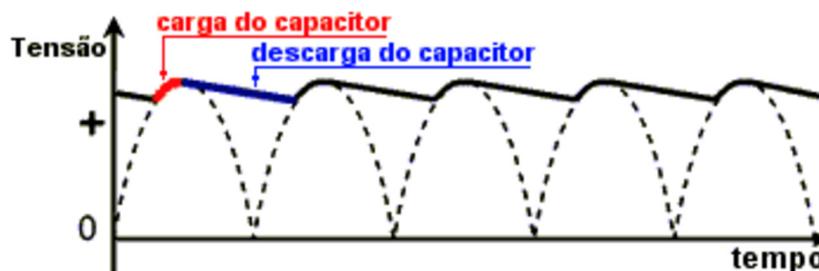


Figura 27 - Sinal de onda gerado pelo retificador ligado ao capacitor (LALOND *et. al.*, 1994).

2.6 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTO

De acordo com Sheshibori *et. al.* (2015), o planejamento de experimento, ou, em inglês, *Design Of Experiments (DOE)*, é uma técnica capaz de mostrar o comportamento de vários fatores ou mudanças (causas) em respostas (efeitos) para diferentes amplitudes deste fatores, em que o pesquisador gostaria de provar se algumas destas alterações nas variáveis afetam o resultado de seu experimento.

Na mesma linha, Schneiderman *et. al.* (2015) afirmam que DOE é um método estatístico rigoroso utilizado para definir efeitos significativos de múltiplas variáveis sobre uma dada resposta do sistema. Devido à verificação simultânea de todos os principais efeitos possíveis, esta técnica é capaz de diminuir a quantidade de experimentos testados e o total de tentativas .

Além disso, determina quais variáveis afetam, de forma mais significativa, o desempenho do experimento. Como benefícios, o DOE pode trazer redução em custos operacionais, tempo de projeto, variabilidade e melhor rendimento do experimento ou processo. Cada experimento é conduzido por uma sequência das atividades de conjectura, experimento, análise e conclusão. A conjectura trata da ideia inicial que inspira o experimento; por sua vez, o experimento é formado pelos testes desenvolvidos para apurar a conjectura, que coleta dados para realização da análise; e a conclusão demonstra o que foi descoberto a respeito da conjectura original (MONTGOMERY e RUNGER, 2013).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, são apresentados os materiais e instrumentos utilizados para realização dos testes para evolução do protótipo, além dos métodos aplicados para alcançar o objetivo de desenvolver um dispositivo de transformação de energia.

O presente trabalho apresenta características de pesquisa exploratória e experimental, com base nas seguintes considerações:

- Severino (2007) afirma que a pesquisa exploratória procura buscar informações sobre um tema, determinando, desta forma, um campo de trabalho e, assim, estruturando condições de materialização deste objeto. Cervo (2002) destaca que tais estudos não elaboram hipóteses e, sim, levantam objetivos para buscar mais informações sobre um determinado assunto, de forma a tornar o pesquisador mais familiarizado com o mesmo.
- De acordo com Gil (1996), o trabalho experimental visa à seleção de variáveis nas quais existam influências no objeto de estudo, onde se possa definir formas de controle e observação dos efeitos gerados por estas variáveis no elemento a ser estudado. Cervo (2002) diz que "caracteriza-se por manipular diretamente as variáveis relacionadas com o objeto de estudo". Na mesma linha de pensamento, Severino (2007) descreve: "*pesquisa experimental toma o próprio objeto em sua concretude como fonte e o coloca em condições técnicas de observação e manipulação experimental nas bancadas e pranchetas de um laboratório, onde são criadas condições adequadas para seu tratamento. Para tanto, o pesquisador seleciona determinadas variáveis e testa suas relações funcionais, utilizando formas de controle*".

Neste contexto, a Figura 28 mostra o fluxograma básico referente as atividades desenvolvidas de cunho exploratório e experimental.

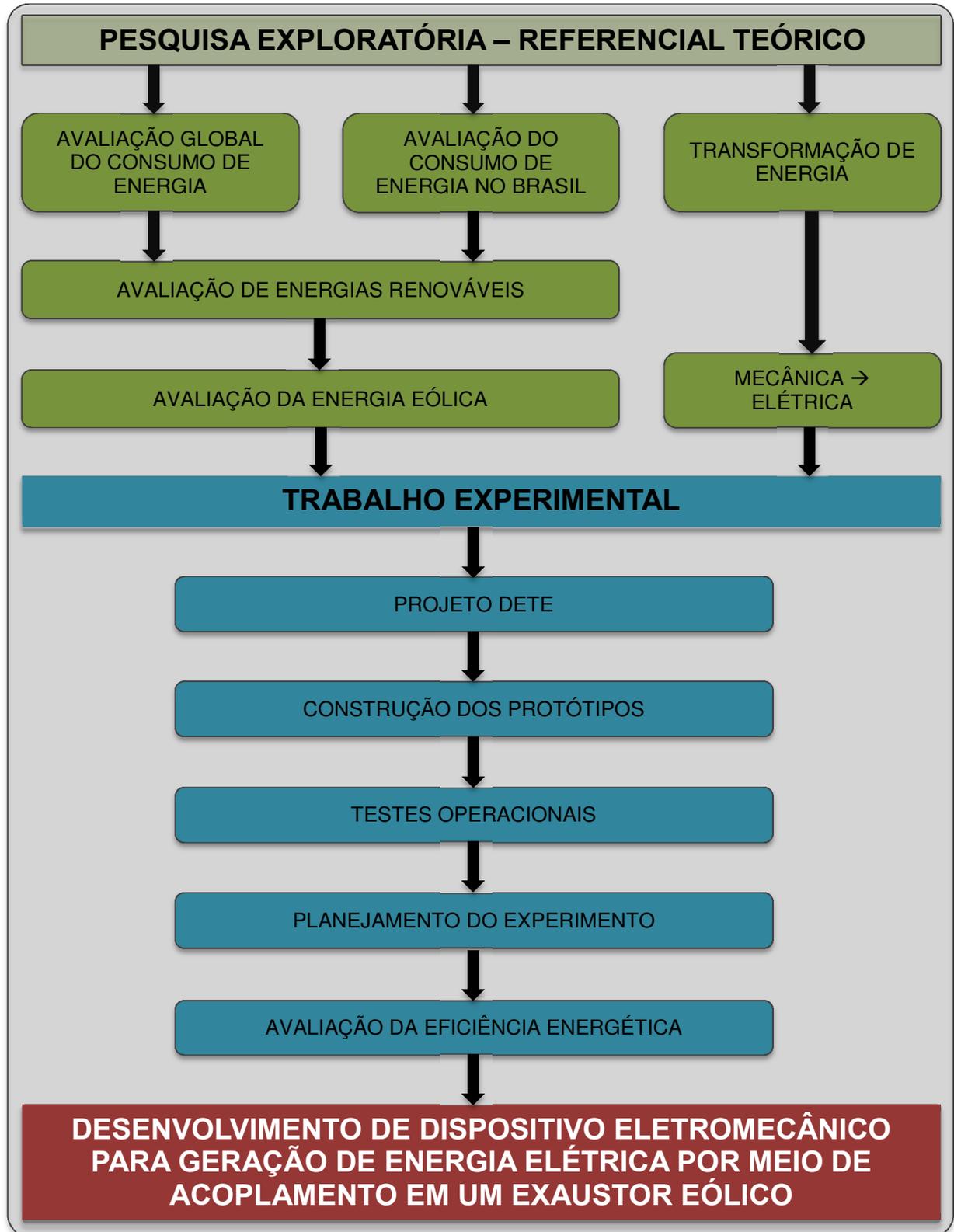


Figura 28 - Fluxograma de desenvolvimento do projeto.

3.1 MATERIAIS E INSTRUMENTOS

O sistema proposto de geração de energia elétrica por meio do uso de um exaustor eólico é composto por um sistema de transmissão mecânica e um sistema elétrico, que são acoplados ao equipamento. Este sistema é denominado Dispositivo Eletromecânico para Transformação de Energia eólica em elétrica (DETE).

A Figura 29 mostra o exaustor utilizado para implementar o sistema de geração de energia, com suas principais dimensões.

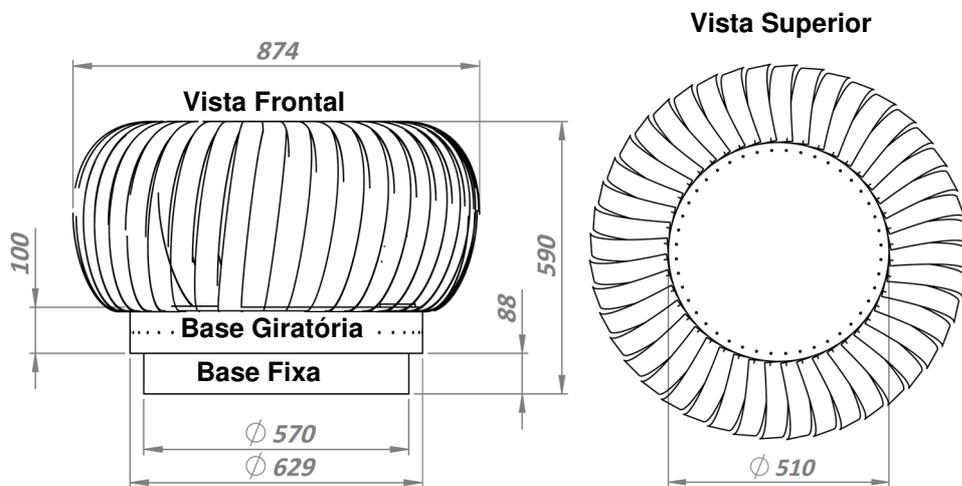


Figura 29 - Dimensões do exaustor eólico utilizado (medidas em milímetros).

O sistema de transmissão é responsável por levar a energia mecânica, gerada no eixo do exaustor eólico, para o gerador de energia elétrica. Neste caso, a geração ocorre pela transformação da energia mecânica em elétrica pelo uso de um dínamo que, segundo Khalili (2015), é um gerador que fornece corrente contínua, similar a um alternador, que fornece corrente alternada.

O gerador utilizado, modelo 0142, é fabricado pela empresa Akiyama, fornece 12 Vcc em 3500 RPM e possui torque de $24,51 \times 10^{-4}$ Nm (25 gf.cm), conforme ilustrado pela Figura 30.

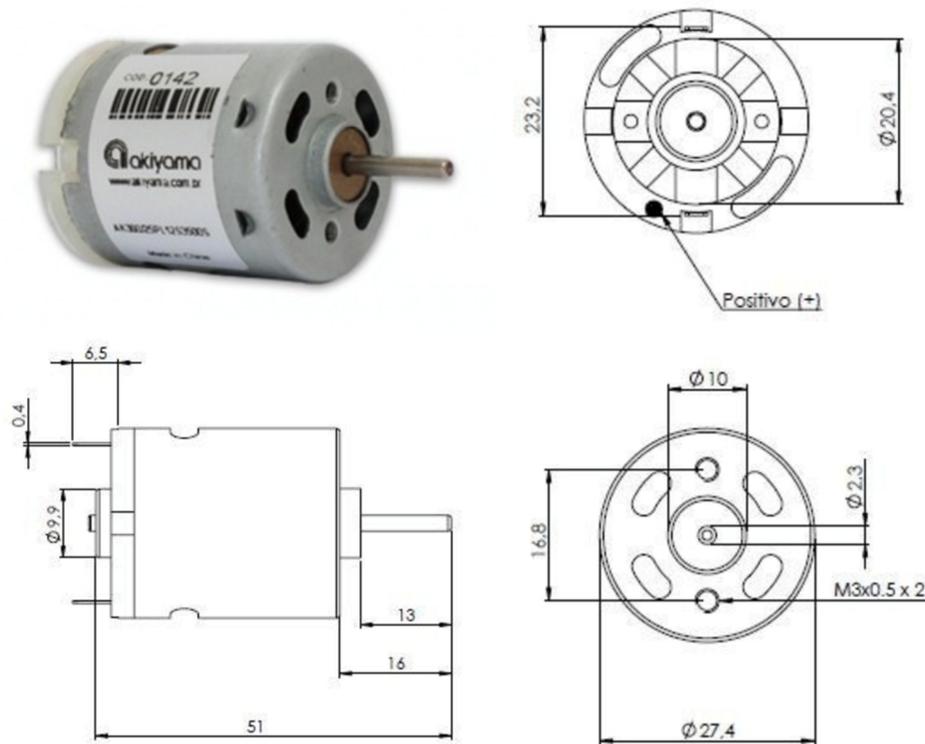


Figura 30 - Dínamo utilizado para geração de energia.

Foi utilizado um conjunto de quatro baterias recarregáveis de 1,2 Vcc com corrente de 2700 mA. Utilizado para armazenamento da carga gerada pelo dínamo. Entretanto as baterias não podem receber a energia gerada do gerador diretamente, pois o mesmo não possui proteção, além de fornecer uma tensão com formato de onda não regular. Desta forma, foi desenvolvido um circuito retificador de tensão que, além de manter a tensão estável, garante o fluxo de energia somente no sentido do gerador para carga (bateria ou lâmpada LED - *Light Emitting Diode*), ilustrado na Figura 31.

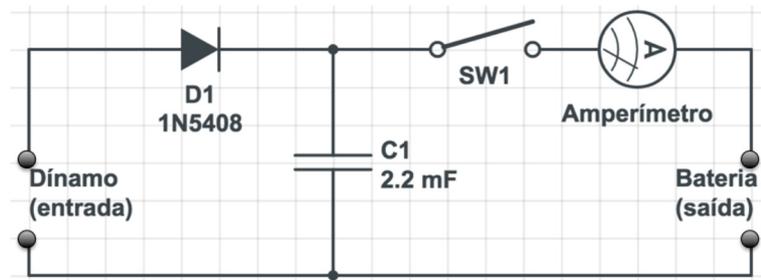
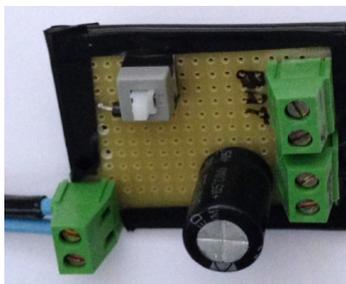


Figura 31 - Circuito retificador de tensão.

A Figura 32 mostra a imagem de uma tela de osciloscópio referente ao sinal de onda gerada na saída do circuito retificador de sinal de tensão. Nota-se que, apesar do gerador ser de corrente contínua, o sinal da onda não é estabilizado.

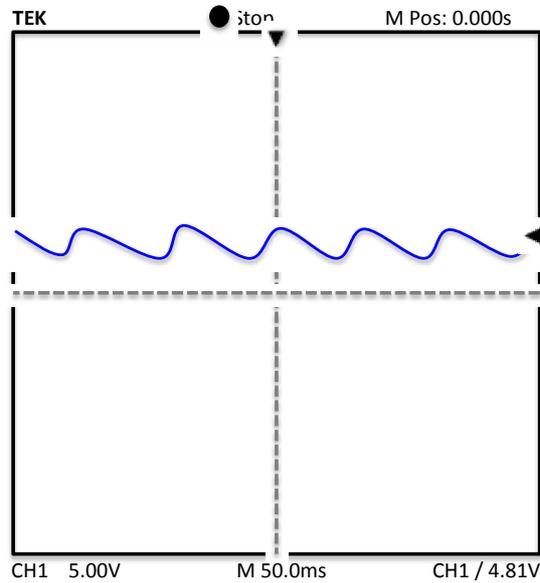


Figura 32 - Sinal de onda da tensão (V_{cc}) fornecida pelo gerador.

Para retificar a tensão gerada, foram inseridos ao circuito: um diodo 1N5408 que suporta até 3A e uma tensão reversa de 1000V; e um capacitor de 2.2 mF e tensão de até 25V. A Figura 33 mostra o sinal de onda gerado pelo DETE com a instalação dos componentes citados.

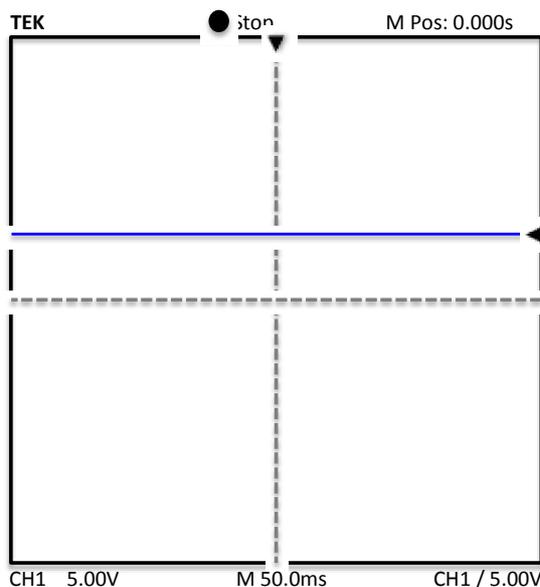


Figura 33 - Formato de onda da Tensão (V_{cc}) formado pelo gerador com sistema de retificação de sinal.

Como demonstrativo de carga, foram utilizadas cinco lâmpadas LED branco de acordo com a intensidade luminosa de 20.500 MCD com potência de 100 mW, que operam entre as tensões de 2,8 e 4 Vcc.

Para construção do protótipo 4, foram utilizados imãs para transmissão, que são imãs de neodímio, com as características: grade N-35 NdFeB, possui resistência de trabalho de até 80 °C e produto de energia de 35 MGOe (Megagauss-Oersteds equivale a 278,495 kJ/m³); densidade de 7400 kg/m³; temperatura de curto de 310 °C e temperatura máxima de trabalho de 80 °C.

Para geração de diferentes velocidades de vento, foi utilizado um ventilador da marca ARNO, modelo NV32-NE, com uma hélice de 3 pás e motor com potência de 80 W.

Foi usado um anemômetro (marca Benetech, modelo GM816A) para medições da velocidade do vento entre 0 a 30 m/s.

Além do vento, foram necessárias outras medições, como tensão e corrente produzidas pelo gerador. Para captar estes dados, com escalas em Vcc e mA, foi utilizado um multímetro da marca Fluke, modelo 117 True RMS.

Para medição da rotação do eixo do exaustor e, por consequência, do gerador, foi usado um Controlador Lógico Programável (CLP). Para conseguir coletar estes dados, foi instalado um imã na base giratória e um sensor capacitivo para fazer a leitura. O CLP utilizado foi um Micrologix 1100 1763L16BXB da marca Allen-Bradley.

Como último instrumento, foi utilizado um osciloscópio modelo TDS 210 da marca Tektronix para análise do formato de onda gerado na saída do sistema retificador.

3.2 DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL DO SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA: CONSTRUÇÃO DOS PROTÓTIPOS

O desenvolvimento do sistema foi executado de forma evolutiva, em que foi implementada uma ideia inicial e, a partir desta, foram realizados testes, medições e efetuados os reparos necessários. A Figura 34 mostra o fluxograma de melhoria contínua realizada para obtenção do Dispositivo Eletromecânico de Transformação de Energia elétrica (DETE).

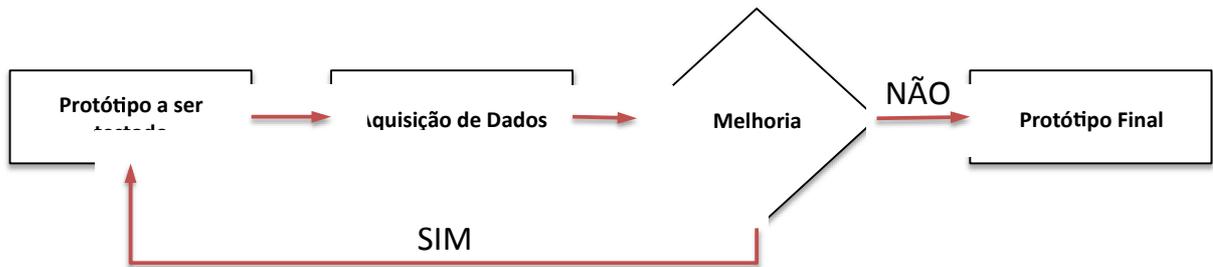


Figura 34 - Fluxograma da elaboração dos protótipos.

Foram construídos 5 protótipos com a meta de gerar 5Vcc e obter o melhor aproveitamento da energia mecânica gerada pelo exaustor eólico.

3.2.1 PROTÓTIPO 1

No primeiro sistema de transmissão, o gerador foi fixado no lado externo do exaustor, e a captação da energia mecânica foi realizada por meio de um cilindro com diâmetro de 25 mm e espessura de 8 mm, por meio do atrito com a superfície giratória. A fixação foi feita por duas hastes e um espaçador de 10 mm de altura por 10 mm de diâmetro, conforme Figura 35.

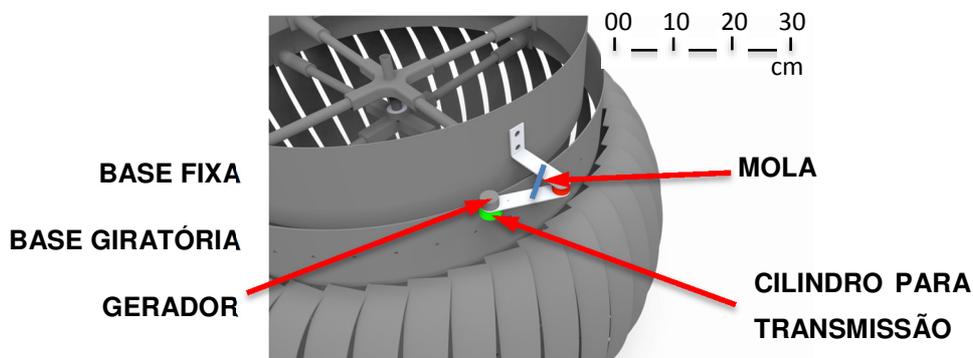


Figura 35 - Gerador acoplado na parte externa com transmissão por atrito à base giratória.

Uma mola entre as duas hastes é responsável por deixar o gerador em contato com o exaustor, corrigindo assim as irregularidades da base giratória. Porém, a mola deixa de exercer sua função quando a base giratória atinge velocidades superiores a 34 RPM. Como a base giratória possui um diâmetro de 629 mm e o cilindro de transmissão tinha 25 mm, a relação é de 1 volta da base para 25,16 do gerador.

3.2.2 PROTÓTIPO 2

No segundo protótipo de transmissão, foi projetado um cilindro feito de chapa de aço com espessura de 2 mm, com diâmetro externo de 510 mm e interno de 470 mm, preso na base giratória e com apoio ao gerador, mantendo assim uma superfície regular e constante. Outra melhoria do sistema foi referente à fixação do gerador, que mudou da parte externa para interna, assim evitando contato com o ambiente externo, como mostra a Figura 36.

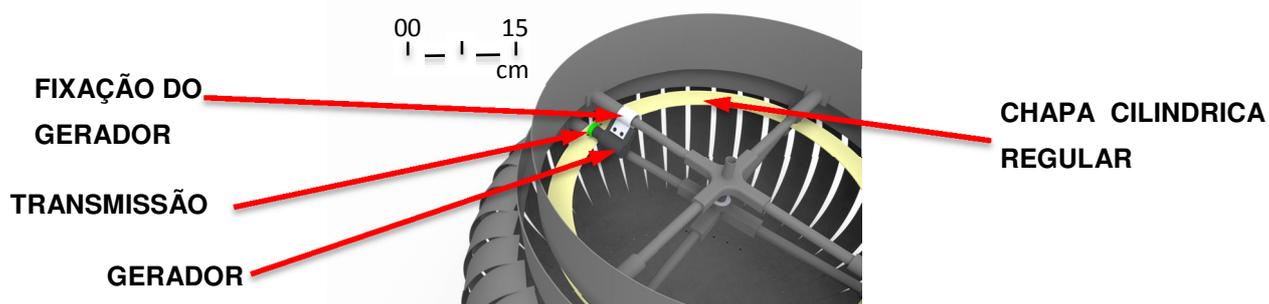


Figura 36 - Gerador com transmissão por atrito em chapa cilíndrica sem deformidades.

No início dos testes com o protótipo 2, foram necessários ajustes com a fixação do gerador na base fixa, pois não estava atritando o suficiente com a base giratória, inibindo a geração de energia de forma eficiente. O cilindro conectado ao gerador possuía um diâmetro de 25 mm e a base de contato tinha um diâmetro mediano de 490 mm, resultando em uma relação de 1/19,6.

3.2.3 PROTÓTIPO 3

Neste protótipo, o gerador foi mantido na parte interna e utilizou a mesma chapa cilíndrica regular do anterior, porém o mesmo ficou apoiado na parte interna da chapa e preso por um dispositivo ajustável com formato em "L" na base fixa do sistema, como pode ser visto na Figura 37.

O propósito desta alteração foi diminuir a área de contato entre a superfície do gerador e a base giratória. Entretanto, a relação também diminuiu para 1/18,8, pois o diâmetro de contato foi de 490 mm para 470 mm.

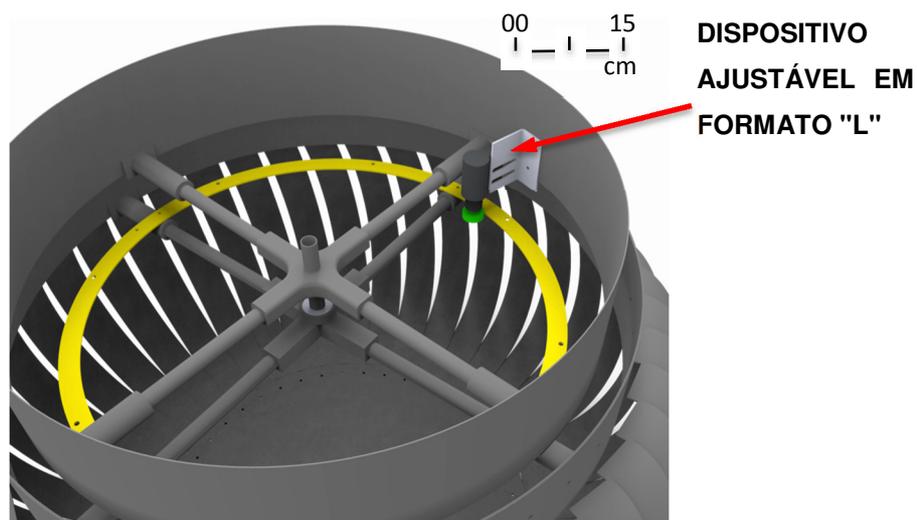


Figura 37 - Gerador realocado para gerar menos atrito entre o cilindro e a chapa.

3.2.4 PROTÓTIPO 4

Neste protótipo, foi alterado o sistema de transmissão. O efeito do atrito por contato entre as partes girantes e o gerador, foi substituído por um sistema de transmissão magnética em que, na base giratória, foram fixados 72 ímãs de neodímio e, no gerador, foram fixados 12 ímãs, sempre intercalando os polos positivo e negativo, no sentido de atuar em função da propriedade de atração. A transmissão ficou com uma relação baixa de 1/6.

A Figura 38 mostra os ímãs cilíndricos, tanto na base giratória, quanto os que estão fixados no gerador. Não existe contato algum entre os conjunto de ímãs, porém atua uma força de atração devido ao campo magnético gerado.

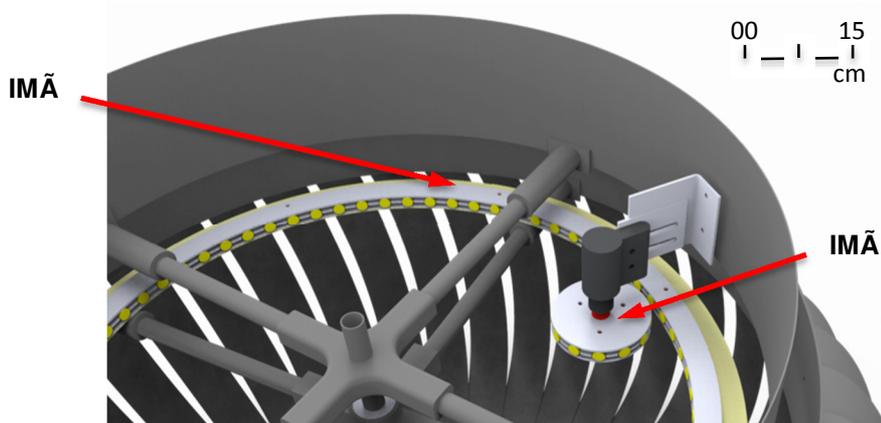


Figura 38 - Gerador com transmissão por magnetismo.

Cada conjunto é composto por três chapas, sendo que, na intermediária, foram posicionados os ímãs para mantê-los equidistantes, e as chapa inferior e superior servem para dar suporte para que eles não se desloquem do suporte central.

3.2.5 PROTÓTIPO 5

Foi desenvolvida uma transmissão a partir de engrenagens fixadas no eixo principal do exaustor eólico, acoplada entre a base fixa e a giratória, para dar estabilidade ao sistema, mostrado na Figura 39.

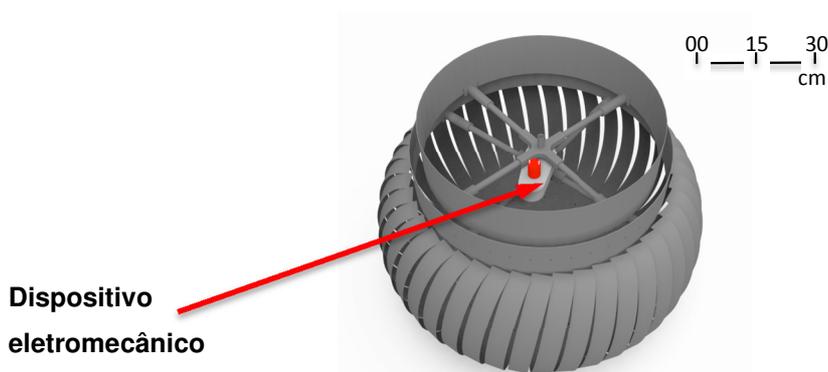


Figura 39 - Gerador com transmissão por engrenagens.

Como mostra a Figura 40, a transmissão é composta por quatro engrenagens de dentes retos, possuindo 43, 8, 53 e 8 dentes, respectivamente, sendo que as engrenagens 2 e 3 são compostas, resultando em uma relação de 1/35,6.

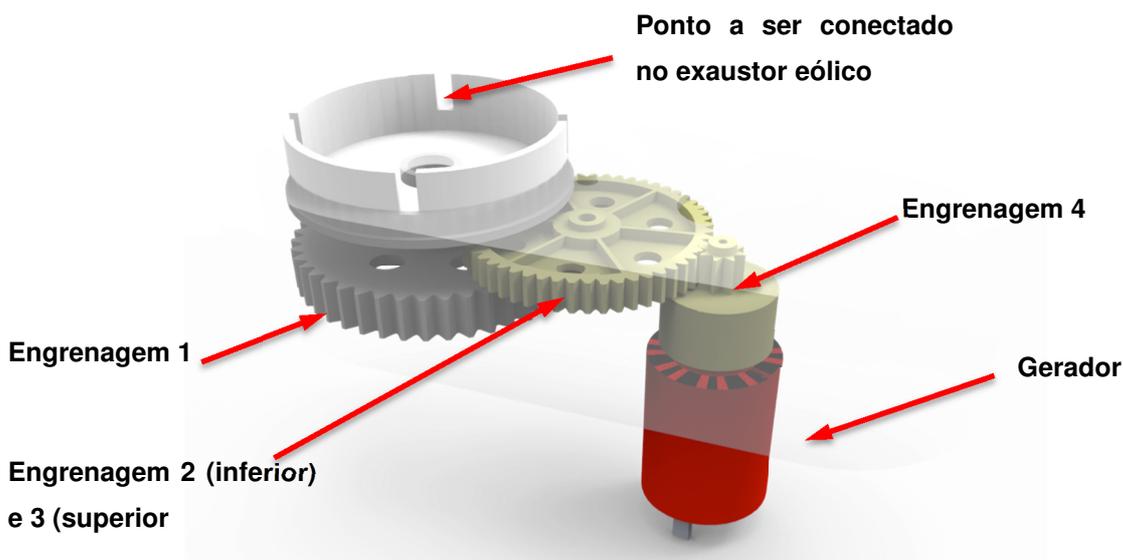


Figura 40 - Dispositivo eletromecânico para amplificar a rotação do exaustor eólico.

Para otimizar a geração de energia elétrica, foi necessária a implementação de um diodo no cabo positivo do gerador. O diodo é responsável por permitir a passagem de corrente em um único sentido, como mostra a Figura 41. Para obter uma tensão mais estável e foi colocado um capacitor em paralelo aos cabos da bateria.

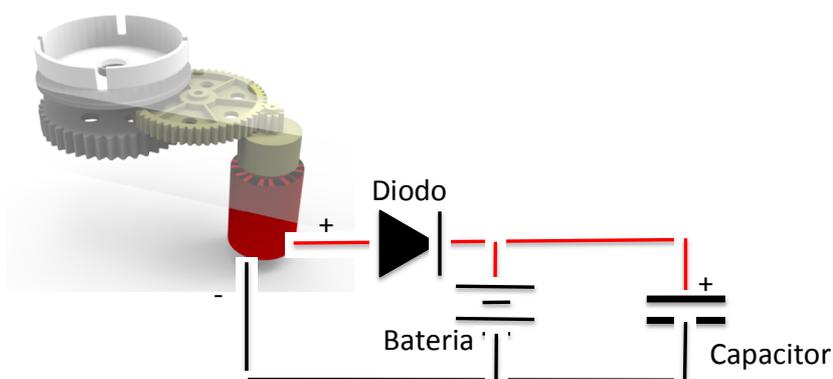


Figura 41 - Diodo e capacitor implementado no circuito eletrônico.

3.3 PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO

Com a finalidade de verificar se diferentes níveis de vento geram tensões que diferem de forma estatisticamente significativa, foi realizado o planejamento e a análise de experimento, com o sistema sem carga, seguindo os procedimentos de Montgomery e Runger (2013).

A análise foi realizada considerando a influência de um único fator à geração da tensão: a velocidade do vento. Considerando uma significância de 1%, cinco tratamentos (velocidade do vento de 10,5 km/h; 12,5 km/h; 14 km/h; 17 km/h e 18,8 km/h) e sete observações, de acordo com a curva operacional apresentada por Montgomery e Runger (2013), será possível alcançar um teste com uma confiança de aproximadamente 98%. Normalmente, testes com poder superior à 90% são aceitáveis.

Definido o tamanho da amostragem, como primeiro passo para verificar se há uma diferença significativa entre os dados gerados pelas variáveis nos diferentes tratamentos, apresenta-se o *boxplot* das variáveis, que se trata de uma análise gráfica dos dados obtidos com o experimento.

Além da avaliação gráfica, também é possível realizar um teste formal para averiguar se as diferenças são significativas entre os tratamentos. A metodologia empregada foi de análise da variância com único fator, também conhecida como *one-way ANOVA* (*Analysis of Variance*). Essa metodologia permite, via utilização do teste F (teste de hipóteses para verificar se o modelo está adequado), verificar se há uma diferença estatisticamente significativa na geração de energia para os diferentes níveis de vento. O teste consiste em considerar um modelo linear, tal como:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \epsilon_{ij} \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad \text{Equação 1}$$

no qual Y_{ij} é a tensão gerada pelo sistema à i – ésima velocidade do vento na j – ésima repetição do teste, μ é o parâmetro comum a todos os níveis de velocidade, ou seja, a tensão média captada em todo o experimento, τ_i é a média associada à i – ésima velocidade do vento, chamado pelos autores de efeito do i – ésimo tratamento, e ϵ_{ij} representa o resíduo, ou parcela não explicada pelas variáveis mencionadas anteriormente (MONTGOMERY e RUNGER, 2013).

Em seguida, faz-se o teste da seguinte hipótese:

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = \tau_4 = \tau_5 = 0 \quad \text{Equação 2}$$

$$H_A: \tau_i \neq 0, \text{ para } i > 0 \quad \text{Equação 3}$$

Se a hipótese nula deste teste for rejeitada, pode-se dizer que há diferença significativa na geração de tensão para os tratamentos rejeitados. Caso não haja rejeição da hipótese nula, os tratamentos serão considerados como similares na geração de tensão.

O teste F é apresentado ao final da tabela ANOVA, mostrada na Tabela 1

Tabela 1 - Tabela para realização da ANOVA.

Fontes de Variação	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Estatística F	P-valor da estatística F
Tratamentos	SQTrat	glTrat	QMTrat	F	f_0
Resíduos	SQRes	glRes	QMRes		
Total	SQT	glTotal			

Graus de liberdade dos tratamentos ($glTrat$):

$$glTrat = a - 1 \quad \text{Equação 4}$$

onde a representa o número de tratamentos.

Graus de liberdade dos resíduos ($glRes$):

$$glRes = a(n - 1) \quad \text{Equação 5}$$

onde n demonstra o número de amostras do experimento.

Graus de liberdade totais ($glTotal$):

$$glTotal = an - 1 \quad \text{Equação 6}$$

Soma dos tratamentos ($SQTrat$):

$$SQTrat = n \sum_{i=1}^a (\bar{Y}_i - \bar{Y}_{..})^2 \quad \text{Equação 7}$$

em que \bar{Y}_i representa a média por tratamento e $\bar{Y}_{..}$ a média global. O quadrado médio é obtido pela razão entre soma de quadrados e graus de liberdade, e a estatística F é a razão dos quadrados médios.

Soma total (SQT),

$$SQT = \sum_{i=1}^a (Y_{ij} - \bar{Y}_{..})^2 \quad \text{Equação 8}$$

e soma dos resíduos ($SQRes$)

$$SQRes = SQT - SQTrat \quad \text{Equação 9}$$

O p-valor, indicando a probabilidade da hipótese nula ser verdadeira, é obtido pela função densidade da distribuição F e pode ser obtido via *software* estatístico.

Para observar as diferenças específicas, outra metodologia foi empregada, avaliando-se a mínima diferença significativa ou MDS (MONTGOMERY e RUNGER, 2013). Essa medida verifica, utilizando a distribuição *t-Student*, se a diferença entre as médias do tratamento é significativa, utilizando a Equação 10:

$$MDS = t_{\alpha/2; glRes} \sqrt{\frac{2QMRes}{n}} \quad \text{Equação 10}$$

4 RESULTADOS

Foram feitos testes com todos os protótipos construídos, no sentido de coletar dados para determinar a viabilidade de geração e armazenamento de energia elétrica. A seguir, são apresentados os resultados obtidos para os cinco protótipos produzidos.

4.1 PROTÓTIPOS 1, 2, 3 E 4

Os testes para os protótipos entre 1, 2, 3 e 4 foram realizados para determinar quais os níveis de tensão que poderiam alcançar e, a partir destes valores, determinar sua capacidade de uso.

O protótipo 1 mostrou que o sistema funcionou em velocidades menores a 34 RPM da base giratória, devido às irregularidades encontrada na superfície do exaustor eólico. Ao atingir rotação superior a velocidade supracitada (alcançadas com ventos de 14 Km/h, com o sistema sem carga), o sinal de tensão estacionou em 1.9 Vcc devido ao desacoplamento do cilindro de transmissão do exaustor eólico. A Figura 42 ilustra o resultado de sinal de tensão obtido, com um erro de medição do instrumento de até 5%.

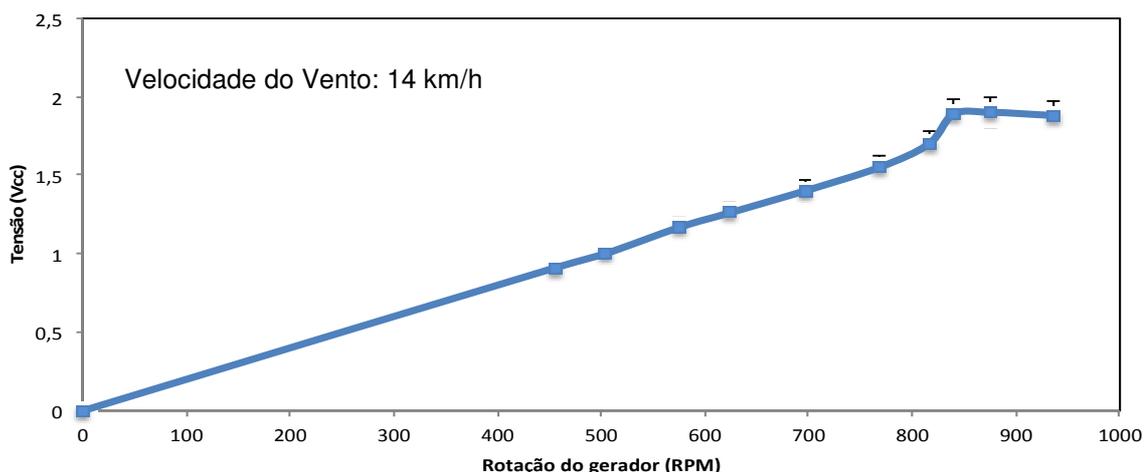


Figura 42 - Tensão gerada pelo protótipo 1, em relação ao giro do gerador.

No protótipo 2, o gerador forneceu níveis de tensão superiores a 2 Vcc, melhorando o desempenho do sistema, em relação ao protótipo anterior. Com velocidade do vento

em 16,5 km/h, a tensão máxima gerada, sem carga, foi de 2,3 Vcc. O dados de tensão gerada com relação a rotação do gerador são mostrados na Figura 43, com um erro de medição do instrumento de até 5%.

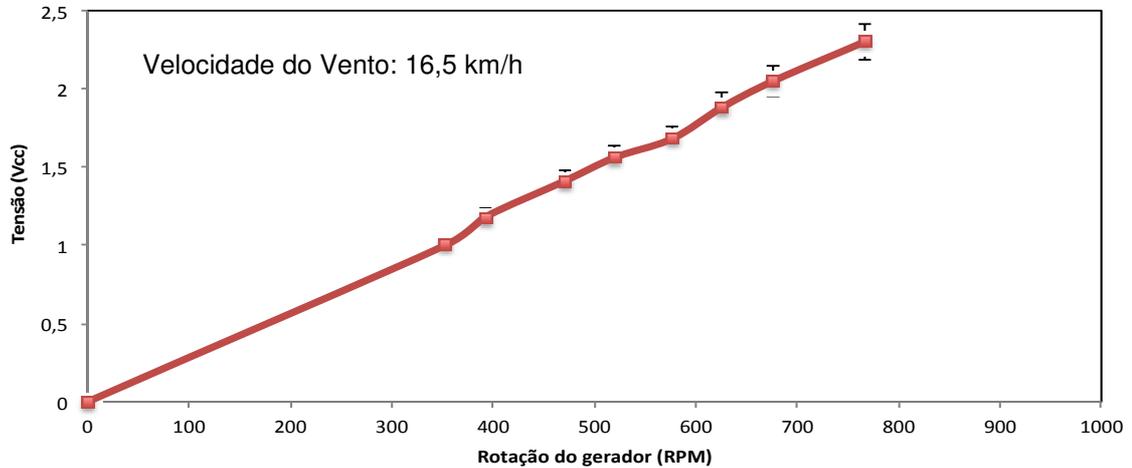


Figura 43 - Valores de tensão adquiridos pelo protótipo 2 em função da rotação do gerador.

O protótipo 3 apresentou atrito menor, comparado com os protótipos 1 e 2. Houve uma redução de 19,6 para 18,8 na transmissão do sistema, observa-se um melhor rendimento, porém não da forma desejada. Com velocidade do vento em 16,4 km/h, a tensão produzida foi de 2,41 Vcc, pois, com um atrito menor, o eixo gira mais rápido que o protótipo anterior. A Figura 44 mostra a relação entre a rotação do eixo em função da tensão produzida, com um erro de medição do instrumento de até 5%.

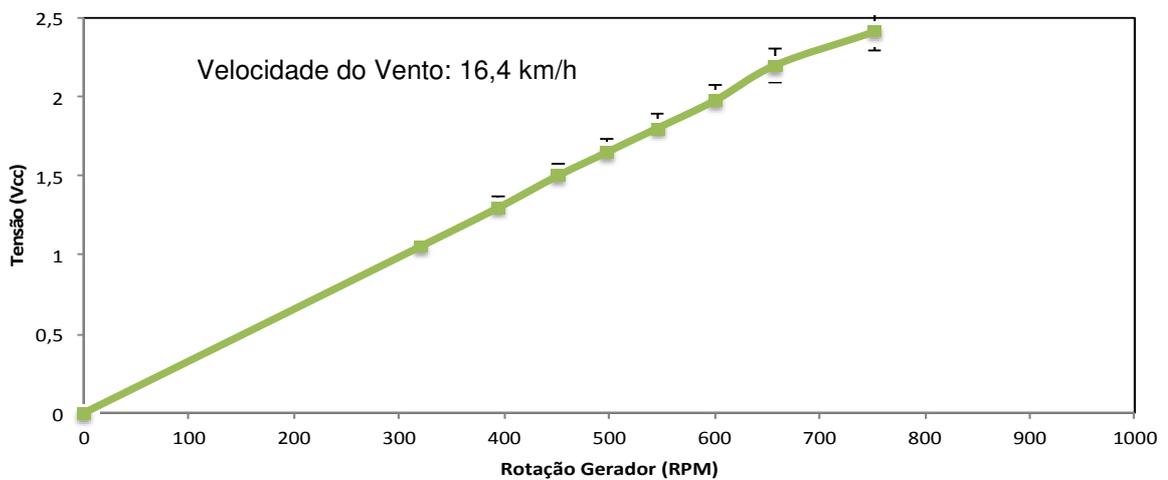


Figura 44 - Variação da tensão Vcc coletada do protótipo 3 com base na rotação do gerador.

Com o uso de ímãs de neodímio para transmissão entre o eixo giratório e o gerador, foi reduzido o atrito no protótipo 4, porém a relação da transmissão ficou em 1/6; como efeito, a rotação do gerador atinge um valor máximo de 348 RPM, limitando a tensão máxima produzida em 1,78 Vcc, para uma velocidade de vento de 16,8 k/h, conforme ilustra a Figura 45, com um erro de medição do instrumento de até 5%.

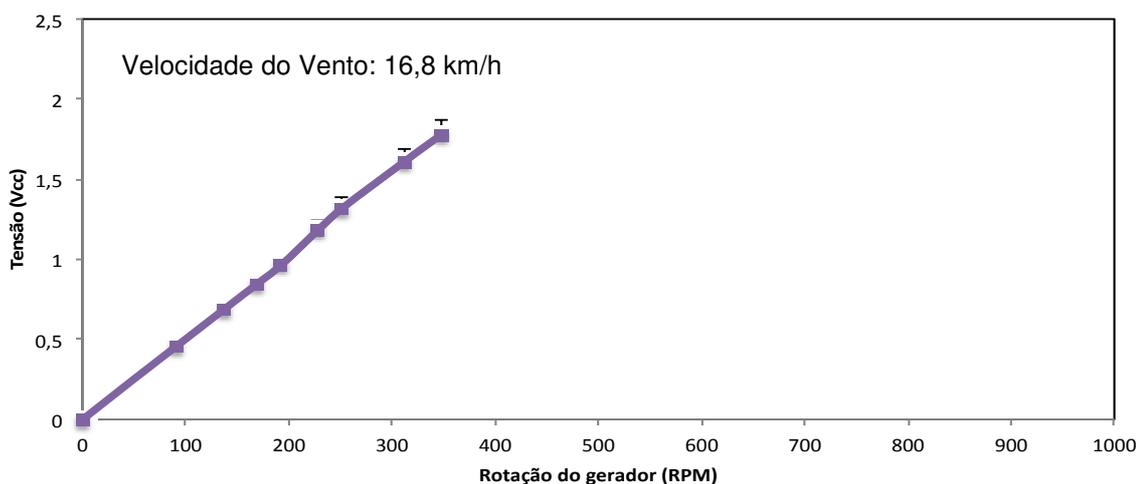


Figura 45 - Valores de tensão Vcc do protótipo 4, com relação ao giro do gerador.

O problema encontrado neste protótipo foi a proximidade que os ímãs precisam estar um dos outros, desde a base giratória até o gerador. Para que a transmissão funcione corretamente, a distância entre os ímãs deve ser no máximo de 3 mm. Ao aumentar a velocidade da base giratória do exaustor eólico, essa distância tende a diminuir, uma vez que a base giratória começa a oscilar. Quando isso ocorre, devido à propriedade de atração dos ímãs, as estruturas do gerador e da base giratória se encostam, travando o exaustor.

A Figura 46 mostra os dados de tensão gerada pelos 4 protótipos, para comparação entre os desempenhos. Nota-se que o protótipo 3 foi o que gerou uma maior tensão, enquanto o protótipo 1, mesmo com rotação maior, não alcançou 2 Vcc, devido ao elevado atrito na base giratória do exaustor eólico.

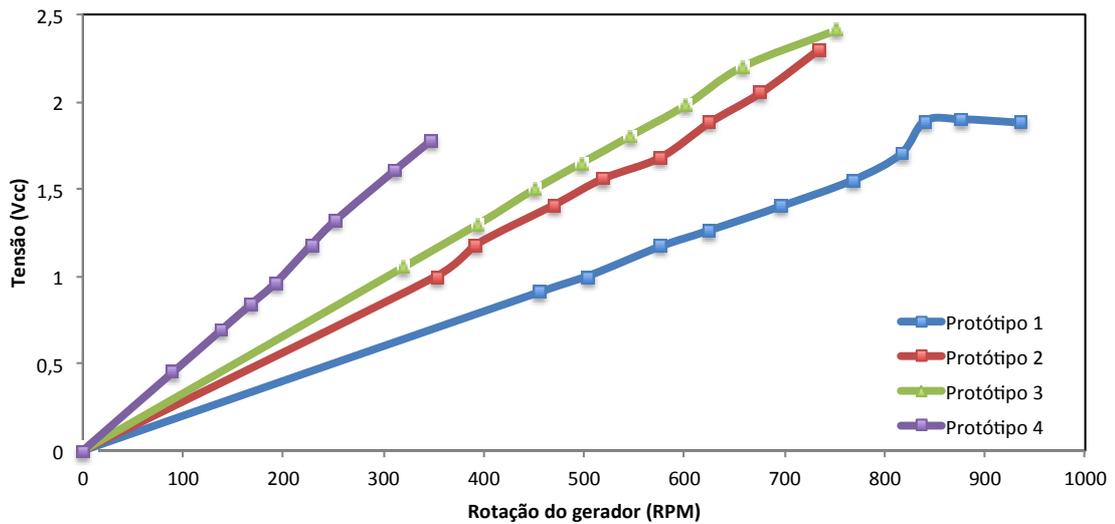


Figura 46 - Valores de tensão do protótipo 1 ao 4 em função da rotação do gerador.

4.2 PROTÓTIPO 5

O primeiro teste realizado foi como no protótipos anteriores, com o sistema sem carga partindo de zero a velocidade do vento, e aumentando até 18 km/h, e para a medição da tensão, foi utilizado o multímetro. Este protótipo obteve valores de tensão superiores aos anteriores. Por exemplo, com uma velocidade de vento de 16,5 km/h, obteve-se uma tensão de 4,6 Vcc (com o sistema sem carga), correspondente a aproximadamente 1400 RPM no eixo do gerador, conforme mostra a Figura 47, com um erro de medição do instrumento de até 5%.

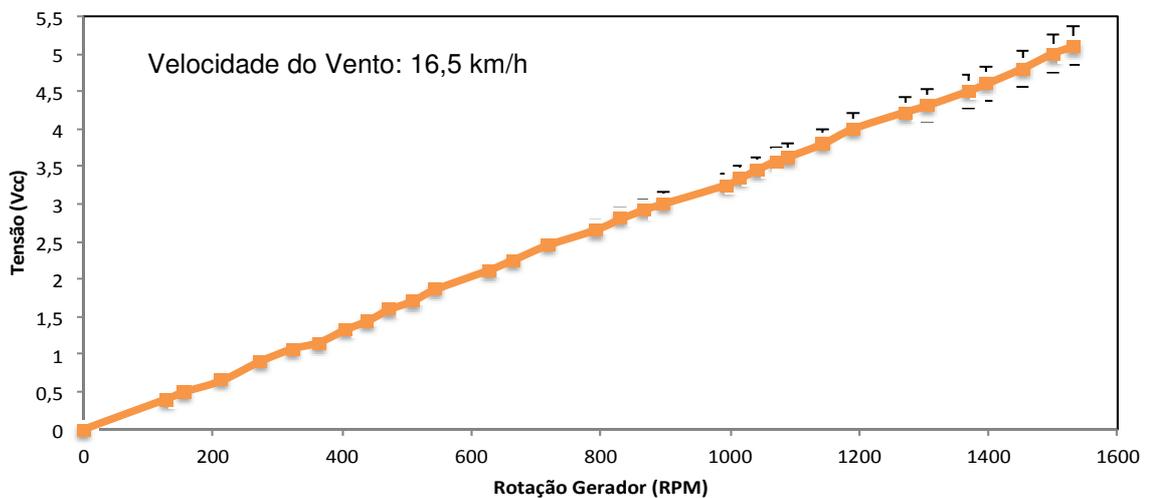


Figura 47 - Dados de tensão do protótipo 5 sem carga.

O segundo teste foi realizado sem diodo, para servir de comparação com o circuito retificador. Iniciou-se com a velocidade de vento de 16,8 km/h, acoplado a bateria ao gerador e analisado o comportamento de sistema. As medições foram feitas a cada 10 minutos. A Figura 48 mostra os dados coletados para rotação (A), tensão (B) e corrente (C), todos em função do tempo de operação.

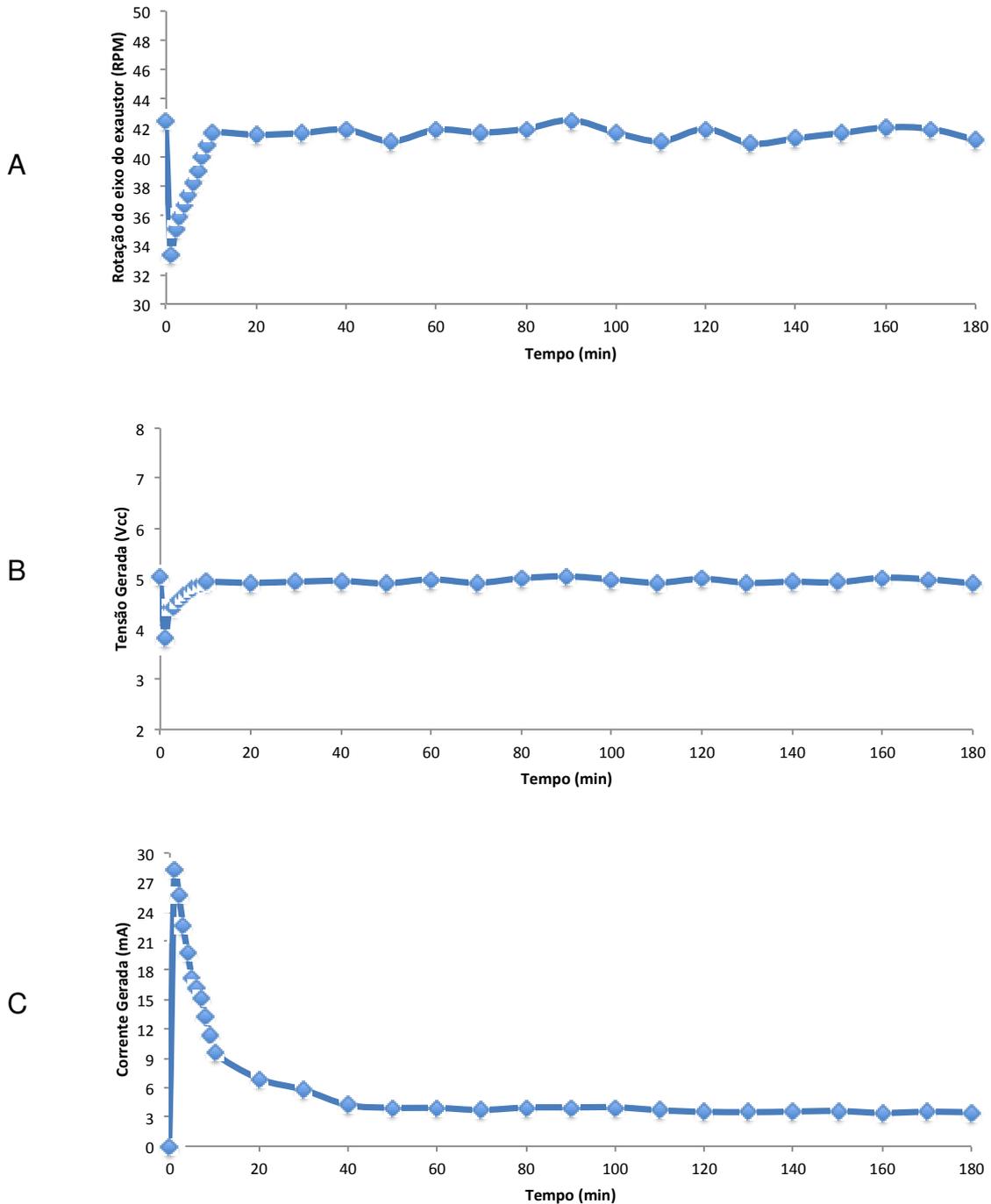


Figura 48 - Medições do dispositivo em função do tempo de: (A) Rotação do eixo do exaustor; (B) Tensão gerada; (C) Corrente elétrica gerada.

No terceiro teste, foi ligado o diodo no polo positivo do gerador, permitindo a passagem da energia gerada à bateria e, ao mesmo tempo, não deixando que a mesma retornasse ao gerador. A velocidade do vento aplicada foi de 17,2 km/h, e os níveis de corrente nos pontos iniciais foram menores, atingindo o máximo de 8,54 mA, contra 28,31 mA do circuito sem proteção. A Figura 49 mostra os dados coletados para rotação (A), tensão (B) e corrente (C), todos em relação ao tempo de operação.

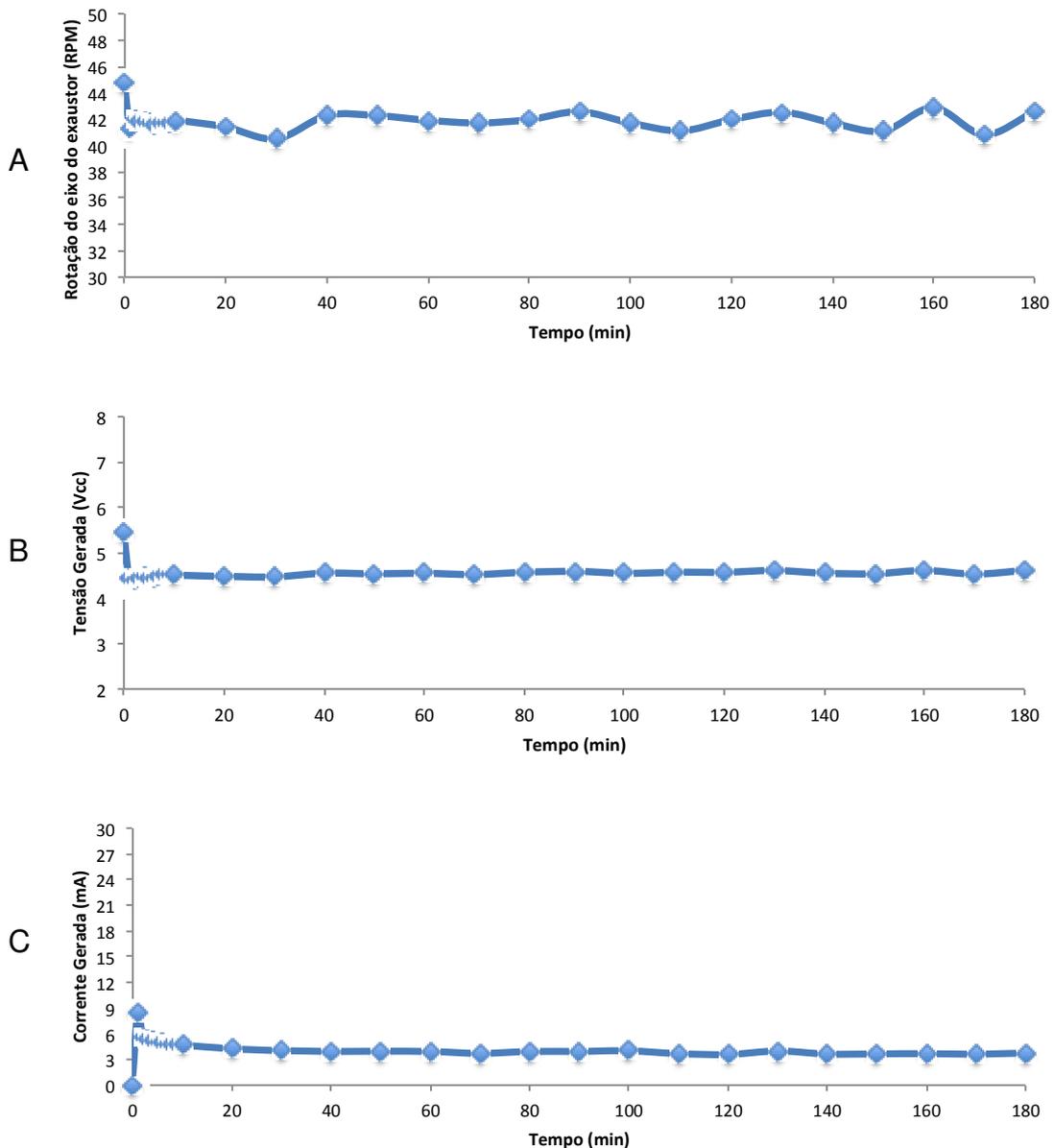


Figura 49 - Medições do dispositivo com diodo em função do tempo de: (A) Rotação do eixo do exaustor; (B) Tensão gerada; (C) Corrente elétrica gerada.

Após a carga da bateria, foram realizadas medições para verificar o comportamento da descarga da bateria sem geração simultânea. Para isso, a bateria foi removida do circuito e ligada em um conjunto de 5 lâmpadas LED. A Figura 50 mostra a queda de tensão da bateria ligada a carga ao longo do tempo.

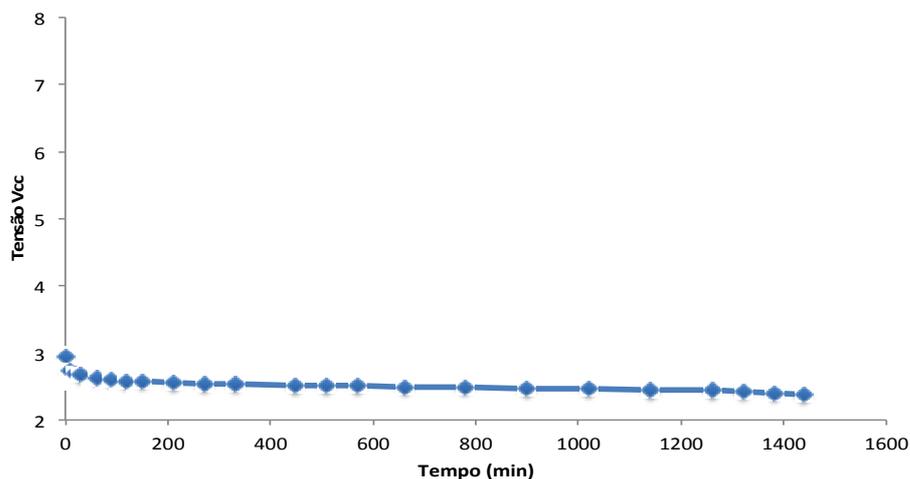


Figura 50 - Queda de tensão da bateria comparada pelo consumo das lâmpadas LED.

O conjunto de baterias conseguiu fornecer potência suficiente para que as lâmpadas LED permanecessem acesas durante 1470 minutos. Destaca-se que o tempo de fornecimento de energia das baterias será inversamente proporcional à potência da carga ligada ao sistema, ou seja, quanto maior a carga, menor o tempo de fornecimento de energia.

Também foram ligados ao DETE o conjunto de baterias e as lâmpadas LED (que servem como carga) para realização das medições da tensão e corrente produzida, além da rotação do gerador, conforme mostrado na Figura 51. As baterias, no início do teste, estavam com uma carga de 2,12 Vcc e enquanto o sistema estava girando com uma rotação constante próxima a 1600 RPM, a tensão média foi de 2,85 Vcc, o que foi suficiente para acender as lâmpadas LED e recarregar o conjunto de baterias.

A aquisição de dados durou 520 minutos, sendo que, destes, 490 minutos foram com o exaustor gerando energia elétrica com velocidade média de 1600 RPM, e nos últimos 30 minutos o sistema deixou de gerar energia para verificar a queda de tensão da bateria.

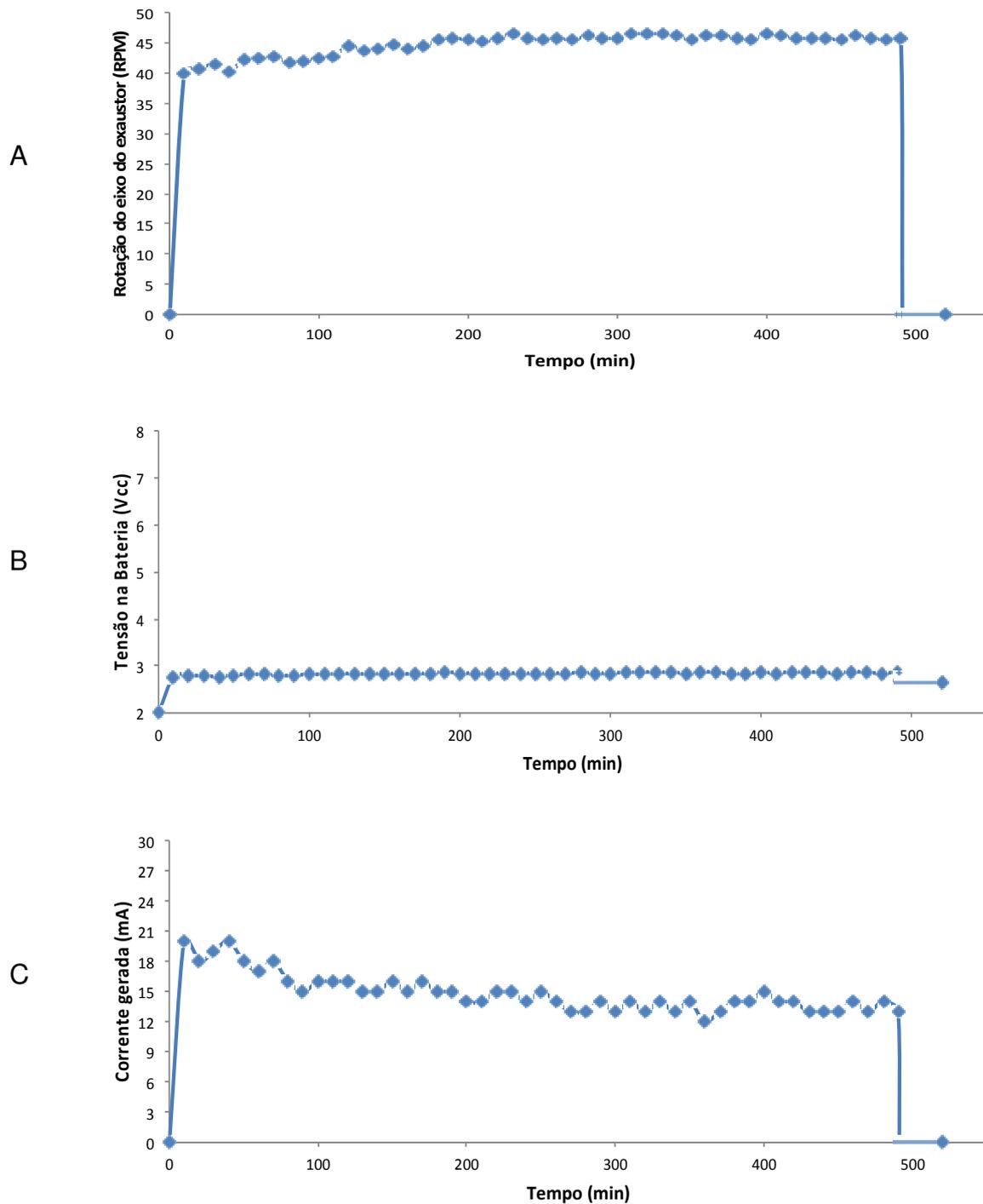


Figura 51 - Dados coletados do DETE com bateria e lâmpadas LED em função do tempo em relação a: (A) Rotação do eixo do exaustor; (B) Tensão gerada; (C) Corrente elétrica gerada.

A carga gerada pelo DETE foi suficiente para manter as lâmpadas LED acesas por 15 minutos, pois após este tempo eles começaram a perder a intensidade do brilho e após 30 minutos os mesmos se apagaram.

4.2.1 PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO

O planejamento do experimento foi realizada somente para o protótipo 5, considerando cinco diferentes velocidades de vento, sendo 10,5 km/h, 12,5 km/h, 14 km/h, 17 km/h e 18,8 km/h, com 7 observações para cada um dos níveis, resultando num teste com poder de aproximadamente 98%.

O primeiro passo foi apresentar o *boxplot* das variáveis, como mostra a Figura 52.

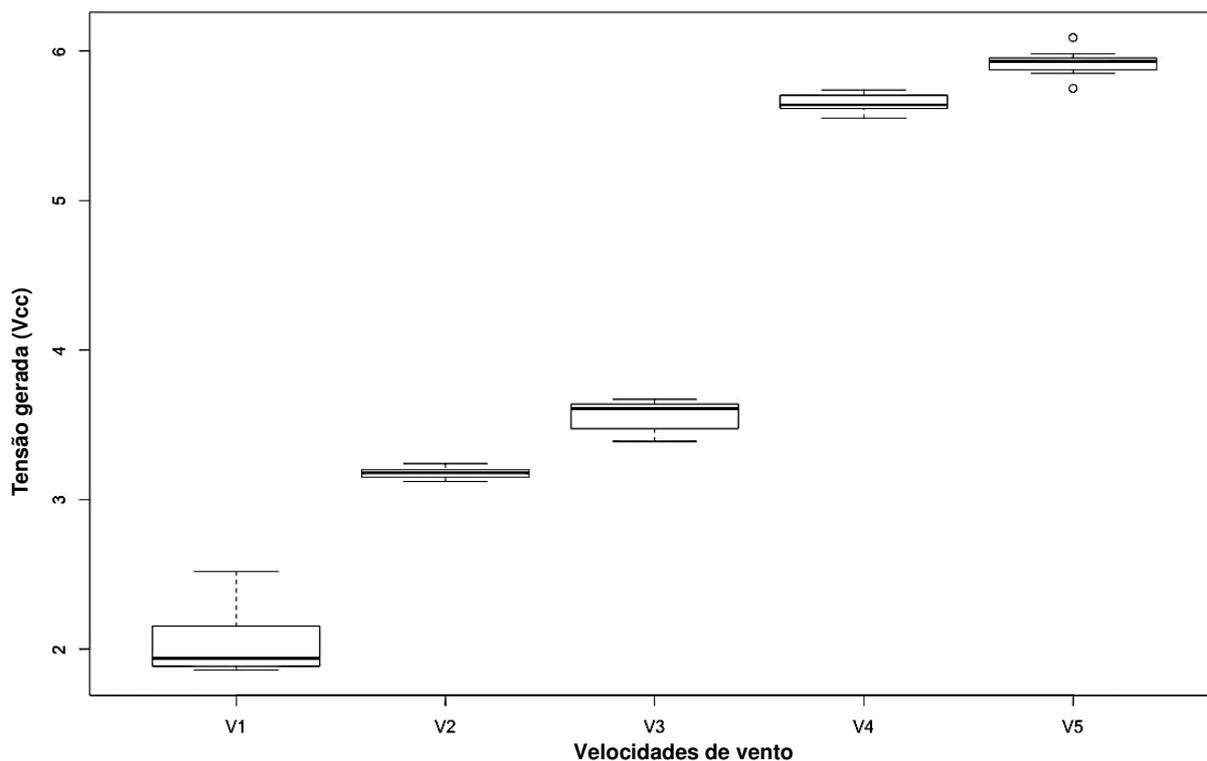


Figura 52 - Boxplot dos dados do protótipo 5.

Neste gráfico, as variáveis V1, V2, V3, V4 e V5 representam as diferentes velocidades do vento consideradas. Nota-se que, na velocidade mais elevada, os valores das tensões geradas são os mais elevados, com a média próxima de 6 Vcc. Observa-se também que a dispersão é mais elevada para a menor velocidade do vento.

Após a realização do boxplot, foi feita uma análise de variância, ou termo em inglês, *Analysis of Variance* (ANOVA), e o resultado para os dados amostrais são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Dados amostrais da ANOVA.

Fontes de Variação	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Estatística F	P-valor da estatística F
Tratamentos	77,241	4	19,310	1048,982	0,000
Resíduos	0,552	30	0,018		
Total	77,793	34			

A partir dessa tabela, nota-se que a hipótese nula (diferentes velocidades de vento geram a mesma potência de energia elétrica) de que todas as médias são iguais é fortemente rejeitada, pois o p-valor (probabilidade da hipótese nula ser verdadeira) foi igual a zero. Para a análise em questão a distância na Equação 11, usando $t_{0,005;30}$, é dada por:

$$MDS = 2,75 \sqrt{\frac{2.0,018}{7}} = 0,199 \quad \text{Equação 11}$$

Ou seja, qualquer par de tratamentos que possua uma diferença, em módulo, superior a 0,199, representará uma diferença de médias significativa. Os resultados foram demonstrados na Tabela 3.

Tabela 3 - Resultados do teste MDS para protótipo 5.

Tratamentos	Diferença	Superior ao limite
1 e 2	1,120	Sim
1 e 3	1,500	Sim
1 e 4	3,596	Sim
1 e 5	3,861	Sim
2 e 3	0,380	Sim
2 e 4	2,476	Sim
2 e 5	2,741	Sim
3 e 4	2,096	Sim
3 e 5	2,361	Sim
4 e 5	0,266	Sim

Finalizando a análise estatística, foi feito o diagnóstico dos resíduos, utilizando o teste de *Shapiro-Wilk*, no software R, que verifica a normalidade dos resíduos para averiguar se o teste é válido. Este teste, ainda usando 1% de significância, não rejeita

que os resíduos possuem distribuição normal. Isto valida a análise estatística realizada anteriormente.

Diante dos resultados apresentados nos testes empíricos, comprova-se que todos os protótipos geraram energia, porém o único que conseguiu produzir 5 Vcc foi o protótipo de número cinco. Para comprovar sua eficácia, foi realizado um planejamento de experimento que comprovou estatisticamente que quanto maior a velocidade em que o gerador gira, maior é a tensão gerada.

5 CONCLUSÕES

Com base no problema de pesquisa, nos objetivos traçados, no referencial teórico, na metodologia e no planejamento de experimento, destacam-se as seguintes conclusões:

1. O DETE desenvolvido mostrou-se capaz de gerar e armazenar energia por meio do movimento mecânico do exaustor eólico causado pela energia do vento.
2. Com relação aos protótipos construídos, o que apresentou o melhor resultado foi o de número 5, porque conseguiu gerar uma potência maior com a mesma intensidade da corrente de ar.
3. A inclusão do retificador de tensão ao dispositivo eletromecânico permitiu o armazenamento de energia em uma bateria com tensão estável.
4. Por apresentar um melhor resultado, realizou-se um planejamento de experimento com protótipo 5, comprovando estatisticamente que, quanto maior a velocidade do vento, maior foi a energia gerada pelo DETE. Foi encontrada relação direta entre a velocidade do eixo do gerador e a tensão produzida. Este fator foi de $0,0033 \text{ Vcc} / \text{RPM}$ indica que, quanto maior a relação da transmissão, ou quanto maior for a velocidade do vento, mais energia elétrica será gerada.
5. O dispositivo desenvolvido permitiu a geração de energia elétrica a partir da conversão eólica / mecânica, que vem contribuir com as questões voltadas às energias renováveis e limpas.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Considerando a construção mecânica e as características do dispositivo, após o término dos testes, notou-se que o sistema gera tensão suficiente para acender as lâmpadas LED ou para carregar o conjunto de baterias de 4,8 Vcc; porém não

consegue realizar as duas funções ao mesmo tempo, de forma eficiente. Para isso, seria necessário um sistema que gerasse pelo menos 8,0 Vcc, sendo que, 4,8 Vcc seria para carregar as baterias e 3,2 Vcc para alimentar as lâmpadas LED.

Portanto, como próximos trabalhos, poderão ser testados, no exaustor eólico:

- Vento de 18 km/h, que permitirá uma rotação próxima a 45 RPM. Utilizando uma redução de 1/55, espera-se uma rotação do gerador da ordem de 2475 RPM, que gerariam aproximadamente 8,15 Vcc, atendendo a ambos os sistemas;
- Otimização do circuito elétrico com relação a perdas e manutenção de potência, retificador de onda completa;
- Análise de circuitos visando avaliar a resistência líquida da carga;
- Verificar o comportamento da associação de geradores / exaustores, quando ligados em série, obtenção de uma maior tensão, e em paralelo para aumento da corrente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Brasília: Aneel, 2008.

BLOK, V.; LONG, T. B.; GAZIULUSOY, A. I.; CILIZ, N.; LOZANO, R.; HUISINGH, D.; CSUTORA, M.; BOKS, C.. **From best practices to bridge for a more sustainable future: advances and challenges in the transition to global sustainable production and consumption**. *Journal of cleaner production*, 108, 19 - 30, 2015.

BURTLESS, G.. **The "Great Recession" and redistribution: Federal antipoverty policies**. *Fast Focus Magazine*, 4, 2009.

CAGNO, E.; PORTILLA, A. R.; TRIANNI, A.. **Linking energy efficiency and innovation practices: Empirical evidence from the foundry sector**. *Energy Policy*, 83, 240 - 256, 2015.

CCEE - Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. **Fontes**. [online]: http://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/onde-atuamos/fontes. Acessado em: Novembro, 2015.

CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito. **Atlas do potencial eólico brasileiro**. Brasília, 2001.

CBEE - CENTRO BRASILEIRO DE ENERGIA EÓLICA. [online]: <http://www.eolica.com.br>. Acessado em: Maio, 2015.

CERVO, A. L.; BERVIAN, P. A.. **Metodologia Científica**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2002.

CNI - CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **A Indústria de Máquinas na era da economia verde**. Brasília, DF: CNI, ABIMAQ, 2012.

ELKINGTON, J. **Cannibals with forks: the triple bottom line of the 21st century**. *New Society Publishers*, Stoney Creek, 1998.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Nacional de Energia 2030**. Brasília: MME: EPE, 2007.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2014: Relatório Final - Ano Base 2013**. Rio de Janeiro, 2014.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2015: Relatório Final - Ano Base 2014**. Rio de Janeiro, 2015.

FAVERA, A.C.D. **Potencial eólico no rio grande do sul – distribuição estatística dos ventos na região central do estado**. *Revista Geografia Acadêmica*, 6, 1, 2012.

FURNAS - Sistema Furnas de geração e distribuição de energia. **Usina hidroelétrica - Geração.** [online]: http://www.furnas.com.br/hotsites/sistemafurnas/usina_hidr_funciona.asp. Acessado em: Janeiro, 2016.

GIL, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa.** São Paulo: Atlas, 1996.

GOLDEMBERG, J. **The promise of clean energy.** *Energy Policy*, 34, 2185-2190, 2006.

GÖRGÜLÜ, S.; Ekren, N.. **Energy saving in lighting systems with fuzzy logic controller witch use light-pipe and dimmable ballast.** *Energy and Buildings*, 61, 172 - 176, 2013.

GUTOWSKI, T. G.; , ALLWOOD, J. M.; HERRMANN, C.;SAHNI, S.. **A Global Assessment of Manufacturing Economic Development, Energy Use, Carbon Emissions, and the Potential for Energy Efficiency and Materials Recycling.** *Annual Review of Environment and Resources*, 38, 81-106, 2013.

GWEC - *Global Wind Energy Council.* **Global Wind Energy Outlook 2008.** 2008.

HADDAD, J.; MARTINS, A. R. S.; MARQUES, M.. **Conservação de energia: eficiência energética de instalações e equipamentos.** Itajubá, MG: FUPAI, 2001.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J.. **Fundamentos de física**, volume 1: mecânica. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

HELJO, P. S.; LI, M.; LILJA, K. E.; MAJUNDAR, H. S.; LUPO, D.. **Printed half-wave and full-wave rectifier circuits based on organic diodes.** *IEEE Transactions on Eletron Devices*, 60, 2, 2013.

HONDA. **Together for tomorrow - 2015 Sustainability report.** [online]: <http://www.honda.com.br/relatoriosocial/relatorio/>. Acessado em: Maio, 2016.

HOUSSAIN, M.; ALI, M.H.. **Future research directions for the wind turbine generator system.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49,481-489, 2015.

IAEA - International Atomic Energy Agency. **The Fukushima Daiichi Accident - Report by the director general.** Austria, 2014.

IEA - International Energy Agency. **Technology Roadmap - Hydropower**, 2012.

IEA - International Energy Agency. **Key World Energy Statistics OECD/IEA**, 2013.

IEA - International Energy Agency. **Energy balances of non-OECD countries**, 2015a.

IEA - International Energy Agency. **Energy balances of OECD countries**, 2015b.

IEA - International Energy Agency. **Key electricity trends excerpt from.** 2015c.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis.** 1ª ed. Cambridge: Cambridge University Press, 3-29, 2013.

- ISHIGURO, Y.. **A energia nuclear para o Brasil**. São Paulo:MAKRON Books, 2002.
- KHALILI, J. A.. **The birth of the electrical machines**. *Philosophical transaction A*, 373, 2039, 2015.
- KHAN, N.; SU, Y.; RIFFAT, S. B.;BIGGS, C.. **Performance testing and comparison or turbine ventilators**. *Renewable Energy*, 33, 2441-2447, 2008.
- LALOND, D. E.; ROSS, J.A.. **Princípios de dispositivos e circuitos eletrônicos**, volume 1. São Paulo: Makron Books.
- LAZOS, D.; SPROUL, A. B.; KAY, M.. **Optimisation of energy management in commercial buildings with weather forecasting inputs: A review**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 587 - 603, 2014.
- LEE, D.; CHENG, C.. **Energy saving by energy management systems: A review**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 760 - 777, 2016.
- MIKI, A. J.. **Avaliação do ciclo de vida de sistema FV em comunidade isolada do estado do Amazonas**. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste. 2015.
- MOHEDANO, J. G. C.; BERNARDELLO, R.; CABEZA, J. A. S.; FERNANDEZ, A. C. R.; Rodriguez, R. A.; CRUZADO, A.. **Thermal impact from a thermoelectric power plant on a tropical coastal Lagoon**. *Water Air Soil Pollut*, 226, 2202, 2015.
- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C.. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. Rio de Janeiro: LTC. 2013.
- MÜLLER, E.; POLLER, R.; HOPF, H.; KRONES, M.. **Enabling Energy Management for Planning Energy-Efficient Factories**. *Procedia CIRP*, 7, 622 - 627, 2013.
- OCDE - ORGANIZAÇÃO PARA COOPERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO. **Electricity Generation**. Disponível em: <https://data.oecd.org/energy/electricity-generation.htm>. Acesso em: Maio, 2015.
- ONU - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future**. Genebra; 1987.
- PASSOS, P.. **A conferência de Estocolmo como ponto de partida para a proteção internacional do meio ambiente**. *Revista direitos fundamentais & democracia*, 6, 2009.
- PEREIRA, G. M.; CAMACHO, C. F.; FREITAS, M. A. V.; SILVA, N, F.. **The renewable energy market in Brazil: Current status and potential**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 3786 - 3802, 2012.
- REIS, L. B.; CUNHA, E. C. N.. **Energia elétrica e sustentabilidade: aspectos tecnológicos, socioambientais e legais**. Barueri, SP: Manole, 2006.

RIETBERGEN, M. G.; KORNELIS, B.. **Setting SMART targets for industrial energy use and industrial energy efficiency.** *Energy Policy*, 38, 4339-4354, 2010.

SCHEPPER, E.; PASSEL, S. V.; LIZIN S.. **Economic benefits of combining clean energy technologies.** *International journal of energy research*, 39, 1109-1119, 2015.

SCHNEIDERMAN, S.; JOHNSON, R. W.; MENKHAUS, T. J.; GILCREASE, P. C.. **Quantifying second generation ethanol inhibition.** *Bioresource Technology*, 179, 219 - 226, 2015.

SEVERINO, A. J.. **Metodologia do trabalho científico.** 23. ed. rev. e atual São Paulo: Cortez, 2007.

SHISHEBORI, D.; AKHGARI, M. J.; NOOROSSANA, R.; KHALEGUI, G. H.. **An efficient integrated approach to reduce scraps of industrial manufacturing processes: a case study from gauge measurement tool production firm.** *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 76, 831 - 855, 2015.

SILVA, R.. **Energias renováveis.** Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego. Boletim [1981-6197], 1, 1, 35, 2010.

SILVA, J. C. M.. **Geradores Elétricos para Aproveitamentos de Energias Renováveis.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de computadores) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 2008.

SUN, Z.; Zhou, X.. **To save money or to save time: Intelligent routing design for plug-in hybrid electric vehicle.** *Transportation research part D*, 43, 238 - 250, 2016.

TEYMOURFAR, R.; ASAEI, B.; EINI, H. I.; NEJATI, R.. **Stationary super-capacitor energy storage system to save regenerative braking energy in a metro line.** *Energy Conversion and Management*, 56, 206 - 214, 2012.

TOLMASQUIM, M.; GUERREIRO, A.; GORINI, R.. **Matriz energética brasileira: uma prospectiva.** Novos Estudos - CEBRAP, São Paulo, 79, 47 - 69, 2007.

UNDP - United Nation Development Programme. **World Energy Assessment: Overview 2004 Update.** 2004.

UNEP - United Nations Environment Programme. **CCCC Kick the habit: A Un Guide to Climate Neutrality.** 2008.

WALKER, M.; SAFARI, I.; THEREGOWDA, R. B.; HSIEH, M. K.; ABBASIAN, J.; ARASTOPOUR, H.; DZOMBAK, D. A.. **Economic impact of condenser fouling in existing thermoelectric power plants.** *Energy*, 44, 429 - 437, 2012.

YANG, H.; ZHENG, G.; LOU, C.; AN, D.; BURNETT, J.. **Grid-connected building-integrated photovoltaics: a Hong Kong case study.** *Solar Energy*, 76, 55-59, 2004.

ZHANG, F.; THANAPALAN, K.; PROCTER, A.; CARR, S.; MADDY, J.; PREMIER, G.. **Power management control for off-grid solar hydrogen production and utilization system.** *International Journal of Hydrogen Energy*, 38, 4334-4341, 2013.