

**ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**DESENVOLVIMENTO DE ALTERNATIVAS DE BAIXO CUSTO PARA A
CONVERSÃO DE ENERGIA EÓLICA EM ENERGIA ELÉTRICA**

Fernando Meneses Camacho

São Paulo
2010

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**DESENVOLVIMENTO DE ALTERNATIVAS DE BAIXO CUSTO PARA A
CONVERSÃO DE ENERGIA EÓLICA EM ENERGIA ELÉTRICA**

Trabalho de formatura apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Graduação em Engenharia

Fernando Meneses Camacho

Orientador: Edilson Tamai

Área de concentração:
Engenharia Mecânica

São Paulo
2010

FICHA CATALOGRÁFICA

Camacho, Fernando Meneses
Desenvolvimento de alternativas de baixo custo para a conversão de energia eólica em energia elétrica / F.M. Camacho. – São Paulo, 2011.
102 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

**1. Conversão eletromecânica de energia 2. Energia eólica
3. Vibrações 4. Vigas I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II. t.**

RESUMO

O presente trabalho trata do desenvolvimento de uma alternativa não convencional e de baixo custo para a conversão de energia eólica em energia elétrica, se utilizando das piezo-cerâmicas como gerador e do fenômeno das vibrações induzidas por vórtices como força motriz. A pesquisa bibliográfica realizada mostrou que existe um nicho para sistemas alternativos de conversão de energia elétrica de baixa potência, a partir da vibração do meio ambiente, para a alimentação de sistemas micro eletromecânicos (MEMS). A alternativa proposta está inserida dentro deste nicho, denominado “energy harvesting”. O estudo é focado na realização da análise de sensibilidade dessa alternativa, a qual irá determinar parâmetros iniciais para o dimensionamento preliminar e na estimativa inicial do desempenho do dispositivo, com base na corrente, voltagem e potência geradas. Para tanto, são utilizadas rotinas matemáticas baseadas em equações obtidas na literatura. Como principal conclusão do trabalho está a relação dos parâmetros do projeto, tais como dimensões do gerador, com o desempenho deste.

ABSTRACT

This paper deals with the development of a non-conventional low cost alternative for conversion of wind energy into a useful form of energy, such electricity, using a piezoelectric generator and vortex induced vibration as a driving force. The literature review performed revealed that there is a niche for alternative low power electric energy conversion from environment vibration to power microelectromechanical systems (MEMS). The proposed alternative belongs to this niche, known as energy harvesting. The study is focused on the realization of the alternative's sensitivity analysis, which will determine initial parameters for the preliminary design and initial estimate of device's performance, based on current, voltage and power generated. For this purpose, mathematical routines based on equations obtained from literature are used. A main conclusion from the work is the relationship of design parameters such as the generator's size with its performance.

SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	OBJETIVOS	5
3.	ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA DO PROBLEMA	6
3.1.	Sistema eólico	6
3.2.	Especificação de saída comparativa	7
4.	MATRIZ DE DECISÃO	9
4.1.	Determinação dos critérios de projeto	9
4.2.	Critérios funcionais	10
4.2.1.	Potência máxima a ser extraída do vento	10
4.2.2.	Eficiência do rotor	10
4.2.3.	Qualidade da energia	11
4.3.	Critérios operacionais	11
4.3.1.	Sistemas de controle	11
4.3.2.	Impactos no meio ambiente	12
4.4.	Critérios construtivos	13
4.4.1.	Custo	13
4.4.2.	Processos de fabricação	13
4.5.	Critério de inovação	14
4.6.	Atribuição de notas ao desempenho de determinada alternativa e pesos aos critérios	14
4.7.	Escolha da melhor alternativa pela matriz de decisão	18
5.	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	20
5.1.	Solução analítica para o modelo de um energy harvester piezelétrico com configuração Bimorph	20
5.2.	Modelo do vento	27
5.2.1.	O comportamento do vento próximo ao solo	28
5.2.2.	O comportamento turbulento do vento	28
5.2.3.	O vento geostrófico	29

5.2.4.	Predição do regime do vento	30
5.2.5.	A distribuição de Weibull aplicada ao comportamento do vento.....	31
5.2.6.	O atlas do potencial eólico brasileiro.....	32
5.2.7.	A lei logarítmica de Prandtl	32
5.3.	Vibrações induzidas por vórtices em escoamento em torno de um cilindro ...	33
5.4.	Determinação da frequência natural de um cilindro.....	35
6.	RESULTADOS	36
6.1.	Metodologia proposta	36
6.2.	Parâmetros utilizados	39
6.2.1.	Autovalores das frequências de ressonância.....	39
6.2.2.	Material piezelétrico utilizado e substrato.....	39
6.2.3.	Estimativa do amortecimento estrutural	40
6.3.	Análise de sensibilidade	40
6.3.1.	Variação da relação base – comprimento da viga mantendo o volume fixo	41
6.3.2.	Variação da relação base – espessura da viga mantendo o volume fixo .	44
6.3.3.	Variação da relação largura – espessura da viga mantendo o volume fixo	47
6.3.4.	Variação do volume de material piezelétrico do gerador	50
6.3.5.	Variação da resistência ligada ao gerador piezelétrico.....	52
6.4.	Dimensionamento do gerador piezelétrico.....	55
6.4.1.	Estimativa da intensidade dos ventos	55
6.4.2.	Estimativa das dimensões da estrutura de coleta da energia eólica	58
6.4.3.	Determinação do termo forçante	59
6.5.	Desempenho do dispositivo	60
7.	CONCLUSÕES E DISCUSSÕES	63
7.1.	Discussões.....	63
7.2.	Conclusões	64
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67
ANEXO A		
ANEXO B		
ANEXO C		

1. INTRODUÇÃO

1.1. “Energy harvesting”

Segundo SHEN (2009), com os recentes avanços dos MEMS (Microelectromechanical Systems), estes passaram a ser empregados como eletrônicos portáteis e sensores “wireless” devido às suas vantagens sobre os aparelhos que utilizam fios. Essas vantagens são o menor tamanho, maior flexibilidade, menor consumo energético, etc.

As desvantagens dos MEMS advêm da sua dependência de baterias, o que acarreta em problemas tais como:

- Enquanto sensores, transdutores e outros aparelhos eletrônicos tem sido miniaturizados, o tamanho e peso da bateria ainda se mantém elevados, limitando a diminuição do MEMS;
- As baterias apresentam limitada carga e vida útil, materiais nocivos ao meio ambiente, elevada razão massa/carga elétrica, etc;
- As baterias podem terminar sua vida de modo repentino, e sua troca pode ser trabalhosa ou impossível, caso o MEMS esteja localizado em estruturas de difícil acesso.

Assim, existe a necessidade de se utilizar fontes externas de geração de energia, com o objetivo de substituir as baterias ou, pelo menos, aumentar a vida útil desta. Diante dessa necessidade, o ramo energético do “energy harvesting” torna-se promissor e viável.

O conceito do “energy harvesting” consiste de processos de captura de energia não aproveitada do meio ambiente, tais como ruídos e vibrações, e conversão desta em energia elétrica a ser utilizada. O “energy harvesting”, como conclui em seu trabalho ERTURK (2009), embora não tenha o impacto na redução da demanda

energética mundial, tem potencial para reduzir a dependência das baterias química principalmente em aparelhos como os MEMS.

Dentro do nicho do “energy harvesting” proposto, estão os balões meteorológicos, que pela altura atingida em voo tem disponíveis ventos de elevadas velocidade, que podem ser aproveitados para a alimentação de seus sensores, além de balões publicitários.

1.2. Predição das condições meteorológicas

Segundo FERREIRA e JUNIOR (2002), devido aos prejuízos materiais e de vidas humanas cujas causas são fenômenos atmosféricos, muitos recursos têm sido investidos à meteorologia em todos os países do mundo, tanto para o desenvolvimento da previsão do tempo quanto para climatologia, com o objetivo de reduzir ou até evitar tais danos.

Dois conceitos aparecem na meteorologia: tempo e clima. Enquanto o primeiro é uma previsão diária do estado da atmosfera, o clima corresponde a uma generalização das condições do tempo para um determinado período e região. Para a previsão tanto do tempo quanto do clima é necessário grande quantidade de dados, que provem de estações meteorológicas, imagens de satélite, radar, etc. Os dados coletados são então processados em supercomputadores, que permitem a utilização de modelos complexos preditivos do tempo de até 6 dias.

Os balões meteorológicos são classificados como estações meteorológicas de altitude, destinada a determinar a estrutura vertical da atmosfera com o auxílio de radiosondas, que consiste de um transmissor de rádio e de sensores de temperatura, umidade e pressão. O site “The Weather Doctor” estima que cerca de 1100 balões sejam lançados no mundo sincronizados nos horários de 00:00 e 12:00. Os dados coletados no voo são compilados e distribuídos mundialmente para a confecção de mapas eólicos, análises e previsão do tempo.

O balão com a radiossonda é lançado na atmosfera e atinge altitudes de até 40 km, onde continuamente transmite as informações coletadas a um receptor na estação. Após atingir determinada altitude, o balão estoura e o equipamento aciona um paraquedas que protege o equipamento da queda e este pode ser recuperado para futuras medições.



Figura 1 – Lançamento de balão meteorológico, extraído do site “Dados meteorológicos”.

O lançamento de balões é caro, o que explica o reduzido numero de lançamentos diários. A utilização de balões cativos é uma alternativa a essa dificuldade. Dotado com aparelho de “energy harvesting”, pode atingir autonomia em sua operação.

1.3. Descrição do presente trabalho

O presente trabalho busca apresentar uma alternativa dentro do nicho do “energy harvesting” que aproveite a energia eólica. Para tanto, utilizando a metodologia do prof. Kaminski para desenvolvimento de projetos, algumas alternativas são geradas pela combinação das variações de subsistemas de um

gerador eólico, os quais são descritos por CARVALHO (2003), até que se apresentem alternativas possíveis de serem construídas. Em seguida, é escolhida uma solução que se mostre a melhor dentre as propostas através da matriz de decisão cujos parâmetros de avaliações são propostos pelo prof. Kaminski e fundamentados nos livros de CARVALHO (2003) e PATEL (2006).

Obtida a melhor solução proposta, a qual consiste de um gerador piezelétrico, é feito o dimensionamento preliminar do protótipo com base no trabalho de ERTURK (2009), o qual apresenta um método analítico para resolver o problema de uma viga piezelétrica com configuração bimorph, isto é, duas finas lâminas de piezo-cerâmicas envolvendo uma camada de substrato com função apenas estrutural. Com base nesse trabalho, um estudo de sensibilidade das dimensões geométricas é feito com objetivo de determinar as dimensões que garantam um máximo de geração de potência. Tomadas as dimensões ótimas do gerador, o receptor será dimensionado em função da frequência de vibração de ressonância da viga, a qual é a condição de máxima geração do dispositivo, com base nos trabalhos de FUJARRA (2002) e KITAGAWA (1997), os quais estudam o fenômeno das vibrações induzidas por vórtices (VIV), fonte da excitação do “energy harvesting” proposto. Desses trabalhos serão extraídas as dimensões do coletor e a amplitude de ressonância.

Definido o procedimento do projeto, as saídas do gerador são avaliadas para o caso de exploração da energia eólica em elevadas altitude no estado de São Paulo. Para tanto, a velocidade média do vento é avaliada aproximando seu regime a uma distribuição de Weibull, conforme proposto por MAINIERI (2005), Patel (2006) e PINHEIROS (2009) e os parâmetros extraídos do atlas eólico desenvolvido por AMARANTE et al (2001) em conjunto com a hipótese da camada limite de Prandtl, conforme propôs MARTINS (2008).

O trabalho é concluído com os gráficos das saídas do gerador piezelétrico, discussões dos desvios devido às hipóteses utilizadas e principais conclusões deste texto.

2. OBJETIVOS

O presente trabalho de formatura tem como objetivo propor um dispositivo de geração de energia elétrica a partir da energia eólica e estimar as seguintes grandezas geradas, em função da sua geometria:

- Potência;
- Voltagem;
- Corrente.

Após realizar as estimativas, será feito o desenho de conjunto da solução proposta e análises de otimização do sistema.

3. ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA DO PROBLEMA

Segundo a metodologia do profº Kaminski, antes de se criar alternativas, é necessário que o problema abordado seja formulado com precisão suficiente e que as características técnicas do problema estejam especificadas adequadamente. Essa especificação será o conjunto de requisitos funcionais, operacionais e construtivos atendido pelo produto.

Assim, nesse capítulo, será feita essa especificação técnica, que servirá como suporte para a criação de alternativas de baixo custo ao problema da geração não convencional de energia elétrica a partir da energia eólica.

3.1. Sistema eólico

Segundo ALDABÓ (2002), os principais componentes de um sistema eólico autônomo são:

- Rotor;
- Transmissão;
- Controle;
- Conversor;
- Sistema de armazenamento.

A Figura 2 mostra a configuração básica.

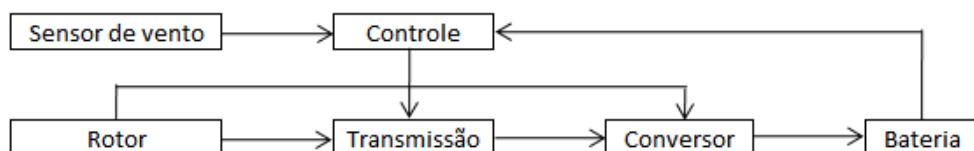


Figura 2 – Diagrama de bloco de um sistema eólico, extraído do livro de CARVALHO (2003).

- O rotor tem a função de captar a energia cinética dos ventos e convertê-la em energia mecânica.
- A transmissão transmite a energia mecânica do rotor até o gerador.
- O conversor converte a energia mecânica em elétrica.
- O sistema de controle é composto de sensores que retiram informações de diversos pontos do sistema (baterias, vento, etc.), processador e atuadores, que têm a função de garantir o funcionamento equilibrado e seguro do sistema e o melhor aproveitamento possível do vento disponível.
- O sistema de armazenamento é constituído pelas baterias, que tem como função armazenar a energia elétrica produzida.
- Por fim, há a estrutura que irá suportar todo o sistema.

3.2. Especificação de saída comparativa

Uma vez que os balões meteorológicos são recarregados por baterias, será utilizado como parâmetro de comparação de eficiência do dispositivo a recarga de uma pilha.

Para o modelo de pilha recarregável, será escolhida a pilha de níquel-metal híbrido, por motivos explicados em capítulo posterior. O tamanho dessa pilha será AA, o tipo mais comum empregado em diversos aparelhos. As especificações dessa pilha serão tomadas do fabricante, a Duracell. A Tabela 1 apresenta as especificações dessa pilha.

Tabela 1 – Especificação da pilha.

Tipo	NiMH
Fabricante	Duracell
Tamanho	AA
Carga	2000 mAh

Quanto ao processo de carregamento, a especificação será tomada de um fabricante de carregador de pilhas, a Elgin. As especificações do carregamento estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Especificações da recarga da pilha.

Saída	DC
Tensão	2,8 V
Corrente	180 mA

Assim, a carga a ser armazenada em uma pilha corresponde a 7200 C. O tempo necessário para o dispositivo armazenar essa carga será um parâmetro de desempenho.

4. MATRIZ DE DECISÃO

Neste capítulo será feito a escolha de uma alternativa para atender os objetivos propostos. Para tanto, será utilizada a metodologia do profº KAMINSKI (2000). Nessa etapa serão realizadas as seguintes tarefas:

- Determinação dos critérios de projeto;
- Elaboração de alternativas;
- Escolha da melhor solução com o auxílio da matriz de decisão.

4.1. Determinação dos critérios de projeto

“A especificação das características técnicas do projeto será um conjunto de requisitos funcionais, operacionais e construtivos a ser atendido pelo produto” (KAMINSKI, 2000, p.31). O produto será bem sucedido se este atender satisfatoriamente aos requisitos de projeto. Assim, a melhor forma de avaliá-lo para posterior seleção é ponderar suas características utilizando critérios comparativos, representativos dos requisitos a serem atendidos, que, segundo o profº Kaminski, são:

- Funcional;
- Operacional;
- Construtivo.

Aos requisitos citados, propõe-se outro, representativo da intenção desse projeto, que avalia se o projeto é inovador, se ele pode ser considerado distinto do conjunto aerogerador tradicional. Esse novo requisito será denominado inovação.

- Inovação.

4.2. Critérios funcionais

Como critérios funcionais entendem-se as características relativas ao desempenho do produto. Tais critérios podem ser quantificados utilizando indicadores técnicos apresentados nas referências.

4.2.1. Potência máxima a ser extraída do vento

A potência máxima a ser extraída pelos ventos é dada pela eq.(1).

$$P_{MAX} = \frac{1}{2} * 0,59 * \rho * A * V^3 \quad (1)$$

- ρ é a densidade do ar;
- A é a área que entra do conjunto mecânico que irá extrair a potência do vento;
- V é a velocidade do vento;

O fator 0,59 se refere à lei de Betz, que é a máxima relação entre vento de entrada e de saída, o qual constitui um limite teórico a todos os geradores eólicos. A potência dada pela eq.(1) avalia a combinação de dois importantes parâmetros no projeto de gerador eólico, que é a área que estará em contato com o vento e a velocidade com a qual o vento encontra essa área, e representa o limite máximo de produção do gerador.

4.2.2. Eficiência do rotor

A eficiência do rotor é avaliada como a razão da potência que é absorvida pelo rotor e a potência máxima que poderia ser extraída, a qual foi calculada na seção anterior. A eficiência é calculada pela eq.(2):

$$c_p = \frac{(1+\frac{v_o}{v}) * [1 - (\frac{v_o}{v})^2]}{2} \quad (2)$$

- V_o é a velocidade de saída do vento.

4.2.3. Qualidade da energia

Segundo CARVALHO (2003), um problema de qualidade de energia pode ser definido como qualquer problema de ordem elétrica que se manifeste em perturbações de tensão, corrente ou frequência e leva a dano, ou operação incorreta do equipamento do usuário.

4.3. Critérios operacionais

Como critérios operacionais entendem-se a facilidade de operação do dispositivo e o impacto que este causa quando em funcionamento.

4.3.1. Sistemas de controle

Todo gerador eólico necessita de sensores e atuadores, comandados por um controle que a cada instante monitore as condições do vento, escolha o melhor modo de operação com base em critérios tais como melhor rendimento, menor carregamento, etc., e execute os procedimentos necessários para atender seus objetivos. Além disso, dependendo das características da alternativa analisada, poderão haver outras condições a serem monitoradas.

Assim, a melhor alternativa, quando comparado em relação ao sistema de controle, será a que necessitar um sistema mais simples e suficiente para atender a todas as necessidades operacionais.

4.3.2. Impactos no meio ambiente

Embora a conversão de energia eólica em elétrica seja considerada uma das mais limpas do mundo, ainda assim os dispositivos que desempenham essa função perturbam o meio, o que é indesejável.

Assim, a melhor alternativa com relação ao impacto com o meio será aquela que causar o menor impacto. Como impacto, serão consideradas os seguintes efeitos:

- Ruídos sonoros: No geral, são duas as fontes de ruídos sonoros em um gerador eólico: de origem mecânica, referente ao conjunto de engrenagens do gerador, e de origem aerodinâmica, que se refere ao escoamento do ar que atravessa o dispositivo e produz sons conhecidos como barulho aerodinâmico. Uma turbina típica de 600 kW produz ruídos de até 55 dB para uma distância de 50 metros. Embora o impacto sonoro desses geradores não seja maior que outros ruídos cotidianos, como mostra a Tabela 3, ainda assim são registradas queixas de moradores que se situam distantes de 1 km de geradores.

Tabela 3 – Nível de ruído de algumas fontes conhecidas, extraído do livro de PATEL (2006).

Noise Levels of Some Commonly Known Sources Compared with Wind Turbine	
Source	Noise Level (dB)
Elevated train	100
Noisy factory	90
Average street	70
Average factory	60
Average office	50
Quiet conversation	30

- Efeitos em pássaros: O conjunto em movimento em geradores eólicos representa um risco para os pássaros que voam na sua proximidade. Estudos realizados mostram que turbinas eólicas instaladas no mar na Dinamarca reduziram de 75 a 90% a população das aves marinhas em 3 anos. Entre os fatores que influenciam as aves está a sucção do rotor, o tamanho do conjunto, que dificulta aos pássaros de perceber o obstáculo e desviar e até o som, que pode atraí-los.

4.4. Critérios construtivos

O aspecto construtivo é o mais relevante nesse projeto devido às restrições econômicas e de fabricação para a construção do protótipo. Como critério construtivo será considerado o custo de construção e os processos necessários para a fabricação.

4.4.1. Custo

O custo para a construção do protótipo é o fator mais crítico desse projeto, não sendo apenas comparativo, mas restritivo. A alternativa menos custosa será a melhor no critério de custo.

4.4.2. Processos de fabricação

Tão importante quanto o custo são os processos de fabricação necessários para a construção do protótipo. As melhores alternativas para esse critério serão as que puderem ser construídas utilizando apenas o ferramental disponível na EPUSP.

Processos a parte tornarão a alternativa pouco atraente e podem até restringir sua construção.

4.5. Critério de inovação

Como critério de inovação, entende-se o quanto diferente do conjunto aerogerador convencional a alternativa proposta está. Assim, quanto mais subsistemas deste a alternativa utilizar, menor será seu desempenho com relação a esse critério.

4.6. Atribuição de notas ao desempenho de determinada alternativa e pesos aos critérios

Cada alternativa proposta será avaliada pelos critérios apresentados de modo comparativo, com notas variando de 0 a 10. As notas recebidas por cada alternativa não influenciam a decisão de escolher determinada solução de maneira igual. Elas dependerão do quanto importante é o critério no projeto, devendo ser, portanto, ponderados. Porém, a escolha das ponderações não é uma tarefa objetiva, sendo muito influenciada pela subjetividade. Para reduzir um pouco o grau de subjetividade, serão ponderados primeiramente os requisitos e sua relevância, tendo em vista a construção do protótipo, e em seguida serão ponderados os critérios de cada requisito. A ponderação será feita de modo conciso e simples, sendo a soma dos pesos dos requisitos igual à unidade e a soma dos pesos dentro de um mesmo requisito também igual a 1, mas o valor do peso do critério em particular igual a multiplicação do peso do requisito e do peso do critério.

Os requisitos de projeto são três:

- Funcionais: representados pelo desempenho;

- Operacionais: representado pela simplicidade e impactos na operação;
- Construtivos: representados pelo custo e facilidade de construção;
- Inovação: representado pelos subsistemas da alternativa.

Dentre essas quatro, o mais importante é o requisito construtivo, pois o objetivo desse trabalho, como já foi exposto, é analisar a viabilidade técnica da solução proposta, e para tanto, a construção do protótipo é essencial. Caso o projeto seja restringido construtivamente, todo o trabalho será inviabilizado.

O segundo aspecto mais importante é a inovação, relacionado com o objetivo do projeto.

O terceiro aspecto é o funcional do equipamento, pois representa a capacidade e a qualidade do produto em atender o problema analisado.

Por fim, o aspecto operacional é o quarto em importância, pois os critérios propostos para esse requisito não são restritivos. Na Tabela 4 estão os pesos atribuídos a cada requisito mencionado.

Tabela 4 – Ponderação dos requisitos.

Requisito	Peso
Funcional	0,2
Operacional	0,1
Construtivo	0,4
Inovador	0,3
Total	1

O atendimento da alternativa ao problema proposto no aspecto funcional é avaliado utilizando os seguintes critérios:

- Potência máxima extraída pelo vento;
- Eficiência do rotor;
- Qualidade da energia.

Dentre os critérios apresentados, o mais importante é a potência máxima extraída pelo vento, pois essa é uma decisão inicial de projeto, sendo a alteração posterior complicada, podendo levar a reformulação do projeto inteiro.

A eficiência do rotor, embora seja essencial, pois representa a energia real absorvida pelo conjunto, que deverá atender a demanda, é mais fácil de tratar, pois esse valor pode ser melhorado com a posterior otimização e um controle adequado.

Por fim, a qualidade de energia, que embora seja fundamental no caso de se alimentar equipamentos sofisticados, para o carregamento de baterias o impacto não é significativo, pela própria simplicidade do processo. Na Tabela 5 estão os pesos atribuídos aos critérios funcionais.

Tabela 5 – Ponderação dos critérios funcionais.

Critérios funcionais	Peso
Potência máxima extraída	0,5
Eficiência do rotor	0,4
Qualidade da energia	0,1
Total	1

Os critérios comparativos dos requisitos operacionais são os seguintes:

- Sistemas de controle;
- Impactos no meio ambiente.

Em geral, o impacto de geradores eólicos no meio ambiente é pequeno e não é restritivo. Na Tabela 6 estão os pesos atribuídos aos critérios operacionais.

Tabela 6 – Ponderação dos critérios operacionais.

Critérios operacionais	Peso
Sistema de controle	0,8
Impacto ao meio ambiente	0,2
Total	1

Os critérios dos requisitos construtivos são:

- Custo;
- Processos de fabricação.

O custo é o principal fator, que afeta diretamente a viabilidade da construção do protótipo. O processo de fabricação tem importância comparável ao custo, mas é menos considerável, pois a maior dificuldade desses processos é o custo, e tal fator já foi considerado no critério custo. Na Tabela 7 estão os pesos atribuídos aos critérios construtivos.

Tabela 7 – Ponderação dos critérios construtivos.

Critérios construtivos	Peso
Custo	0,6
Processos de fabricação	0,4
Total	1

Na Tabela 8 estão apresentados os pesos que serão utilizados na matriz de decisão da melhor alternativa à conversão não convencional da energia eólica em energia elétrica.

Tabela 8 – Ponderação final dos critérios utilizados.

Critério	Peso	Requisito	Peso	Peso final
Funcional	0,2	Potência máxima extraída pelo vento	0,5	0,10
		Eficiência do rotor	0,4	0,08
		Qualidade da energia	0,1	0,02
Operacional	0,1	Sistema de controle	0,8	0,08
		Impacto ao meio ambiente	0,2	0,02
Construtivo	0,4	Custo	0,6	0,24
		Processos de fabricação	0,4	0,16
Inovador	0,3			0,3
		Total		1

4.7. Escolha da melhor alternativa pela matriz de decisão

No anexo A está a metodologia empregada para a geração de alternativa, assim como as alternativas selecionadas para avaliação com a matriz de decisão e notas atribuídas referentes aos critérios adotados. As alternativas propostas estão apresentadas na Tabela 9.

Na Tabela 10 estão as notas atribuídas a cada alternativa em relação aos critérios adotados.

Na Tabela 11 está a matriz de decisão criada, avaliando as alternativas propostas utilizando as ponderações discutidas em seções anteriores.

Tabela 9 – Alternativas propostas.

Subsistemas	1ª Alternativa	2ª Alternativa	3ª Alternativa
Conversão de energia eólica em mecânica	Rotor de 3 pás Eixo horizontal	Rotor de várias pás Eixo transversal	Membrana
Transmissão	Polia e correia	Eixo	Direta
Conversão de energia mecânica em elétrica	Deformação de material Piezelétrico	Gerador de indução	Deformação de material Piezelétrico
Estrutura de suporte	Torre	Fixo ao balão	Fixo ao balão

Tabela 10 – Notas atribuídas às alternativas propostas.

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Potência máxima extraída	10	7,5	4
Eficiência do rotor	10	5	0
Qualidade da energia	0	10	10
Sistema de controle	10	0	0
Impacto ao meio ambiente	0	5	10
Custo	5	2	10
Processos de fabricação	6	3	10
Inovação	7	0	10

Tabela 11 – Matriz de decisão criada para as alternativas propostas.

	Peso	1ª Alternativa	2ª Alternativa	3ª Alternativa
Potência máxima extraída	0,1	10	7,5	4
Eficiência do rotor	0,08	10	5	0
Qualidade da energia	0,02	0	10	10
Sistema de controle	0,08	10	0	0
Impacto ao meio ambiente	0,02	0	5	10
Custo	0,24	5	2	10
Processos de fabricação	0,16	6	3	10
Inovação	0,3	7	0	10
	Nota final	6,86	2,41	7,8

Da Tabela 11, escolhe-se a alternativa 3 para a continuação do projeto.

5. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

5.1. Solução analítica para o modelo de um energy harvester piezelétrico com configuração Bimorph

Os conceitos e formulações apresentados nessa seção são baseados no trabalho de ERTURK (2009). Em seu trabalho é apresentado um método analítico para estimar as grandezas de corrente, voltagem, potência e deslocamento dos pontos da viga. Com esse desenvolvimento é possível reduzir o tempo e custo de operação no dimensionamento, uma vez que se evita a utilização do método dos elementos finitos, como é prática comum nesse ramo, além de eliminar a necessidade da utilização de softwares proprietários, os quais são de difícil acesso.

O modelo físico utilizado está apresentado na Figura 3. O modelo matemático utilizado é baseado na formulação da viga Euler – Bernoulli com parâmetros distribuídos, adicionado um termo forçante relativo ao acoplamento eletromecânico piezelétrico. As equações eletromecânicas acopladas são derivadas da lei de Gauss e das relações constitutivas do material piezelétrico para o estado plano de tensão.

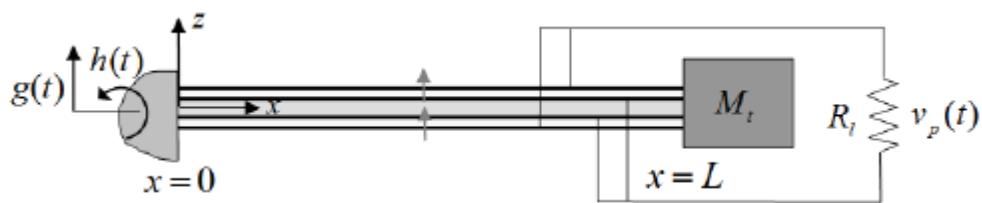


Figura 3 – Modelo físico do energy harvester piezelétrico com configuração bimorph, extraído de ERTURK (2009).

As hipóteses utilizadas no modelo são:

- Energy harvester modelado como uma viga composta uniforme;

- As deformações são assumidas pequenas;
- A estrutura apresenta comportamento elástico linear;
- Perdas mecânicas são representadas por amortecimento interno e externo;
- O amortecimento interno é assumido como proporcional a taxa de deformação;
- O amortecimento externo se deve ao ar e é considerado como um coeficiente de amortecimento separado do amortecimento interno;
- A piezo-cerâmica e as camadas da subestrutura são considerados perfeitamente unidos umas às outras;
- Os eletrodos cobrindo as faces opostas das camadas piezo-cerâmicas são assumidos muito finos quando comparados com a espessura média do energy harvester, de modo que sua contribuição para a espessura total da estrutura é desprezível;
- Os eletrodos são considerados contínuos e perfeitamente condutivos;
- O campo elétrico instantâneo induzido na piezo-cerâmica é assumido uniforme ao longo do comprimento da viga;
- Uma resistência é considerada em circuito juntamente com as capacitâncias internas das piezo-cerâmicas;
- A fuga da corrente é desprezada na formulação do problema.

O deslocamento transversal da viga é dividido em duas parcelas, conforme a eq.(3).

$$w(x, t) = w_b(x, t) + w_{rel}(x, t) \quad (3)$$

- w é o deslocamento transversal do ponto na posição x e no tempo t ;
- w_b é o deslocamento da base, no caso, também a fonte de excitação;
- w_{rel} é o deslocamento transversal da viga relativa ao deslocamento da base.

O deslocamento da base é a combinação da translação com a rotação em dado ponto em dado tempo.

$$w_{rel}(x, t) = g(t) + xh(t) \quad (4)$$

- g é a translação na direção transversal;

- h é a rotação, assumida pequena.

O movimento da viga sujeito a vibrações forçadas é descrito pela equação diferencial parcial apresentada na eq.(5).

$$\frac{\partial^2 M(x,t)}{\partial x^2} + c_s I \frac{\partial^5 w_{rel}(x,t)}{\partial x^4 \partial t} + c_a \frac{\partial w_{rel}(x,t)}{\partial t} + m \frac{\partial^2 w_{rel}(x,t)}{\partial t^2} = -m \frac{\partial^2 w_b(x,t)}{\partial t^2} \quad (5)$$

- $\frac{\partial^2 M(x,t)}{\partial x^2}$ é a segunda derivada do momento fletor;
- $c_s I \frac{\partial^5 w_{rel}(x,t)}{\partial x^4 \partial t}$ é o termo do amortecimento interno da viga devido à taxa de deformação;
- $c_a \frac{\partial w_{rel}(x,t)}{\partial t}$ é o termo do amortecimento externo, devido ao ar;
- $m \frac{\partial^2 w_{rel}(x,t)}{\partial t^2}$ é o termo da aceleração da viga;
- $m \frac{\partial^2 w_b(x,t)}{\partial t^2}$ é o termo da excitação da viga, que é o deslocamento da base.

Conhecidas as razões de amortecimento modal e as frequências naturais de excitação para dois modos distintos de vibrar (por experimentação, por exemplo) os coeficientes de amortecimento são obtidos utilizando a eq.(6).

$$\begin{Bmatrix} c_s I \\ c_a \end{Bmatrix} = \frac{2\omega_j \omega_k}{\omega_j^2 - \omega_{jk}^2} \begin{bmatrix} \frac{YI}{\omega_k} & -\frac{YI}{\omega_j} \\ -m\omega_k & m\omega_j \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \zeta_j \\ \zeta_k \end{Bmatrix} \quad (6)$$

- j e k são os subscritos relativos aos modos de vibrar j e k ;
- ω é a frequência natural;
- YI é a rigidez flexional;
- m é a massa por unidade de comprimento.

A rigidez flexional da viga é estimada pela eq.(7).

$$YI = \frac{2b}{3} \left[Y_{\bar{s}} \frac{h_{\bar{s}}^3}{8} + \bar{c}_{11}^E \left(\left(h_{\bar{p}} + \frac{h_{\bar{s}}}{2} \right)^3 - \frac{h_{\bar{s}}^3}{8} \right) \right] \quad (7)$$

- b é a largura da viga;
- $Y_{\bar{s}}$ e \bar{c}_{11}^E são os módulos de elasticidade do substrato e da piezo-cerâmica submetida a campo elétrico constante, respectivamente;
- $h_{\bar{p}}$ e $h_{\bar{s}}$ são as espessuras do substrato e da piezo-cerâmica, respectivamente.

A massa por unidade de comprimento é calculada pela eq.(8).

$$m = b(\rho_{\tilde{s}} h_{\tilde{s}} + 2\rho_{\tilde{p}} h_{\tilde{p}}) \quad (8)$$

A frequência natural de determinado modo de vibrar é obtida utilizando a eq.(9).

$$\omega_r = \lambda_r^2 \sqrt{\frac{YI}{mL^4}} \quad (9)$$

- λ_r é o auto-valor do modo de vibrar r;
- L é o comprimento da viga.

Os auto-valores são determinados na resolução da eq.(10).

$$1 + \cos \lambda \cosh \lambda = 0 \quad (10)$$

O momento fletor da viga é dado pela eq.(11).

$$M(x, t) = YI \frac{\partial^2 w_{rel}(x, t)}{\partial x^2} + \vartheta v(t) [H(x) - H(x - L)] \quad (11)$$

- $YI \frac{\partial^2 w_{rel}(x, t)}{\partial x^2}$ é o momento fletor resultante das tensões normais na viga em flexão, que é equivalente a rigidez flexional multiplicado pela curvatura a que está submetida a viga;
- $\vartheta v(t) [H(x) - H(x - L)]$ é o momento fletor devido ao acoplamento eletromecânico da piezo-cerâmica. v é a tensão gerada na viga e $H(x) - H(x - L)$ é a função de Heaviside.

O termo ϑ , que é o coeficiente de acoplamento backward, para a configuração de conexão em paralelo é dado pela eq.(12).

$$\vartheta = \frac{\bar{e}_{31}b}{h_{\tilde{p}}} \left[\frac{h_{\tilde{s}}^2}{4} - \left(h_{\tilde{p}} + \frac{h_{\tilde{s}}}{2} \right)^2 \right] \quad (12)$$

- \bar{e}_{31} é a constante de tensão piezelétrica efetiva.

Aplicando as relações de momento fletor à equação diferencial parcial resulta na equação acoplada de movimento da viga.

$$YI \frac{\partial^4 w_{rel}(x, t)}{\partial x^4} + c_s I \frac{\partial^5 w_{rel}(x, t)}{\partial x^4 \partial t} + c_a \frac{\partial w_{rel}(x, t)}{\partial t} + m \frac{\partial^2 w_{rel}(x, t)}{\partial t^2} + \vartheta v \left[\frac{d\delta(x)}{dx} - \frac{d\delta(x-L)}{dx} \right] = -m \frac{\partial^2 w_b(x, t)}{\partial t^2} \quad (13)$$

Dada a equação diferencial acoplada do movimento da viga, a próxima etapa é obter a equação diferencial do circuito elétrico mostrado na Figura 4.

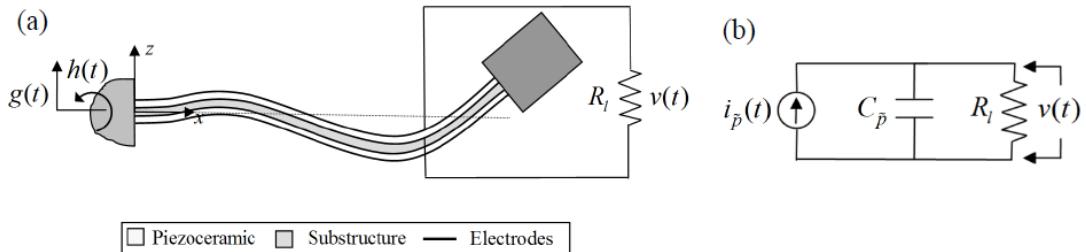


Figura 4 - Modelo físico da ligação elétrica do energy, extraído de ERTURK (2009).

Como a admitância do circuito é $1/R_l$, a corrente elétrica que atravessa o resistor é calculada pela lei de Gauss de acordo com a eq.(14).

$$\frac{d}{dt} \left(\int_A \mathbf{D} \cdot \mathbf{n} dA \right) = \frac{v(t)}{R_l} \quad (14)$$

- \mathbf{D} é o vetor do deslocamento elétrico na camada piezo-cerâmica;
- \mathbf{n} é o vetor unitário normal a superfície e apontado para fora;
- A é a área do eletrodo.

A eq.(14) é integrada sobre a superfície do eletrodo.

Os eletrodos são perpendiculares à direção z, assim sendo, a única contribuição à integral eq.(14) será o deslocamento elétrico na direção z. Como a única fonte de deformação mecânica considerada é a axial devido às tensões normais de flexão, o vetor deslocamento elétrico é reduzido à eq.(15).

$$\mathbf{D}_3 = \bar{e}_{31} S_1^{\bar{p}} + \bar{\epsilon}_{33}^S E_3 \quad (15)$$

- D_3 é o deslocamento elétrico na direção 3, ou seja, direção z;
- $S_1^{\bar{p}}$ é a deformação da piezo-cerâmica na direção 1, ou seja, direção x;
- $\bar{\epsilon}_{33}^S$ é a permissividade a deformação constante;
- E_3 é o campo elétrico na direção 3.

Aplicando a eq.(15) na eq.(14), resulta na eq.(16).

$$\frac{\bar{\epsilon}_{33}^S b L}{h_{\bar{p}}} \frac{d v(t)}{dt} + \frac{v(t)}{R_l} = -\bar{e}_{31} h_{\bar{p}} c b \int_0^L \frac{\partial^3 w_{rel}(x,t)}{\partial x^2 \partial t} \quad (16)$$

- $h_{\tilde{p}c}$ é a distância entre o eixo neutro e o centro da camada piezo-cerâmica, dada por $h_{\tilde{p}c} = \frac{h_{\tilde{p}} + h_s}{2}$.

Dada as equações diferenciais do deslocamento da viga e da voltagem gerada entre os eletrodos, baseando-se na hipótese de amortecimento proporcional, o deslocamento pode ser representada por uma série convergente uniforme de auto-funções, apresentadas na eq.(17).

$$w_{rel}(x, t) = \sum_{r=1}^{\infty} \phi_r(x) \eta_r(t) \quad (17)$$

- r é o r-ésimo modo de vibrar;
- $\phi_r(x)$ é a auto-função normalizada;
- $\eta_r(t)$ é a expressão da resposta mecânica modal.

A auto-função $\phi_r(x)$ é calculada utilizando as seguintes relações.

$$\phi_r(x) = C_r \left[\cos \frac{\lambda_r}{L} x - \cosh \frac{\lambda_r}{L} x + \zeta_r \left(\sin \frac{\lambda_r}{L} x - \sinh \frac{\lambda_r}{L} x \right) \right] \quad (18)$$

$$\zeta_r = \frac{\sin \lambda_r - \sinh \lambda_r}{\cos \lambda_r - \cosh \lambda_r} \quad (19)$$

Aplicando as coordenadas modais às equações de movimento da viga, eq.(13), resulta na eq.(20).

$$\frac{d^2 \eta_r(t)}{dt^2} + 2\zeta_r \omega_r \frac{d\eta_r(t)}{dt} + \omega_r^2 \eta_r(t) + \chi_r v_p(t) = f_r(t) \quad (20)$$

- χ_r é o acoplamento eletromecânico modal, definido como $\chi_r = \vartheta \frac{d\phi_r(x)}{dx} \Big|_{x=L}$;

O termo $f_r(t)$ é o termo forçante modal, que é expresso pela eq.(21).

$$f_r(t) = -m \left(\frac{d^2 g(t)}{dt^2} \int_0^L \phi_r(x) dx + \frac{d^2 h(t)}{dt^2} \int_0^L x \phi_r(x) dx + \right) \quad (21)$$

O termo forçante pode ser dividido em duas componentes, relativas à translação da base e a rotação desta, conforme a eq.(22).

$$F_r = -\sigma_r \omega^2 W_0 - \tau_r \omega^2 \theta_0 \quad (22)$$

- σ_r é definido como $\sigma_r = -m \int_0^L \phi_r(x) dx$;
- τ_r é definido como $\tau_r = -m \int_0^L x \phi_r(x) dx$.

Aplicando a resposta modal do deslocamento à eq.(16) e definindo a capacidade da piezo-cerâmica se obtém a eq.(23).

$$C_{\tilde{p}} \frac{dv(t)}{dt} + \frac{v(t)}{2R_l} = i_{\tilde{p}}(t) \quad (23)$$

- $C_{\tilde{p}}$ é a capacidade interna, definida como $C_{\tilde{p}} = 2 \frac{\bar{\varepsilon}_{33}^S b L}{h_{\tilde{p}}}$;
- $i_{\tilde{p}}(t)$ é a fonte de corrente, definida como $i_{\tilde{p}}(t) = \sum_{r=1}^{\infty} \kappa_r \frac{d\eta_r(t)}{dt}$;
- κ_r é o termo de acoplamento modal, definido como $\kappa_r = -\bar{e}_{31} h_{\tilde{p}c} b \frac{d\phi_r(x)}{dx} \Big|_{x=L}$.

Assumindo que as entradas sejam do tipo harmônicas, resulta que $g(t) = W_0 e^{j\omega t}$ e $h(t) = \theta_0 e^{j\omega t}$, onde W_0 é a amplitude da translação da base, θ_0 é a amplitude do deslocamento devido à rotação da base, ω é a frequência da excitação e j é um número unitário imaginário. O termo forçante modal pode ser expresso como $f_r(t) = F_r e^{j\omega t}$ onde F_r é expresso pela eq.(24).

$$F_r = \omega^2 \left[m \left(W_0 \int_0^L \phi_r(x) dx + \theta_0 \int_0^L x \phi_r(x) dx \right) \right] \quad (24)$$

Baseando-se na hipótese de sistema linear ao problema tratado, a solução para a resposta mecânica modal e da voltagem podem ser assumidas harmônicas com a frequência de excitação de modo que $\eta_r(t) = H_r e^{j\omega t}$ e $v_p(t) = V_p e^{j\omega t}$, onde H_r e V_p são as amplitudes da resposta mecânica modal e da voltagem de saída. Ambas as amplitudes podem ser obtidas aplicando as respostas propostas às eq.(23) e eq.(24), resultando nas equações finais para as variáveis de interesse.

$$v_p(t) = \alpha(\omega)(-\omega^2 W_0 e^{j\omega t}) + \mu(\omega)(-\omega^2 \theta_0 e^{j\omega t}) \quad (25)$$

$$\alpha(\omega) = \frac{\sum_{r=1}^{\infty} \frac{j\omega \bar{\theta}_r \sigma_r}{\omega_r^2 - \omega^2 + j2\zeta_r \omega_r \omega}}{\frac{1}{R_l} + j\omega C_{\tilde{p}} + \sum_{r=1}^{\infty} \frac{j\omega \bar{\theta}_r^2}{\omega_r^2 - \omega^2 + j2\zeta_r \omega_r \omega}} \quad (26)$$

$$\mu(\omega) = \frac{\sum_{r=1}^{\infty} \frac{j\omega \bar{\theta}_r \tau_r}{\omega_r^2 - \omega^2 + j2\zeta_r \omega_r \omega}}{\frac{1}{R_l} + j\omega C_{\tilde{p}} + \sum_{r=1}^{\infty} \frac{j\omega \bar{\theta}_r^2}{\omega_r^2 - \omega^2 + j2\zeta_r \omega_r \omega}} \quad (27)$$

$$w_{rel}(x, t) = \beta(\omega, x)(-\omega^2 W_0 e^{j\omega t}) + \psi(\omega, x)(-\omega^2 \theta_0 e^{j\omega t}) \quad (28)$$

$$\beta(\omega, x) = \sum_{r=1}^{\infty} \left[\left(\sigma_r - \bar{\theta}_r \frac{\sum_{r=1}^{\infty} \frac{j\omega \bar{\theta}_r \sigma_r}{\omega_r^2 - \omega^2 + j2\zeta_r \omega_r \omega}}{\frac{1}{R_l} + j\omega C_{\tilde{p}} + \sum_{r=1}^{\infty} \frac{j\omega \bar{\theta}_r^2}{\omega_r^2 - \omega^2 + j2\zeta_r \omega_r \omega}} \right) \frac{\phi_r(x)}{\omega_r^2 - \omega^2 + j2\zeta_r \omega_r \omega} \right] \quad (29)$$

$$\psi(\omega, x) = \sum_{r=1}^{\infty} \left[\left(\tau_r - \bar{\theta}_r \frac{\sum_{r=1}^{\infty} \frac{j\omega \bar{\theta}_r \sigma_r}{\omega_r^2 - \omega^2 + j2\zeta_r \omega_r \omega}}{\frac{1}{R_l} + j\omega C_{\tilde{p}} + \sum_{r=1}^{\infty} \frac{j\omega \bar{\theta}_r^2}{\omega_r^2 - \omega^2 + j2\zeta_r \omega_r \omega}} \right) \frac{\phi_r(x)}{\omega_r^2 - \omega^2 + j2\zeta_r \omega_r \omega} \right] \quad (30)$$

- $\tilde{\theta}_r$ é definido por $-2\bar{e}_{31}bh_{\bar{p}c}\frac{d\phi(x)}{dx}\Big|_{x=L}$;

As eq.(26), (27), (29) e (30) correspondem às funções da resposta em frequência das seguintes relações, respectivamente:

- Voltagem pela entrada deslocamento da base;
- Voltagem pela entrada rotação da base;
- Deslocamento do ponto x pela entrada deslocamento da base;
- Deslocamento do ponto x pela entrada rotação da base.

As eq.(25) e (28) correspondem às respostas no domínio do tempo.

As eq.(31) e (32) também serão utilizadas na estimativa dos parâmetros de corrente e potência instantânea do “energy harvesting” piezelétrico, tanto no domínio do tempo quanto na determinação das FRF’s.

$$i = \frac{1}{R_l}v_p \quad (31)$$

$$p = \frac{1}{R_l}v_p^2 \quad (32)$$

A carga que o dispositivo pode armazenar em uma bateria será estimada utilizando a eq.(33). A potência média será estimada utilizando a eq.(34).

$$q_{armazenado} = \int_0^t idt \quad (33)$$

$$P_{médio} = \frac{\int_0^t pdt}{t} \quad (34)$$

5.2. Modelo do vento

O aquecimento desigual da Terra aliado com sua rotação causa o aparecimento de gradientes de pressão que impulsionam grandes massas de ar, os ventos, de regiões de maior pressão (maior temperatura) para outras de menor pressão (menor temperatura), buscando o equilíbrio térmico do globo. Assim, a

energia eólica é uma modalidade da energia solar, uma vez que é o calor recebido do Sol a força motriz dos deslocamentos das massas de ar.

Porém os gradientes de pressão não são os únicos fatores que influenciam o comportamento geral dos ventos. Segundo HOLTON (1992), as forças atuantes no processo de movimentação das massas de ar são:

- Forças resultantes do gradiente de pressão entre duas regiões;
- Força gravitacional;
- Força devido à viscosidade do ar;
- Forças de inércia, devido ao movimento do planeta.

5.2.1. O comportamento do vento próximo ao solo

“O relevo e a presença de obstáculos moldam o escoamento do ar sobre a superfície terrestre, bem como geram turbulências no fluxo.” (MARTINS et al, 2008). Segundo o autor, essa influência é dominante em uma camada que atinge até 100 metros do solo. Nessa camada ocorrem os intercâmbios de momento, calor e umidade entre a superfície e o ar atmosférico. O resultado da influência da rugosidade da superfície, que é a propriedade física que descreve a ação da superfície terrestre na redução do momento e na absorção do impacto dos ventos, ao escoamento de ar é que os ventos apresentarão baixa velocidade em baixas altitudes e considerável turbulência.

5.2.2. O comportamento turbulento do vento

O comportamento dinâmico de uma massa de ar é fortemente influenciado pelas forças de cisalhamento viscoso. Segundo HOLTON (1992), devido à condição de aderência do ar ao solo, onde sua velocidade é nula, mesmo ventos de baixa

velocidade causarão elevados e cisalhamento próximo à superfície, gerando redemoinhos turbulentos. Esses movimentos turbulentos têm variações espaciais e temporais muito pequenas para serem observados por estudos meteorológicos, sendo, portanto tratados estatisticamente.

Segundo CASTRO (2004), a turbulência atmosférica afeta a conversão de energia eólica em elétrica principalmente devido às variações na direção do vento, mas o principal problema das turbulências são os esforços a que as estruturas eólicas ficam sujeitas.

5.2.3. O vento geostrófico

Segundo CASTRO (2004), para altitudes elevadas, até 2.000 metros acima do solo, as forças de atrito podem ser desprezadas. Nesse caso, segundo PINHEIROS (2009), uma partícula de ar se move de uma camada de alta pressão, menor altitude, para uma camada de menor pressão, maior altitude, até que a força de Coriolis se iguale ao gradiente de pressão, e a partícula passe a se mover em uma isóbara. A Figura 5 ilustra esse comportamento.

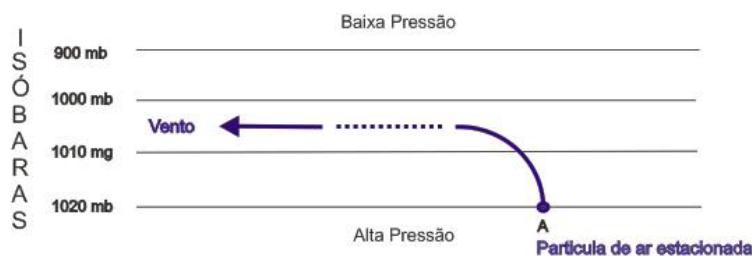


Figura 5 – Deslocamento de uma partícula de ar em elevadas altitudes, extraído do trabalho de Pinheiros.

Os ventos geostróficos são os melhores para a geração da energia eólica, pois são os que apresentam as maiores velocidade, pois a influência do atrito viscoso, que

é uma força dissipativa, pode ser desprezada, e a turbulência do ar nesse regime é inferior quando comparado ao vento próximo a superfície, como fica demonstrado na Figura 6, extraído do trabalho de PINHEIROS (2009).

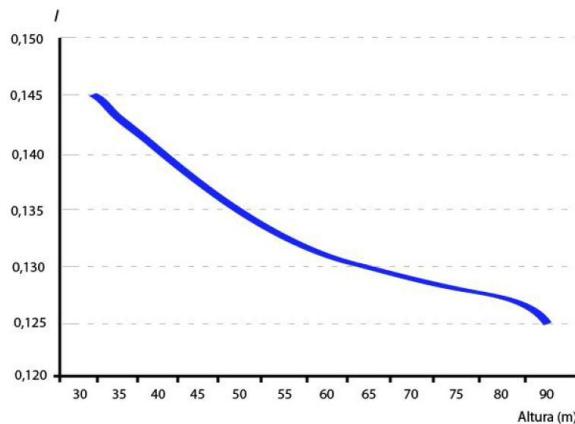


Figura 6 – Variação da intensidade da turbulência do vento com a altura, extraído do trabalho de Pinheiros (2009).

5.2.4. Predição do regime do vento

Dois parâmetros são muito importantes ao projeto de um gerador eólico:

- A velocidade média do vento: Com essa informação, estima-se a potência que pode ser extraída em uma região;
- A variação da velocidade do vento: Sabendo o limite máximo da velocidade que o vento atinge, é possível dimensionar a estrutura do gerador para que este suporte as condições mais extremas que uma região pode apresentar.

Porém, o vento tem característica estocástica e sua velocidade é uma variável aleatória contínua, segundo PINHEIROS (2009), sendo necessário tratar o vento de forma estatística. Segundo a autora, a distribuição de Weibull permite representar a distribuição de frequência da velocidade do vento de forma bem compacta.

5.2.5. A distribuição de Weibull aplicada ao comportamento do vento

A eq.(35) representa a função de probabilidade de Weibull, que é a distribuição é a que melhor se ajusta aos dados coletados em diversos sites de exploração eólica, como fica constatado na maioria das referências pesquisadas.

$$f(v) = \frac{K}{A} * \left(\frac{v}{A}\right)^{K-1} * e^{-\left(\frac{v}{A}\right)^K} \quad (35)$$

- A é o fator de escala;
- K é o fator de forma.

Para que a distribuição em uma região fique totalmente caracterizada, são necessários os dois parâmetros, A e K, que são obtidos pela manipulação dos dados anemométricos realizados em determinada região. Segundo PINHEIROS (2009), o fator de forma K representa uma medida inversa da oscilação da velocidade do vento em torno de sua velocidade média sendo, portanto, uma medida inversa do índice de turbulência. O fator de escala A representa a diversidade de ocorrências de velocidades de vento na distribuição de Weibull e está diretamente relacionado à velocidade média. De acordo com o trabalho de MAINIERI (2005), o fator de escala pode ser aproximado pela eq.(36).

$$\frac{A}{\bar{v}} = \left(0,568 + \frac{0,433}{K}\right)^{-\frac{1}{K}} \quad (36)$$

Segundo PATEL (2006), $f(v)$ é escolhido para um período de tempo, em geral um ano. Assim, interpreta-se a função densidade de probabilidade do vento pela eq.(37).

$$f(v) = \frac{\text{número de horas por ano que o vento está entre } v \text{ e } (v+\Delta v)}{\Delta v} \quad (37)$$

Com a eq.(37), é possível estimar o período em que a estrutura está submetida a determinados esforços.

5.2.6. O atlas do potencial eólico brasileiro

Devido à expansão do uso da energia eólica, criou-se o interesse em mapear o potencial eólico brasileiro para melhor utilizá-lo. Um desses esforços foi realizado pelo Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB) ao elaborar o atlas do potencial eólico brasileiro. Nesse atlas, foi coletado amostras de dados anemométricos no período 1983/1999 e, com o auxílio do software MesoMap, foi possível realizar mapas de velocidade média dos ventos, variância, fator de escala A e de forma K para todas as regiões do país.

O ideal para se caracterizar o regime dos ventos em uma região é a coleta de dados diretamente do local, mas tal é impossível, uma vez que para que as medidas sejam confiáveis, é necessário um período de amostragem de, no mínimo, um ano. Assim, para esse trabalho, serão adotados os valores desse atlas para a caracterização do regime do vento.

5.2.7. A lei logarítmica de Prandtl

Os dados presentes no atlas do potencial eólico brasileiro são relativos à altura de 50 metros acima do solo. Para adequar esse valor aos objetivos do trabalho, que é obter o modelo para ventos em elevadas altitudes, será tomada como hipótese que o fator de forma K não se altera com a altitude e que a velocidade média do vento segue a lei de Prandtl, que será apresentada a seguir.

Segundo CASTRO (2004), o perfil do comportamento do vento pode ser aproximado pela lei logarítmica de Prandtl. Seu aspecto está apresentado na Figura 7, extraído do trabalho de MARTINS (2008).

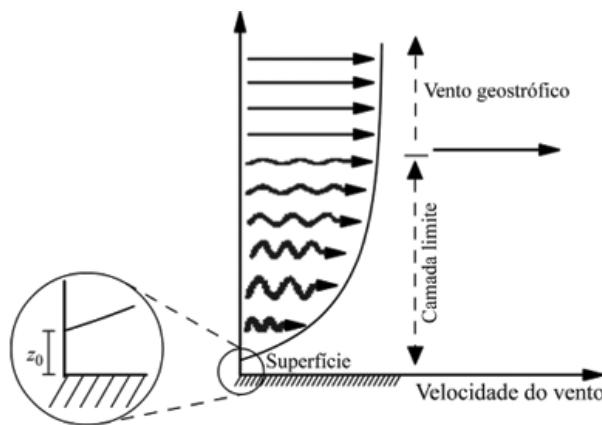


Figura 7 – Perfil vertical da velocidade do vento desde a superfície até a altura do vento geostrófico, extraído do trabalho de Martins (2008).

A velocidade média do vento \bar{u} então pode ser calculada em função da altura z com uma medida conhecida do vento em uma altura conhecida, com a eq.(38).

$$\frac{\bar{u}(z)}{\bar{u}(z_R)} = \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_R}{z_0}\right)} \quad (38)$$

- z_R é uma cota de referência;
- $\bar{u}(z_R)$ é a velocidade média conhecida na cota de referência;
- z_0 é o comprimento característico da rugosidade do solo.

5.3. Vibrações induzidas por vórtices em escoamento em torno de um cilindro

Nesta seção será analisado o fenômeno das vibrações induzidas por vórtices, fundamental ao funcionamento ótimo do projeto. A partir da análise realizada, parâmetros chaves serão tomados ou relacionados por equações.

FUJARRA (2002), em seu trabalho cita as seguintes características, importantes ao projeto:

- A VIV é um fenômeno ressonante de interação fluído-estrutural, caracterizado por oscilações autoexcitadas e autocontroladas, que ocorrem em

corpos imersos em escoamento fluído, com velocidade acima de um valor crítico;

- A oscilação tem origem na emissão alternada de vórtices e, por consequência, nas periódicas flutuações do campo de pressão;
- A amplitude de oscilação não ultrapassa valores da ordem da dimensão característica da seção transversal, visto que toda a energia absorvida é dissipada pelo próprio amortecimento, predominantemente viscoso, induzido nas oscilações;
- Essa amplitude aumenta com o acréscimo de velocidade, gerando vórtices alternados, no fenômeno denominado Esteira de Von Karman, conforme apresentado na Figura 8;

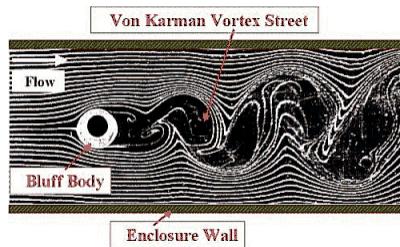


Figura 8 – Esteira de Von Karman, extraído do site Stoneman Solutions.

- A esteira de Von Karman oscila com a frequência determinada pela eq.(39), na qual o termo St refere-se ao número de Strouhal, aproximadamente 0,2 para cilindros circulares infinitos;

$$f_s = St \frac{U}{D} \quad (39)$$

- A frequência de emissão de vórtices cresce com o aumento da velocidade, até o instante em que sincroniza com uma das frequências naturais do corpo, permanecendo aproximadamente nessa condição por uma larga faixa de velocidades do fluido. Esse fenômeno é conhecido como lock in;
- A amplitude de oscilação do cilindro excitado pelo desprendimento de vórtices pode ser aproximada por uma senoidal, dependente da massa, amortecimento e da força de sustentação. Novamente, a obtenção desses

valores depende de ensaios experimentais. Assim, para fins de realizar a estimativa preliminar, será tomado do trabalho de KITAGAWA (1997) o valor máximo de amplitude do movimento, fazendo-se a hipótese que o cilindro estará sob esse regime na ressonância, e que esse será o regime de operação nominal do dispositivo. Assim, dos gráficos apresentados por KITAGAWA (1997), o valor máximo da amplitude reduzida, para a razão de amortecimento estrutural de 0,28, é:

$$y/D = 0,1$$

5.4. Determinação da frequência natural de um cilindro

A frequência natural de um cilindro é fornecida pela eq.(40). A Figura 9 apresenta um cilindro excitado por VIV.

$$f_n = \frac{\alpha_n^2 d^2}{8\pi L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (40)$$

- α_n é o coeficiente específico do modo de vibrar;
- d é o diâmetro externo;
- E é o módulo de elasticidade do cilindro;
- ρ é a densidade do cilindro;
- L é o comprimento em balanço.

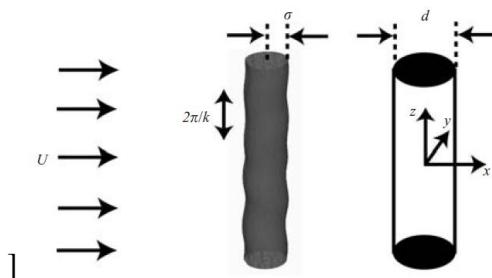


Figura 9 – Modelo da interação do escoamento do vento com o cilindro, extraído de Liu e Marshall (2007).

6. RESULTADOS

6.1. Metodologia proposta

Para determinar as dimensões a serem analisadas é feita uma análise de sensibilidade utilizando adimensionais L/hp , b/hp e b/L , além do volume e a resistência da carga. Essas dimensões estão apresentadas na Figura 10.

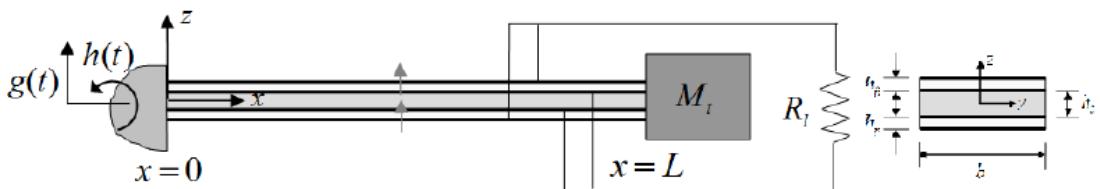


Figura 10 – Vista lateral e em corte do gerador piezelétrico com as principais dimensões analisadas, extraído de ERTURK (2009). Na figura estão apresentadas as dimensões L (comprimento da viga), hp (espessura da lâmina de piezo-cerâmica), b (largura da viga) e R_I (resistência da carga).

Os parâmetros analisados são:

- Corrente: que é diretamente relacionado com o tempo de recarga de baterias;
- Voltagem: a recarga de baterias necessita de um valor mínimo para operação, o que justifica a análise desse valor;
- Potência: importante para verificar o desempenho do dispositivo de alimentar a carga;
- Deslocamento da ponta da viga: importante para verificar a deflexão da viga.

A análise de sensibilidade é feita utilizando as funções da resposta na frequência, o que permite a análise em uma faixa de frequência que engloba a frequência operacional e também frequências superiores e inferiores que podem ocorrer devido a oscilação normal da velocidade do vento.

Determinada a geometria e dimensões principais, a resposta temporal é obtida utilizando a estimativa da velocidade do vento na cidade de São Paulo a altura de 20.000 metros, altura normal para balões meteorológicos utilizando para isso os atlas eólicos e a hipótese da camada limite de Prandtl.

A Tabela 12 apresenta os valores analisados pelas FRF's. A Tabela 13 apresenta os valores dos parâmetros que não serão variados, que são relativos ao materiais utilizados ou constantes do problema. A Tabela 14 apresenta as equações utilizadas nas simulações que se seguem. O fluxograma da Figura 11 resume os procedimentos citados nessa seção.

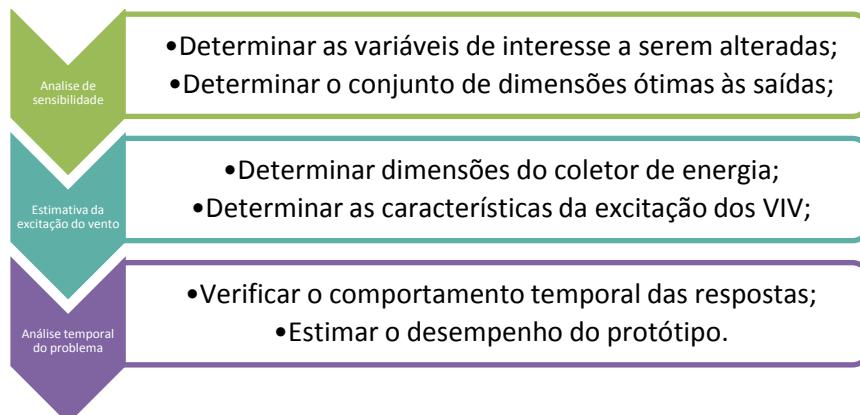


Figura 11 – Resumo dos procedimentos utilizados.

Tabela 12 – Parâmetros analisados nas simulações.

b/L	150	6	1,5	0,375	0,167
b/hp	703,125	200	50	5,56	1,125
L/hp	133,3	33,3	8,3	0,3	0,03
Volume (cm ³)	22,5	45	100	150	200
Resistência (ohm)	100	1k	10k	100k	1M

Tabela 13 – Parâmetros utilizados.

Parâmetro	Valor utilizado
α_1, α_2 e α_3	1.875104, 4.694091 e 7.854757
ζ_1, ζ_2 e ζ_3	0.010, 0.012 e 0.030
e_{31}	-10,4 C/m ²
ε_{33}^S	13,3x10 ⁻⁹ F/m
c_{11}^E	61x10 ⁹ N/m ²
ρ_{piez}	7750 kg/m ³
Y_c	70x10 ⁹ N/m ²
$\rho_{aluminio}$	2700 kg/m ³

Tabela 14 – Equações utilizadas nas simulações.

FRF da voltagem	$\alpha(\omega) = \frac{\sum_{r=1}^{\infty} \frac{j\omega\tilde{\theta}_r\sigma_r}{\omega_r^2 - \omega^2 + j2\zeta_r\omega_r\omega}}{\frac{1}{R_l} + j\omega C_p + \sum_{r=1}^{\infty} \frac{j\omega\tilde{\theta}_r^2}{\omega_r^2 - \omega^2 + j2\zeta_r\omega_r\omega}}$
FRF do deslocamento de um ponto da viga	$\beta(\omega, x) = \sum_{r=1}^{\infty} \left[\left(\sigma_r - \tilde{\theta}_r \frac{\sum_{r=1}^{\infty} \frac{j\omega\tilde{\theta}_r\sigma_r}{\omega_r^2 - \omega^2 + j2\zeta_r\omega_r\omega}}{\frac{1}{R_l} + j\omega C_p + \sum_{r=1}^{\infty} \frac{j\omega\tilde{\theta}_r^2}{\omega_r^2 - \omega^2 + j2\zeta_r\omega_r\omega}} \right) \frac{\phi_r(x)}{\omega_r^2 - \omega^2 + j2\zeta_r\omega_r\omega} \right]$
RT da voltagem	$v_p(t) = \alpha(\omega)(-\omega^2 W_0 e^{j\omega t})$
RT da corrente	$i = \frac{1}{R_l} v_p$
RT da potência	$p = \frac{1}{R_l} v_p^2$
RT do deslocamento	$w_{rel}(x, t) = \beta(\omega, x)(-\omega^2 W_0 e^{j\omega t})$
Velocidade na altura z	$\frac{\bar{u}(z)}{\bar{u}(z_R)} = \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_R}{z_0}\right)}$
Fator de escala	$\frac{A}{\bar{V}} = \left(0,568 + \frac{0,433}{K}\right)^{-\frac{1}{K}}$
Frequência de desprendimento de vórtices	$f_s = St \frac{U}{D}$

6.2. Parâmetros utilizados

6.2.1. Autovalores das frequências de ressonância

De acordo com o trabalho de ALMEIDA e LIMA Jr. (2010), os autovalores que caracterizam uma viga de Euler – Bernoulli com uma extremidade engastada e outra livre são os seguintes:

- $\alpha_1 = 1,875104;$
- $\alpha_2 = 4,694091;$
- $\alpha_3 = 7,854757.$

6.2.2. Material piezelétrico utilizado e substrato

Foi escolhido para a estimativa da potência do dispositivo o material piezelétrico PZT-5A, cujas propriedades foram extraídas do trabalho de ERTURK (2009) e do site da ATCP. O substrato utilizado é de alumínio.

- $e_{31} = -10,4 \text{ C/m}^2;$
- $\epsilon_{33}^S = 13,3 \times 10^{-9} \text{ F/m};$
- $c_{11}^E = 61 \times 10^9 \text{ N/m}^2;$
- $\rho_{\text{piez}} = 7750 \text{ kg/m}^3.$
- $Y_c = 70 \times 10^9 \text{ N/m}^2;$
- $\rho_{\text{aluminio}} = 2700 \text{ kg/m}^3.$

6.2.3. Estimativa do amortecimento estrutural

Para o cálculo valor do amortecimento estrutural, de importância no presente trabalho, é necessária a medição direta do protótipo do dispositivo. Porém, para fins de realizar a estimativa preliminar, adota-se o valor dos amortecimentos apresentados no trabalho de ERTURK (2009) para as três primeiras frequências naturais.

- $\zeta_1 = 0,010$;
- $\zeta_2 = 0,012$;
- $\zeta_3 = 0,030$.

6.3. Análise de sensibilidade

Nesta seção será feita a análise do desempenho do dispositivo piezelétrico variando a geometria das lâminas bimorph para verificar sua influência e determinar o valor das dimensões ótimas do projeto. Serão avaliadas as dimensões possíveis de serem alteradas ainda na fase de projeto e que são possíveis de ter controle, o que não acontece com a cerâmica, por exemplo, pois o erro devido a este material pode acarretar desvios da ordem de 20%. Essas dimensões são:

- A espessura h_p ;
- O comprimento da viga, L ;
- A largura da viga b ;
- O volume do material utilizado;
- A resistência da carga.

As dimensões avaliadas estarão em grupos adimensionais, cuja finalidade é verificar não o valor absoluto da grandeza, mas a importância de uma em comparação com a outra, buscando obter qual dimensão é preferida de ser alterada.

Serão utilizadas as especificações de pilhas como alvo, conforme apresentado na Tabela 2. Essa tabela apresenta a voltagem mínima para a recarga da pilha e será

tomada desta a resistência do dispositivo, aplicando a lei de Ohm à tensão e corrente de operação.

- $V = 2,8 \text{ V}$;
- $R_l = 16 \Omega$.

Para as simulações a serem realizadas o software utilizado será o Scilab 5.3.0, se utilizando dos conceitos apresentados no capítulo 5 e os parâmetros determinado neste capítulo. O programa utilizado nas simulações está apresentado no anexo B. As figuras apresentadas são as funções de resposta em frequência relativos aos três primeiros modos de vibrar dos parâmetros: voltagem, corrente, deslocamento e potência utilizando-se os parâmetros pré-determinados neste capítulo e variando-se as dimensões das lâminas de material piezelétrico, para verificar a influência destas no desempenho e otimizá-las, minimizando o volume de material utilizado.

6.3.1. Variação da relação base – comprimento da viga mantendo o volume fixo

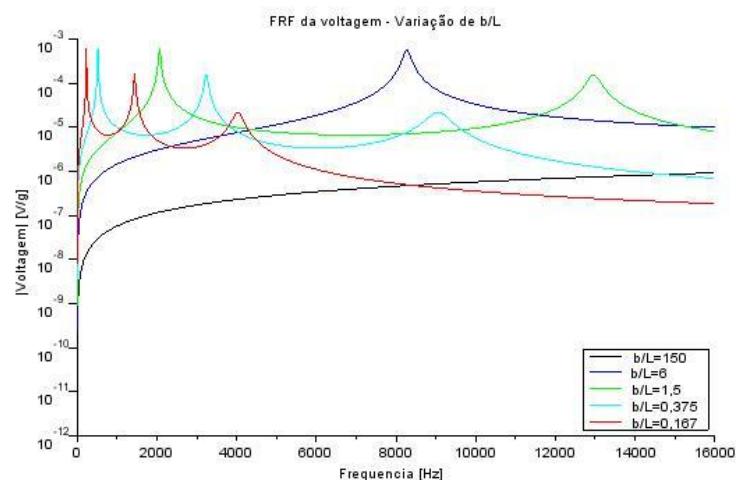


Figura 12 – Variação da voltagem em função do adimensional b/L , para os valores 150, 6, 1.5, 0.375, 0.167 nas cores preta, azul, verde, azul claro e vermelho, respectivamente, para o intervalo de freqüência de 0 a 15.000 Hz.

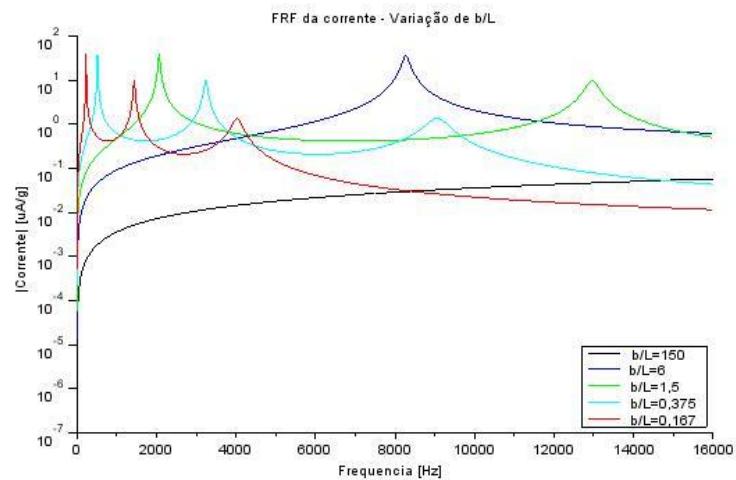


Figura 13 – Variação da corrente em função do adimensional b/L , para os valores 150, 6, 1,5, 0,375, 0,167 nas cores preta, azul, verde, azul claro e vermelho, respectivamente, para o intervalo de frequência de 0 a 15.000 Hz.

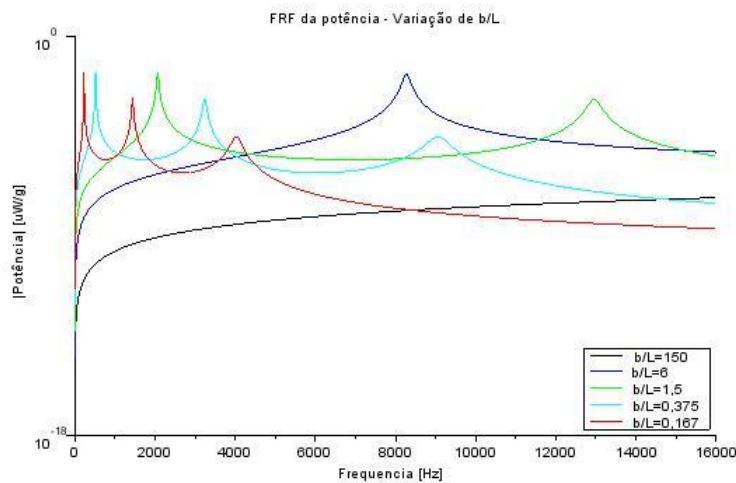


Figura 14 – Variação da potência em função do adimensional b/L , para os valores 150, 6, 1,5, 0,375, 0,167 nas cores preta, azul, verde, azul claro e vermelho, respectivamente, para o intervalo de frequência de 0 a 15.000 Hz.

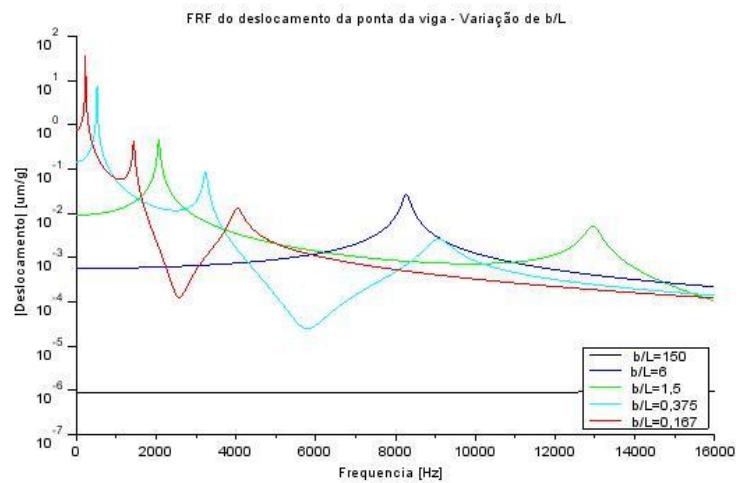


Figura 15 – Variação do deslocamento da ponta da viga em função do adimensional b/L , para os valores 150, 6, 1,5, 0,375, 0,167 nas cores preta, azul, verde, azul claro e vermelho, respectivamente, para o intervalo de frequência de 0 a 15.000 Hz.

As Figuras 12, 13, 14 e 15 apresentam as variações da voltagem, corrente, potência e deslocamento da ponta da viga, respectivamente, para o adimensional b/L cujos valores são variados em 150, 6, 1,5, 0,375 e 0,167. Nessas figuras a amplitude da voltagem, corrente, potência e deslocamento são aumentados com a redução do adimensional. Percebe-se também que a redução do adimensional desloca as frequências de ressonância para valores menores.

A Tabela 15 apresenta a variação dos valores máximos das grandezas analisadas em função do adimensional b/L .

Tabela 15 – Variação das grandezas analisadas em função do adimensional b/L .

Adimensional b/L	Voltagem (V)	Corrente (uA)	Potência (uW)	Deslocamento (um)
150	0,0000009	0,0577555	5,337D-08	0,0000009
6	0,0005646	35,28634	0,019922	0,0263534
1,5	0,0006059	37,87124	0,0229477	0,4524421
0,375	0,0006172	38,573913	0,0238071	7,3734758
0,167	0,0006193	38,70726	0,023972	37,449115

As seguintes conclusões podem ser aferidas com o auxílio dos gráficos apresentados:

- Com a redução do adimensional b/L , para o mesmo volume de material, todas as grandezas analisadas são aumentadas;
- O maior efeito da redução do adimensional b/L é o deslocamento das frequências de ressonâncias para frequências maiores, situadas a esquerda dos diagramas apresentados.

6.3.2. Variação da relação base – espessura da viga mantendo o volume fixo

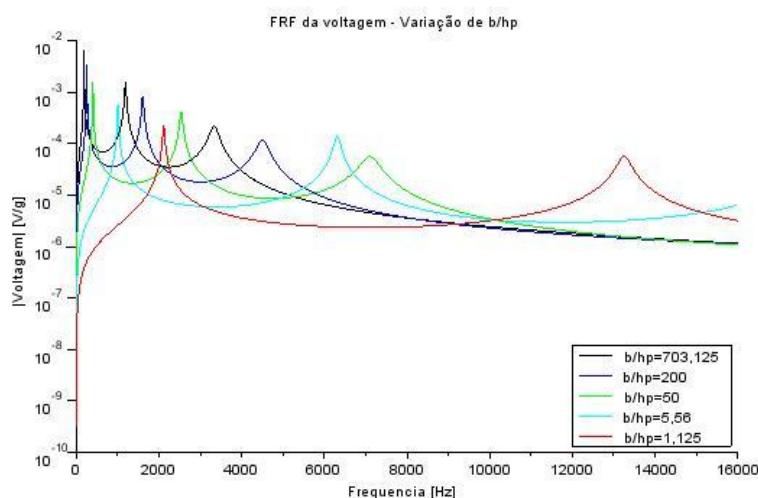


Figura 16 – Variação da voltagem em função do adimensional b/h_p , para os valores 703.125, 200, 50, 5.56, 1.125 nas cores preta, azul, verde, azul claro e vermelho, respectivamente, para o intervalo de frequência de 0 a 15.000 Hz.

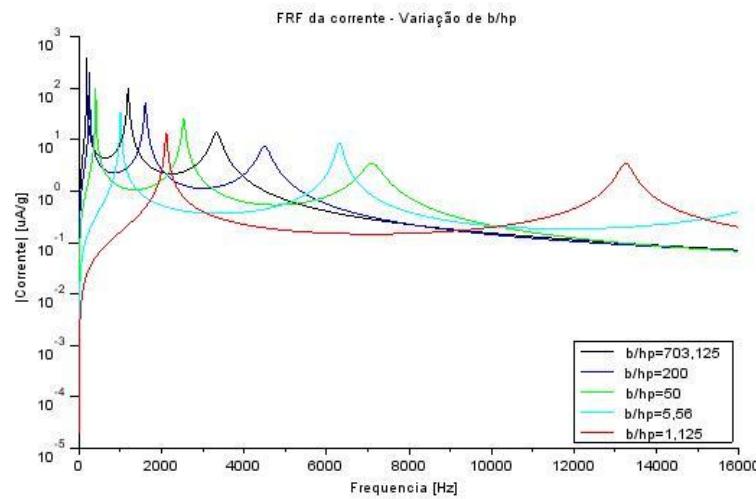


Figura 17 – Variação da corrente em função do adimensional b/h_p , para os valores 703.125, 200, 50, 5.56, 1.125 nas cores preta, azul, verde, azul claro e vermelho, respectivamente, para o intervalo de frequência de 0 a 15.000 Hz.

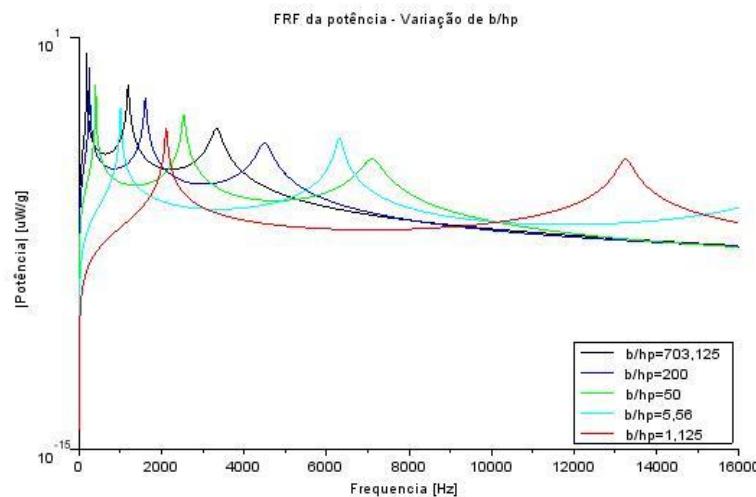


Figura 18 – Variação da potência em função do adimensional b/h_p , para os valores 703.125, 200, 50, 5.56, 1.125 nas cores preta, azul, verde, azul claro e vermelho, respectivamente, para o intervalo de frequência de 0 a 15.000 Hz.

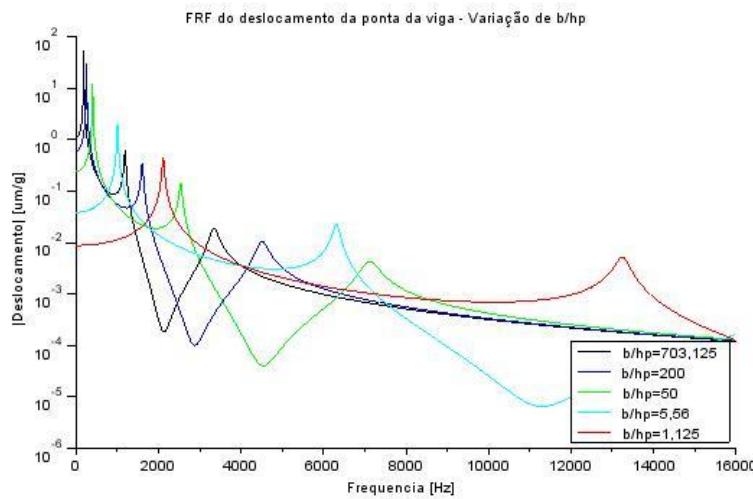


Figura 19 – Variação do deslocamento da ponta da viga em função do adimensional b/hp, para os valores 703.125, 200, 50, 5.56, 1.125 nas cores preta, azul, verde, azul claro e vermelho, respectivamente, para o intervalo de frequência de 0 a 15.000 Hz.

As Figuras 16, 17, 18 e 19 apresentam as variações da voltagem, corrente, potência e deslocamento da ponta da viga, respectivamente, para o adimensional b/hp cujos valores são variados em 703.125, 200, 50, 5.56 e 1.125. Nessas figuras a amplitude da voltagem, corrente, potência e deslocamento são reduzidos com a redução do adimensional. Percebe-se também que a redução do adimensional desloca as frequências de ressonância para valores maiores.

Tabela 16 – Variação das grandezas analisadas em função do adimensional b/hp.

Adimensional b/hp	Voltagem (V)	Corrente (uA)	Potência (uW)	Deslocamento (um)
703,125	0,0062403	390,01697	2,4338118	52,869745
200	0,0032846	205,28662	0,6742815	29,61945
50	0,0015758	98,490424	0,1552058	12,010029
5,56	0,0005445	34,028451	0,018527	1,9506495
1,125	0,0002175	13,594004	0,0029568	0,4431994

- Com a redução do adimensional b/hp, para o mesmo volume de material, todas as grandezas analisadas são reduzidas significativamente, chegando a até 70% a redução dentro dos intervalos analisados;

- Semelhante ao adimensional b/L , a redução do adimensional b/hp resulta em deslocamento das frequências de ressonâncias para frequências maiores, situadas a esquerda dos diagramas apresentados.

6.3.3. Variação da relação largura – espessura da viga mantendo o volume fixo

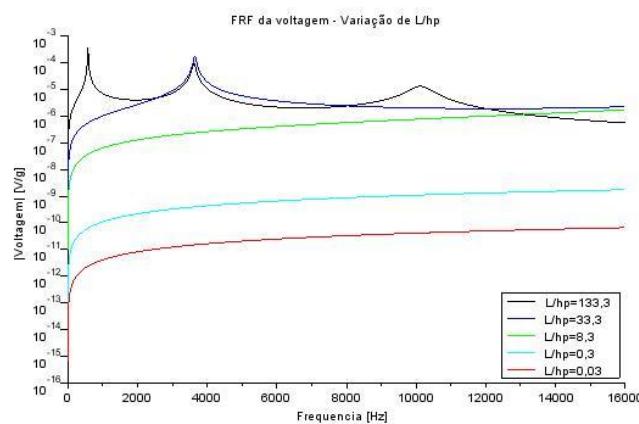


Figura 20 – Variação da voltagem em função do adimensional L/hp, para os valores 133,3, 33,3, 8,3, 0,3, 0,03 nas cores preta, azul, verde, azul claro e vermelho, respectivamente, para o intervalo de frequência de 0 a 15.000 Hz.

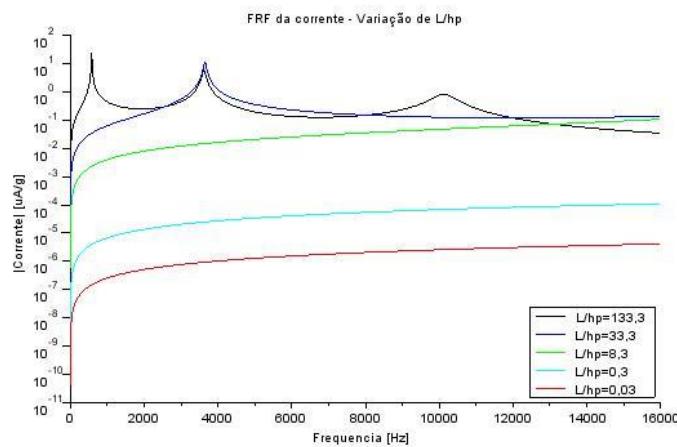


Figura 21 – Variação da corrente em função do adimensional L/hp, para os valores 133,3, 33,3, 8,3, 0,3, 0,03 nas cores preta, azul, verde, azul claro e vermelho, respectivamente, para o intervalo de frequência de 0 a 15.000 Hz.

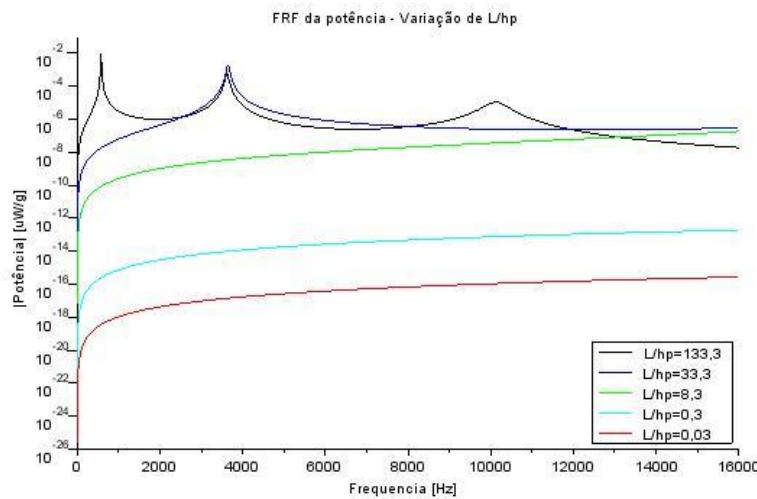


Figura 22 – Variação da potência em função do adimensional L/hp , para os valores 133,3, 33,3, 8,3, 0,3, 0,03 nas cores preta, azul, verde, azul claro e vermelho, respectivamente, para o intervalo de frequência de 0 a 15.000 Hz.

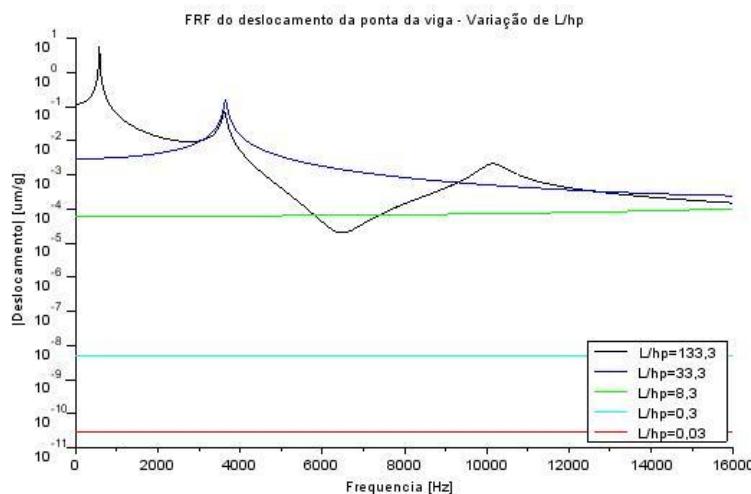


Figura 23 – Variação do deslocamento da ponta da viga em função do adimensional L/hp , para os valores 133,3, 33,3, 8,3, 0,3, 0,03 nas cores preta, azul, verde, azul claro e vermelho, respectivamente, para o intervalo de frequência de 0 a 15.000 Hz.

As Figuras 20, 21, 22 e 23 apresentam as variações da voltagem, corrente, potência e deslocamento da ponta da viga, respectivamente, para o adimensional L/hp cujos valores são variados em 133,3, 33,3, 8,3, 0,3 e 0,03. Nessas figuras a amplitude da voltagem, corrente, potência e deslocamento são reduzidos com a

redução do adimensional. Percebe-se também que a redução do adimensional desloca as frequências de ressonância para valores maiores.

Tabela 17 – Variação das grandezas analisadas em função do adimensional L/hp.

Adimensional L/hp	Voltagem (V)	Corrente (uA)	Potência (uW)	Deslocamento (um)
133,3	0,0003691	23,068208	851427,56 E-08	5,9180288
33,3	0,0001751	10,943446	191614,41 E-08	0,1482756
8,3	0,0000017	0,1068526	18,267982 E-08	0,0001009
0,3	1,74E-09	1,09E-04	0,0000190 E-08	4,959D-09
0,03	6,62E-11	4,10E-06	2,735D-16	2,920D-11

- Com a redução do adimensional L/hp, para o mesmo volume de material, todas as grandezas analisadas são reduzidas significativamente;
- A redução do adimensional b/hp resulta em deslocamento acentuado das frequências de ressonâncias para frequências maiores, situadas a esquerda dos diagramas apresentados.

É esperado do gerador piezelétrico a maior corrente e potência possível. Com base na análise realizada, as seguintes diretrizes do projeto devem ser seguidas:

- Assim, as dimensões do gerador piezelétrico devem ter maior valor do adimensional L/hp e b/hp;
- A variação do adimensional b/L não contribui significativamente para o desempenho do gerador;

6.3.4. Variação do volume de material piezelétrico do gerador

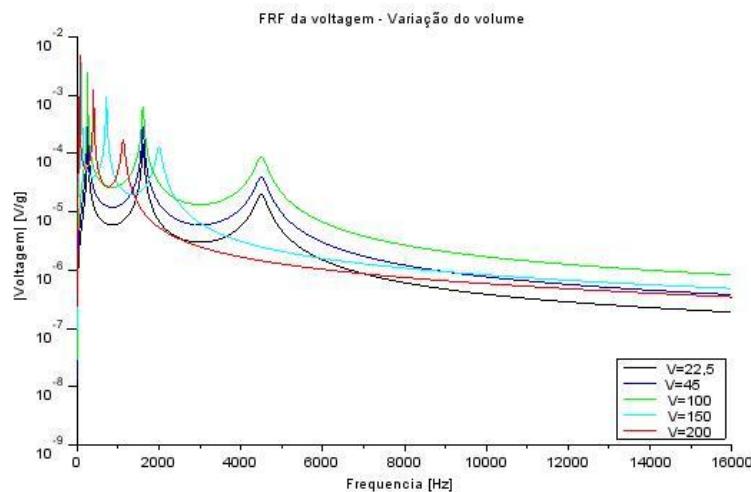


Figura 24 – Variação da voltagem em função do volume de material piezelétrico, para os valores 22.5, 45, 100, 150, 200 nas cores preta, azul, verde, azul claro e vermelho, respectivamente, para o intervalo de frequência de 0 a 15.000 Hz.

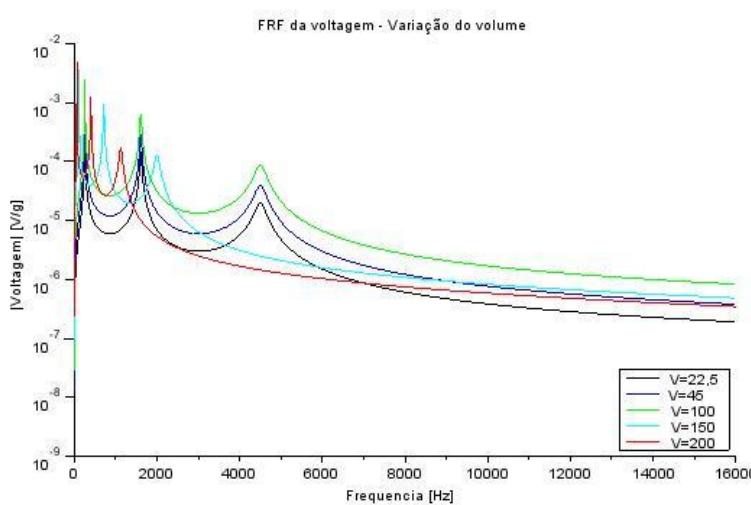


Figura 25 – Variação da corrente em função do volume de material piezelétrico, para os valores 22.5, 45, 100, 150, 200 nas cores preta, azul, verde, azul claro e vermelho, respectivamente, para o intervalo de frequência de 0 a 15.000 Hz.

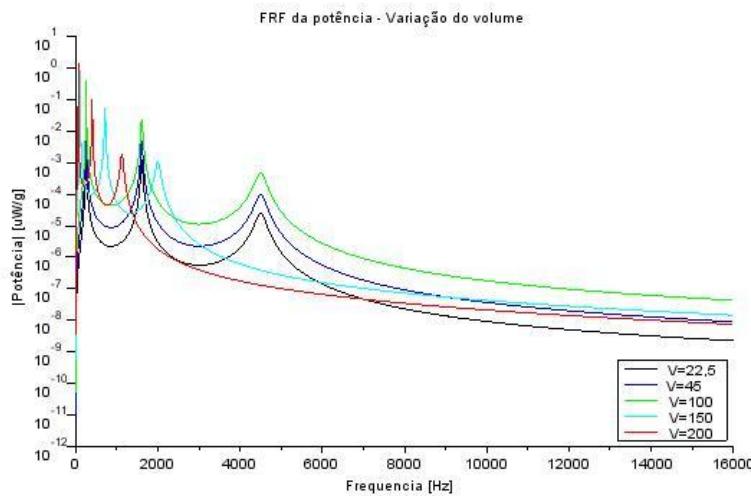


Figura 26 – Variação da potência em função do volume de material piezelétrico, para os valores 22,5, 45, 100, 150, 200 nas cores preta, azul, verde, azul claro e vermelho, respectivamente, para o intervalo de frequência de 0 a 15.000 Hz.

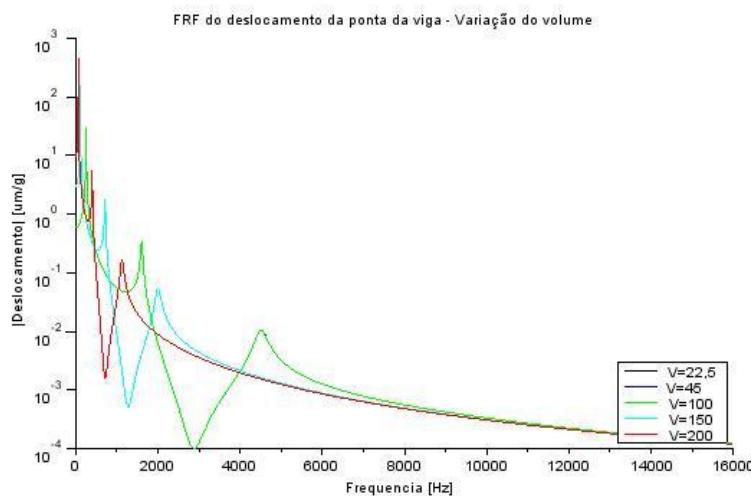


Figura 27 – Variação do deslocamento da ponta da viga em função do volume de material piezelétrico, para os valores 22,5, 45, 100, 150, 200 nas cores preta, azul, verde, azul claro e vermelho, respectivamente, para o intervalo de frequência de 0 a 15.000 Hz.

As Figuras 24, 25, 26 e 27 apresentam as variações da voltagem, corrente, potência e deslocamento da ponta da viga, respectivamente, para o volume da viga piezelétrica, cujos valores são variados em 22,5, 45, 100, 150 e 200. Nessas figuras a

amplitude da voltagem, corrente, potência e deslocamento são aumentados com o aumento do volume. Percebe-se também que o aumento do volume desloca as frequências de ressonância para valores menores.

Tabela 18 – Variação das grandezas analisadas em função do volume de material piezelétrico.

Volume (mm ³)	Voltagem (V)	Corrente (uA)	Potência (uW)	Deslocamento (um)
22,5	0,0005542	34,637882	0,0191965	29,985513
45	0,0011057	69,10477	0,0764075	29,911586
100	0,0024399	152,4939	0,3720702	29,732708
150	0,003673	229,56346	0,8431901	151,1189
200	0,0048828	305,17224	1,4900815	476,57821

- O aumento do volume do material piezelétrico contribui significativamente ao aumento da capacidade do gerador;
- A variação da espessura do material piezelétrico pouco contribui ao desempenho elétrico do gerador.

6.3.5. Variação da resistência ligada ao gerador piezelétrico

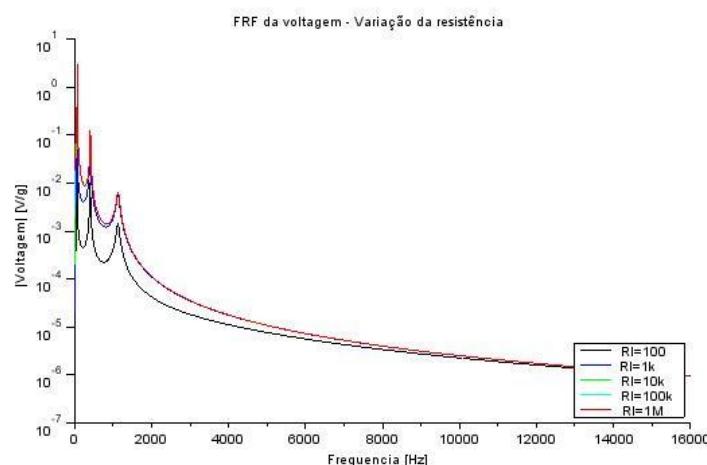


Figura 28 – Variação da voltagem em função da resistência ligada ao gerador, para os valores 100, 1k, 10k, 100k, 1M nas cores preta, azul, verde, azul claro e vermelho, respectivamente, para o intervalo de frequência de 0 a 15.000 Hz.

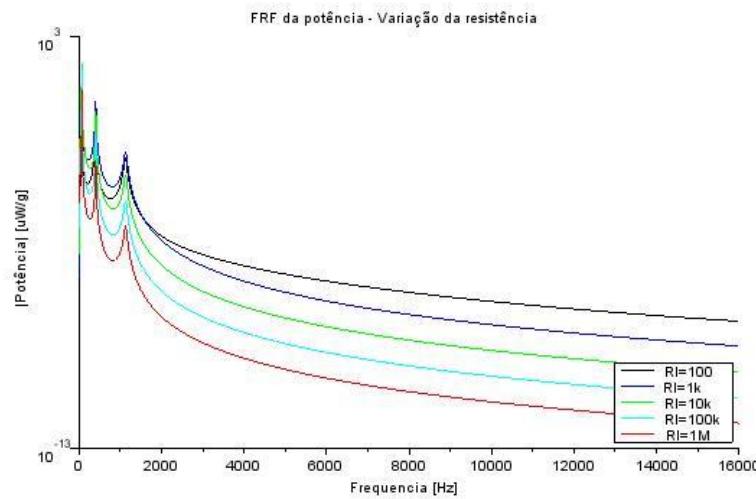


Figura 29 – Variação da potência em função da resistência ligada ao gerador, para os valores 100, 1k, 10k, 100k, 1M nas cores preta, azul, verde, azul claro e vermelho, respectivamente, para o intervalo de frequência de 0 a 15.000 Hz.

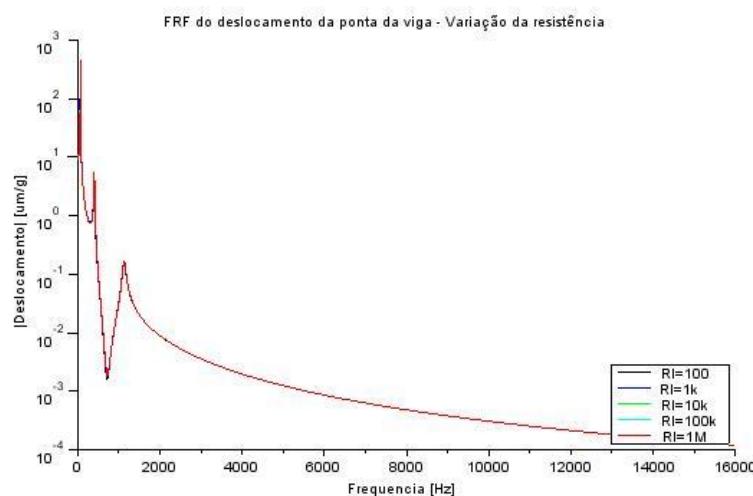


Figura 30 – Variação do deslocamento da ponta da viga em função da resistência ligada ao gerador, para os valores 100, 1k, 10k, 100k, 1M nas cores preta, azul, verde, azul claro e vermelho, respectivamente, para o intervalo de frequência de 0 a 15.000 Hz.

As Figuras 27, 28, 29 e 30 apresentam as variações da voltagem, corrente, potência e deslocamento da ponta da viga, respectivamente, para a resistência da carga, cujos valores são variados em 100, 1k, 10k, 100k e 1M. Nessas figuras, com o

aumento da resistência a amplitude da voltagem é aumentada, ao passo que a corrente se reduz. A potência e o deslocamento assumem um valor máximo e mínimo respectivamente para um valor único de resistência, situado próximo a 10k. Percebe-se também que o aumento do deslocamento não desloca as frequências de ressonância.

Tabela 19 – Variação das grandezas analisadas em função da resistência ligada ao gerador.

Resistencia	Voltagem (V)	Corrente (uA)	Potência (uW)	Deslocamento (um)
100	0,0396331	396,3311	15,707834	458,05399
1k	0,2830774	283,07743	80,13283	329,11458
10k	0,9384893	93,848926	88,076208	177,72972
100k	2,4361964	24,361964	59,350529	371,32127
1M	2,9647825	2,9647825	8,7899352	450,68751

- O aumento da resistência resulta em aumento da tensão de saída do gerador;
- Em contrapartida, o aumento da resistência acarreta em redução da corrente de saída;
- A potência tem um valor máximo situado entre a corrente média e tensão média;
- A variação da resistência pouco influencia na frequência natural da viga.

A Tabela 20 mostra em resumo as principais conclusões extraídas dos gráficos analisados.

Tabela 20 – Principais conclusões.

<i>Parâmetro</i>	<i>Efeito</i>
b/L	O comprimento contribuí mais para a eficiência de conversão do dispositivo, mas também aumenta a flecha da viga
b/hp	A espessura tem pouca influência na eficiência de conversão comparada com a largura da viga
L/hp	A espessura tem pouca influência na eficiência de conversão comparada com o comprimento da viga
Volume	O aumento do volume melhora a eficiência de conversão, desde que o volume seja alterado a partir do comprimento ou largura
Resistência	A resistência resulta em um compromisso entre voltagem e corrente. Como consequência, a potência apresenta um valor máximo único

6.4. Dimensionamento do gerador piezelétrico

6.4.1. Estimativa da intensidade dos ventos

Segundo o site “Balonismo viva!”, a altitude máxima que um balão meteorológico atinge não pode ser prevista teoricamente devido aos fenômenos aleatórios da atmosfera terrestre, mas em geral, o balão oscila entre 15.000 e 20.000 metros. Assim, a altitude para a estimativa da força motriz do “energy harvesting” será:

- $H_0 = 20.000 \text{ m.}$

A região de estudo escolhida será São Paulo, localizado na região sudeste brasileiro. A Figura 31, Figura 32 e Figura 33 representam os mapas da velocidade média do vento, fator de forma e rugosidade da região.

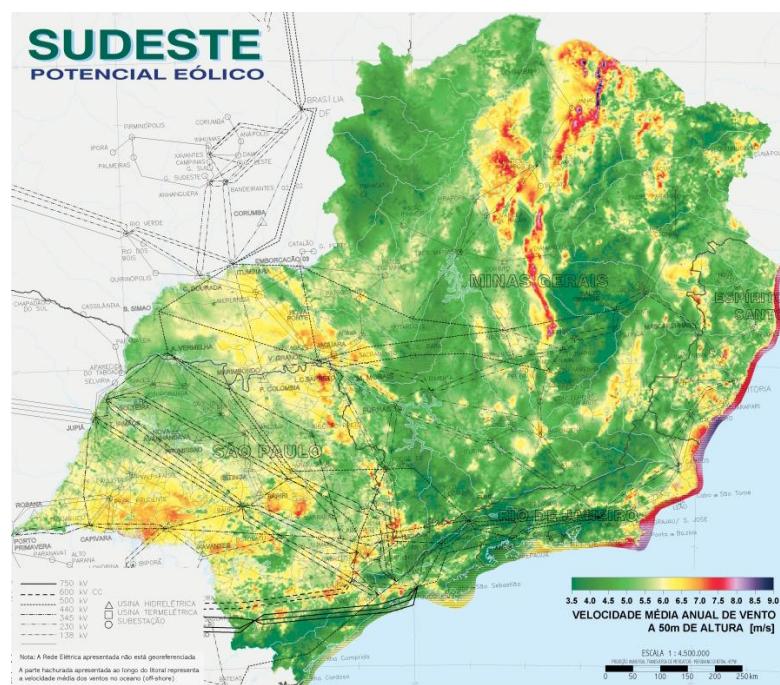


Figura 31 – Velocidade média anual da região sudeste, extraído do atlas do potencial eólico brasileiro.

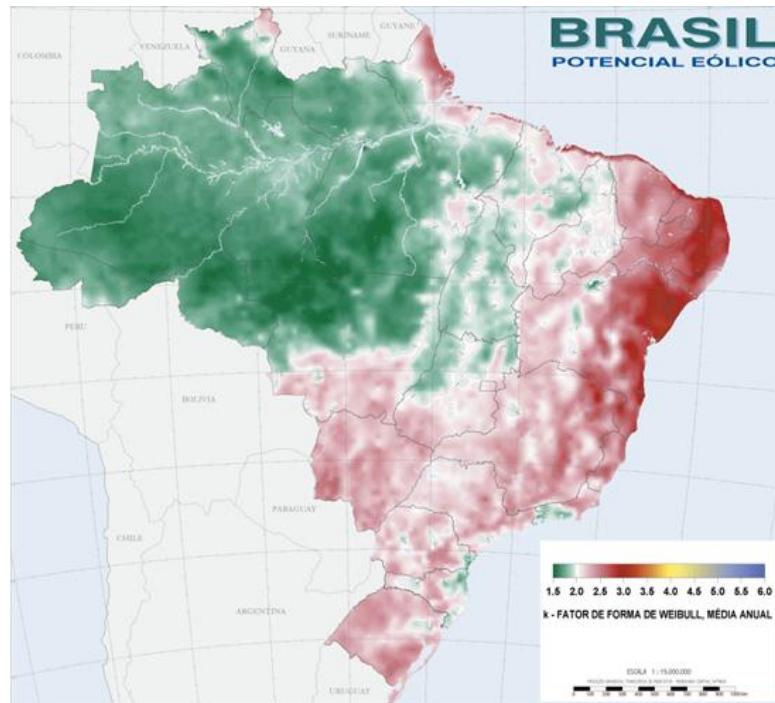


Figura 32 – Fator de forma de Weibull, extraído do atlas do potencial eólico brasileiro.



Figura 33 – Modelo da rugosidade, extraído do atlas do potencial eólico brasileiro.

Das figuras apresentadas, se extraí as seguintes informações que serão utilizadas no modelo:

- $\bar{u}(z_R) = 6,0 \text{ m/s};$
- $K = 2,5;$
- $z_0 = 1,8.$

Com os dados extraídos dos mapas do atlas eólico é possível estimar a velocidade média do vento na altura de 20.000 m do solo com o auxílio da eq.(38).

- $\bar{u}(20.000) = 16,8 \text{ m/s}.$

Utilizando a eq.(36) determina-se o fator de escala da distribuição de Weibull, que representa a função de probabilidade da velocidade do vento em São Paulo.

- $A = 18,9 \text{ m/s}.$

O fator de forma será considerado constante com a altura. Assim, a distribuição de probabilidade da velocidade do vento para São Paulo está apresentada na Figura 34.

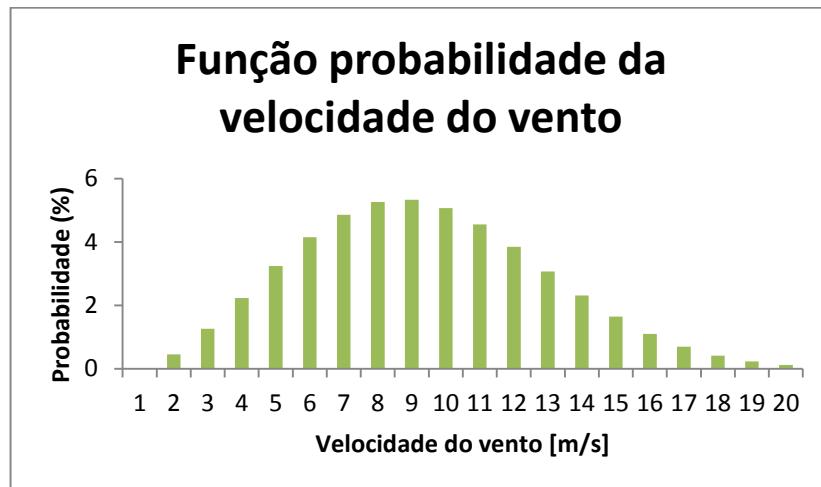


Figura 34 – Diagrama de Weibull do regime do vento a altura de 20.000 m da região de São Paulo.

Do gráfico apresentado na Figura 34 temos que a faixa de velocidade do vento de ocorrência mais provável é o intervalo entre 7 e 10 m/s. Para efeito de estimativa a velocidade do vento tomada para dimensionamento do projeto será:

- $V = 9 \text{ m/s}.$

6.4.2. Estimativa das dimensões da estrutura de coleta da energia eólica

As dimensões preliminares do gerador piezelétrico serão tomadas como as que maximizam a potência dos casos analisados na seção anterior, conforme a Tabela 19. Assim:

- $b = 30 \text{ mm};$
- $L = 60 \text{ mm};$
- $h_p = 0,15 \text{ mm};$
- $R_l = 10 \text{ k}\Omega.$

A frequência fundamental de vibração é obtida utilizando os parâmetros adotados na rotina de Scilab.

- $f_1 = 64,2 \text{ Hz}.$

A estrutura coletora de energia eólica é um cilindro solidário ao substrato de alumínio, fabricado por usinagem como peça única. Utilizando a eq.(39) com os parâmetros do vento apresentados se obtêm o diâmetro externo do cilindro.

- $d = 0,03 \text{ m}.$

Utilizando a eq.(40) se obtêm o comprimento do cilindro coletor de energia eólica:

- $L = 0,1 \text{ m}.$

6.4.3. Determinação do termo forçante

Da formulação matemática apresentada, o termo de excitação pode ser decomposto em duas componentes: a translação e rotação da base. Para o protótipo idealizado, apenas a translação da base será aproveitada.

Para a completa caracterização da excitação externa, será feita a seguinte hipótese:

- A excitação do desprendimento de vórtices é senoidal.

Igualando a eq.(39) com a relação do diâmetro do cilindro com a frequência natural resulta no diâmetro do cilindro, a frequência de excitação e a amplitude de oscilação, proveniente da relação empírica de KITAGAWA (1997).

- $f_{\text{excitação}} = 64,2 \text{ Hz};$
- $W_0 = 0,003 \text{ m}.$

6.5. Desempenho do dispositivo

Utilizando todos os parâmetros apresentados, será simulada a resposta temporal do dispositivo e serão apresentados os parâmetros do desempenho.

- Voltagem

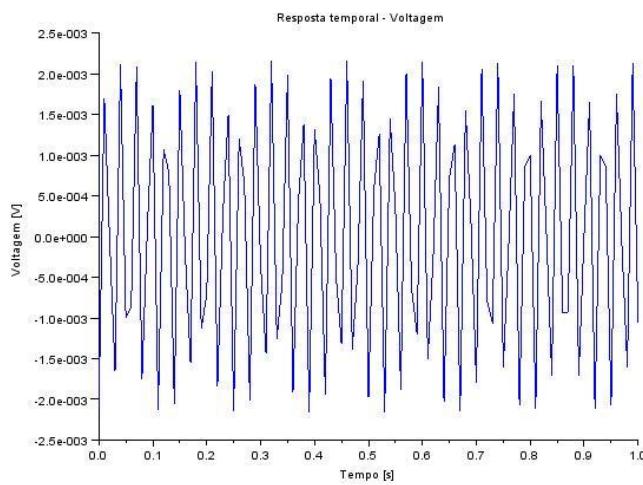


Figura 35 – Resposta temporal da voltagem.

- Corrente

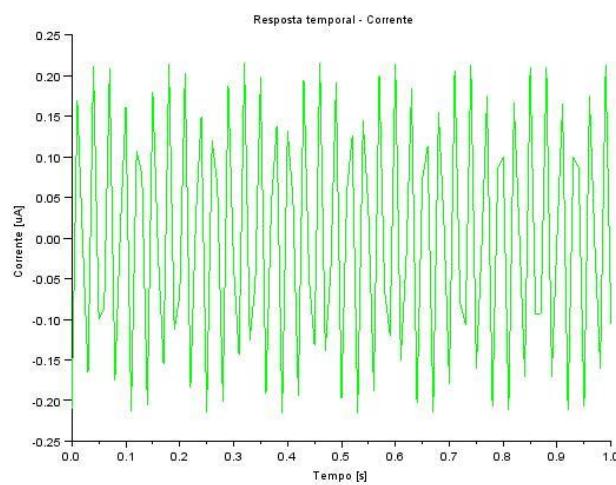


Figura 36 – Resposta temporal da corrente.

- Potência

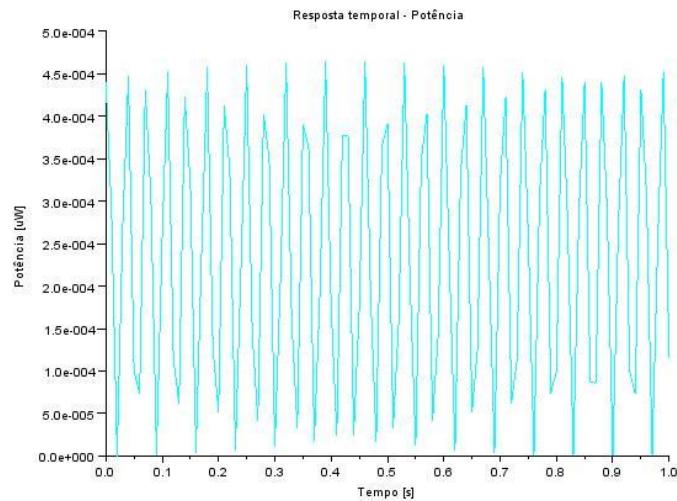


Figura 37 – Resposta temporal da potência.

- Deslocamento

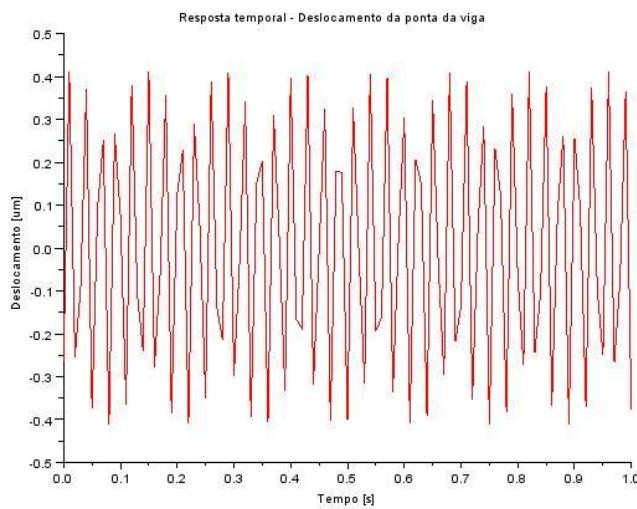
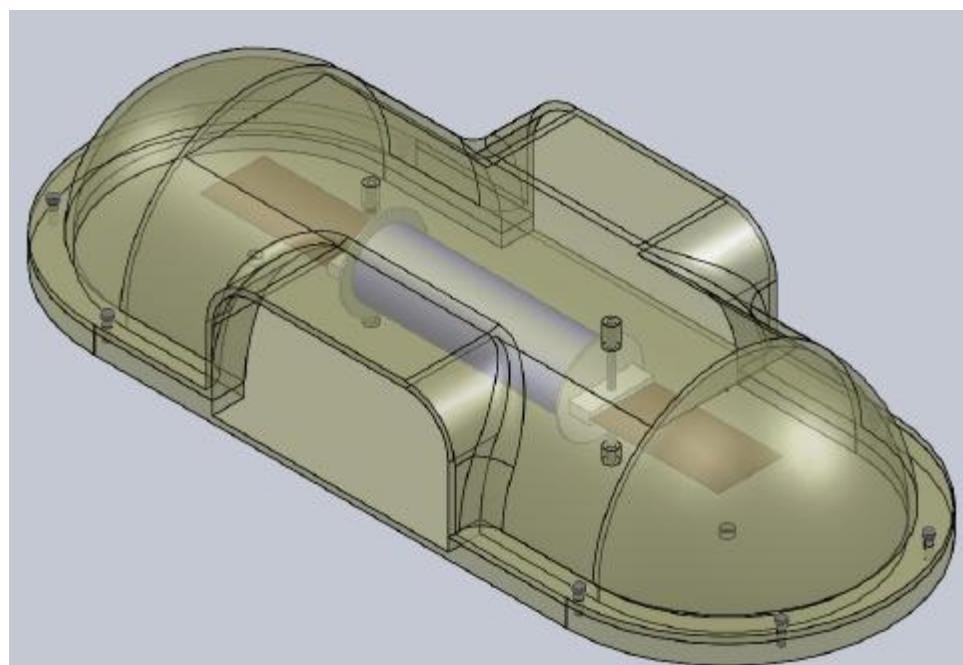
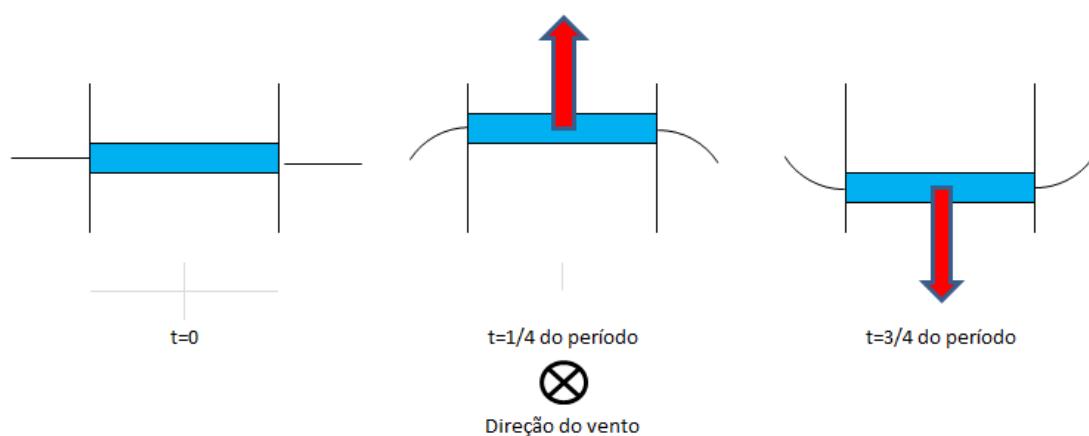


Figura 38 – Resposta temporal do deslocamento da ponta da viga.

O desempenho do dispositivo projetado está apresentado na Tabela 21. O esboço está apresentado na Figura 39 com seu funcionamento na figura 40.

Tabela 21 – Parâmetros de desempenho do dispositivo.

Parâmetro	Desempenho
Potência	$1,3 \times 10^{-9}$ W
Tempo de recarga	17222222 horas

**Figura 39 – Esboço da solução.****Figura 40 – Funcionamento do gerador piezelétrico.**

7. CONCLUSÕES E DISCUSSÕES

7.1. Discussões

O modelo matemático proposto por ERTURK (2009) é validado em seu trabalho e apresenta resultados condizentes com seus ensaios. Ao presente trabalho, os seguintes fatores podem resultar em desvios da resposta obtida por métodos numéricos e da resposta obtida por protótipos em operação nas condições nominais:

- A principal causa de desvio é o método de estimativa do amortecimento estrutural. O amortecimento reduz de modo considerável o desempenho do dispositivo. Para efeito de comparação, um aumento de 0,01 para 0,1 no coeficiente de amortecimento resulta em queda de desempenho de 70%. O agravante de tal efeito é que não existem métodos numéricos confiáveis de estimativa prévia do parâmetro, dado que o valor é muito sensível à montagem, fabricação, material, etc., necessitando a realização de ensaios para a correta avaliação do amortecimento, o que não é desejável na fase preliminar do projeto. No presente trabalho adotou-se o amortecimento proposto por ERTURK (2009), cujo valor é de 0,01, mas KITAGAWA (1997) apresenta valores experimentais para geometria semelhante de 0,2, o que significa que os valores apresentados nos resultados podem estar superestimados;
- Outra fonte importante de desvios é o processo de fabricação das cerâmicas piezelétricas. Segundo JORDAN e OUNAIRES (2001), a propriedade das cerâmicas, em um mesmo lote de fabricação, podem variar 5% no valor de suas constantes elásticas, 10% no valor de suas propriedades piezelétricas e 20% no valor das propriedades dielétricas;
- O fenômeno da vibração induzida por vórtices é outra fonte de desvios, uma vez que se trata de fenômeno turbulento e de difícil predição. Some-se a isso o comportamento distinto das vibrações em um a mesma velocidade de vento e não linearidade do vento resulta em desvios significativos à amplitude

proposta por KITAGAWA (1997). Além disso, não foi considerado outros fenômenos do vento, tais como o flutter, além do efeito do arrasto e sustentação no cilindro coletor. Tais fenômenos podem contribuir à excitação das lâminas piezelétricas, de modo que apenas a consideração das VIV na geração eólica subestima o desempenho do gerador;

- Na determinação das dimensões do coletor foi considerado apenas o cilindro como geometria. Desconsiderar a inércia das lâminas e suporte resulta em frequência natural de vibração superestimada. O efeito dessa aproximação, no entanto, é atenuado devido ao lock-in nas VIV, que garante o ajuste da vibração do coletor na frequência fundamental e à sua permanência neste regime;
- A estimativa do vento médio atuante no gerador piezelétrico propaga desvios tanto dos mapas eólicos, que já apresentam dados desatualizados, quanto da hipótese da camada limite de Prandtl para o comportamento do vento, que não leva em consideração diversos fenômenos atmosféricos, citados no livro de HOLTON (1992), como efeito das forças de Coriolis, forças devido à diferença de pressão em duas regiões, entre outros. Não é possível, no entanto, determinar se o vento médio está super ou subestimado.

7.2. Conclusões

- O presente trabalho propõe um método de dimensionamento preliminar de um gerador eólico piezelétrico;
- Neste trabalho, é feita a integração dos modelos de materiais piezelétricos, com os fenômenos das vibrações induzidas por vórtices e de ventos;
- O projeto é multidisciplinar, pois utiliza os conhecimentos de mecânica dos sólidos, para determinar a resposta dinâmica de uma viga Euler-Bernoulli; conhecimento de vibrações mecânicas, para dimensionar a estrutura de modo que esta responda no seu modo fundamental; conhecimentos de mecânica dos fluídos, para estimar a vibração e amplitude da excitação devido ao fenômeno das vibrações induzidas por vórtices; conhecimentos de eletricidade, para

determinar a resposta elétrica do sistema acoplado; conhecimentos de metodologia do projeto, para determinar parâmetros, propor solução e escolhê-las, entre outros;

- O trabalho cumpre seu objetivo de propor uma alternativa não-convencional ao aproveitamento da energia eólica e avaliar seu desempenho na geração de corrente, voltagem e potência, além de avaliar a potência média e o tempo de recarga de uma pilha AA. Além disso, a solução proposta é simples e de baixo custo;
- Utilizando as dimensões e parâmetros estimados, o desempenho do dispositivo não é satisfatório a ponto de reduzir a dependência dos MEMS de baterias. Porém, o desempenho pode ser melhorado caso mais iterações sejam feitas nas dimensões tanto das lâminas piezelétricas como no cilindro coletor de energia eólica, aumentando, assim, a eficiência do dispositivo;
- Com relação às contribuições do trabalho ao tema da geração piezelétrica destaca-se a avaliação da geometria no desempenho geral. Assim, conclui-se que as espessuras das lâminas piezelétricas pouco contribuem à geração de energia, ao passo que o aumento do volume, principalmente aumentando o comprimento da lâmina. A largura da lâmina tem influência intermediária dentre as dimensões do gerador;
- Outra conclusão, bastante conhecida no meio da geração piezelétrica, é a influência da resistência de saída no desempenho do gerador. O aumento desta contribui na voltagem de saída em detrimento da corrente gerada, o que é prejudicial à recarga de baterias. A potência, pelo fato de ser o produto da voltagem e da corrente, apresenta um máximo para um valor específico de resistência, o qual deve ser avaliado previamente no projeto do gerador;
- O presente trabalho também propõe um método de projeto e dimensionamento preliminar para geradores eólicos, pois determina as dimensões principais do protótipo e estima seu desempenho sem a necessidade de ensaios e utilizando informações disponíveis com relativa facilidade;
- Outra contribuição importante ao assunto, que se estende aos *energy harvesters* piezelétricos de modo geral é a proposição de um algoritmo de

estimação do desempenho de lâminas piezelétricas de configuração bimorph sem utilizar métodos de elementos finitos, como é prática comum na área. Assim, obtém-se informações importantes sem custo computacional significativo, sem simulações demoradas e sem a necessidade de software proprietário, pois utiliza como ferramenta o Scilab, que é um programa facilmente obtido na internet e de modo gratuito;

- Por fim, o autor acredita que a utilização de geradores piezelétricos ainda pode ser viável à geração de energia cujo alvo seja os MEMS, pois muitos trabalhos têm sido feitos nessa direção, conforme apresentados nas referências, sendo que diversos trabalhos experimentais têm se mostrado viáveis. Assim, embora os resultados não tenham sido satisfatórios, o desempenho real do protótipo pode ser melhor caso outras melhorias e otimizações sejam feitas.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALDABÓ, R. **Energia eólica**. Artliber Editora, São Paulo, 2002.

ALMEIDA, A. C.; LIMA Jr. J. J. **Comportamento de uma viga de Euler – Bernoulli com apoios amortecidos e rigidez variável**. Artigo do nono simpósio mecânica computacional, Universidade Federal de São João Del-Rei, MG, 2010.

AMARANTE, O. A., et al. Atlas do potencial eólico brasileiro. Brasília: MME; Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2001.

Balonismo viva! Disponível em: <http://balonismo.biz/content/view/104/79/>. Acessado em 27/01/2011 as 10:05.

CARVALHO, P. **Geração eólica**. Editora Imprensa Universitária, Fortaleza, 2003.

CASTRO, R. M. G.; UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA-INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO; **Introdução à Energia Eólica**; Energias Renováveis e Produção Descentralizada; DEEC / Secção de Energia; Lisboa; Janeiro; 2004.

ERTURK, A. **Eletromechanical Modeling of Piezoelectric Energy Harvesters**. Tese de doutorado em engenharia mecânica. Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, 2009.

FERREIRA, S. H. S., JUNIOR, H. C. **Tecnologia espacial na previsão do tempo.** Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. INPE, São José dos Campos, SP. 2002. Disponível em: http://www.dsr.inpe.br/vCSR/pdf/capitulo_5.pdf. Acessado em 25/01/2011 as 23:18 hrs.

FUJARRA, A. L. C. **Estudos experimentais e analíticos das vibrações induzidas pela emissão de vórtices em cilindros flexíveis e rígidos.** Tese de doutorado apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002, 234p.

HOLTON, J. **An introduction to dynamic meteorology.** Academic Press, San Diego, 1992, 3rd Edition.

LIU, X., MARSHALL, J.S. **Amplification of three-dimensional perturbation during parallel vortex-cylinder interaction.** Journal of Fluid Mechanics vol. 573, pags 457-478. United Kingdom, 2007.

JORDAN, T. L., OUNAIRES, Z. **Piezoelectric ceramics characterization.** NASA/CR-2001-211225: ICASE Report No. 2001-28. Virgínia, 2001.

KAMINSKI, P. C. **Desenvolvendo produtos com planejamento, criatividade e qualidade.** Editora Livros Técnicos e Científicos, São Paulo, 2000.

KITAGAWA, T. et al. **An Experimental Study on Vortex-Induced Vibration of a Circular Cylinder Tower at a High Wind Speed.** J Wind Engineering and Ind. Aerodynamics: 1997. Vol. 69-71, pags. 731-744.

KYMISSIS, J., KENDALL, C., PARADISO, J. and GERSHEFELD, N. **Parasitic Power Harvesting in Shoes**. Second IEEE International Symposium on wearable Computer, Outubro 19-20th, Pittsburg, PA, pags. 132-139.

Magenn Power Inc.-Wind power anywhere. **Technology**. Disponível em <<http://www.magenn.com/technology.php>>. Acesso em: 11 abr. 2010.

MAINIERI, F. B. **Caracterização dos recursos eólicos do campus Usp de Pirassununga**. Trabalho de conclusão de curso. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

MARTINS, F.R.;GUARNIERI,R.A.;PEREIRA, E.B. O aproveitamento da energia eólica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. 30: supl. 1 (2008). Disponível em <<http://www.scielo.br>>. Acesso em 18/04/2010.

PATEL, Mukund R. **Wind and solar Power systems: design, analysis, and operation**. CRC Press, New York, 2nd Edition, 2006, 433p.

PINHEIRO, L de M. **Estudos da geração eólio-elétrica levando em consideração as características dos ventos, seus aspectos probabilísticos e influência do terreno**. Monografia. Centro de tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

Revista brasileira de ensino de física. “The physics of mechanical oscillations in musical instruments”

<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-47442006000400004>. Acessado em 14/11/2010, as 10:10hrs.

Revista Nova Escola. Disponível em

<<http://revistaescola.abril.com.br/ciencias/pratica-pedagogica/energia-eolica-brasil-mundo-515979.shtml>>. Acesso em 24/04/2010.

SHEN, D. Piezoelectric energy harvesting devices for low frequency vibration applications. Tese de doutorado. Faculty of Auburn University, Auburn, Alabama, 2009.

Site Stoneman Solutions <<http://www.stoneman.co.uk/flowinduced.html>>. Acessado no dia 13/10/2010, as 13:36hrs.

Site ATCP <<http://www.atcp.com.br/>>. Acessado no dia 13/10/2010, as 14:45 hrs.

SODAMO, H. A., INMAN, D.J., and PARK, G. Estimation of electric charge output for piezoelectric energy harvesting. Strain, vol. 40, no. 2, pags. 49-58, 2004.

SODAMO, H. A., MAGLIULA, E. A., PARK, G. and INMAM, D. J. Electric power generation from piezoelectric materials. The 13th International Conference on Adaptive Structures and Technologies, 7-9 Outubro, Potsdam, Berlim, Alemanha, 2002.

STARMER, T. **Human-powered wearable computing**, IBM Systems journal, vol 35, pags. 618-628, 1996.

The weather doctor. Disponível em

<http://www.islandnet.com/~see/weather/almanac/arc2005/alm05jul.htm>. Acessado em 26/01/2011 as 07:40hrs.

TOIT, N. E. **Modeling and Design of a MEMS Piezoelectric Vibration Energy Harvester**, MSAA Thesis at MIT, 2005.

ZHU, M., WORTHINGTON, E., NJUGUMA, J. **Analyses of power output of piezoelectric energy-harvesting devices directly connected to a load resistor using a coupled piezoelectric-circuit finite element method**. IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control, vol. 56, no. 7, pags 1309-1318, 2009.

ANEXO A

Criação de alternativas

Para a criação de alternativas será utilizado o método de criatividade individual da análise de características, apresentado no livro do profº Kaminski. Segundo esse método, selecionam-se atributos adequados ao objetivo da análise e, em seguida, se propõe variações para esses atributos aleatoriamente. O resultado são combinações novas, mas também combinações impossíveis, que devem ser imediatamente descartadas.

Na Figura A1 foi apresentado como o sistema dos aerogeradores pode ser dividido. Essa figura está reapresentada abaixo. Convém lembrar que, embora a estrutura de suporte não esteja apresentada na figura, ela será considerada também.

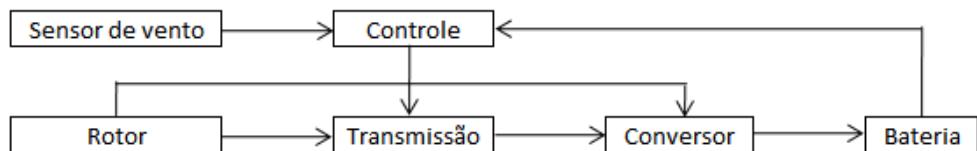


Figura A1 – Diagrama de bloco de um sistema eólico, extraído do livro de CARVALHO.

Assim, os atributos envolvidos no projeto de geração eólica, que são adequados ao objetivo da análise, são:

1. Conversão da energia eólica em mecânica;
2. Transmissão da energia mecânica ao conjunto gerador;
3. Conversão da energia mecânica em elétrica;
4. Estrutura de suporte.

O restante dos subsistemas não contribui para a criação de uma solução inovadora.

A etapa seguinte do método é realizar a variação das características:

1. Conversão da energia eólica em mecânica:

Rotores: É o principal mecanismo para o atributo analisado atualmente, sendo largamente empregados em turbinas eólicas convencionais. Os rotores atuais se dividem pelo número de pás e pela orientação do eixo. Para a aplicação do método, serão utilizadas duas configurações e mais uma ultima, que embora não seja rotor, desempenha a mesma função:

- Três pás e eixo vertical, o mecanismo de maior eficiência atualmente;
- Várias pás e eixo transversal, atributo criado;
- Membrana.

2. Transmissão da energia mecânica ao conjunto gerador:

Transmissão direta: O mecanismo de conversão de energia eólica em mecânica é ligado diretamente ao conjunto gerador de energia elétrica. Serão consideradas duas transmissões diretas:

- Com eixo;
- Sem eixo.

Utilizando sistemas de transmissão: São utilizados mecanismos de transmissão que possuem a característica de modificar as condições de torque e rotação de entrada. Serão considerados os seguintes mecanismos de transmissão:

- Transmissão por engrenagens;
- Transmissão por polias e correias.

3. Conversão da energia mecânica em elétrica:

Geradores: Os geradores são equipamentos que utilizam da energia mecânica como fonte de uma tensão elétrica que resultará na produção de energia. O

princípio que se dá essa conversão caracteriza o tipo de gerador. Serão considerados três tipos de geradores:

- Geradores de indução tipo gaiola;
- Geradores piezelétricos.

4. Estrutura de suporte:

Torres: São estruturas que sustentam o conjunto gerador para localidades onde os ventos são mais freqüentes e intensos.

Outras estruturas de suporte:

- Dirigível ligado ao solo por cabo de transmissão de energia elétrica.

Determinados os atributos que serão combinados, a etapa seguinte do processo de criação de alternativas é realizar todas as combinações possíveis e filtrar aquelas que sejam inviáveis ou que não contribuam para o objetivo do exposto. A Tabela A1 mostra como os atributos podem ser combinados.

Tabela A1 – Atributos a serem combinados.

Conversão de energia eólica em mecânica	Transmissão	Conversão de energia mecânica em elétrica	Estrutura
1.a) Três pás, vertical	2.a) Direta	3.a) Indução tipo gaiola	4.a) Torre
1.b) Várias pás, transversal	2.b) Engrenagens	3.b) Piezoelétrico	4.b) Dirigível
1.c) Membrana	2.c) Polia		
	2.d) Eixos		

Algumas alternativas possuem atributos incompatíveis entre si. Assim, não devem ser analisadas combinações que apresentem esses atributos em conjunto, tal como ocorre na combinação de utilizar membrana e transmissão por eixo, pois a membrana não produz torque, produz deformações. Outras combinações, porém, embora sejam viáveis, não serão consideradas, pois não contribuem para o objetivo do projeto, que é criar alternativas inovadoras, como ocorre na combinação de rotor de três pás com transmissão por engrenagens com gerador de indução sustentado por uma torre, que é o tipo mais empregado nas turbinas eólicas atuais.

Na Tabela A2 estão as alternativas não consideradas.

Tabela A2 – Alternativas não consideradas e o motivo.

1	2	3	4	Motivo
a	a	-	-	Inviável
b	a	-	-	Inviável
c	b	-	-	Inviável
c	c	-	-	Inviável
c	d	-	-	Inviável
c	-	a	-	Inviável
-	a	a	-	Inviável
-	b	-	b	Inviável
-	c	-	b	Inviável
a	b	a	a	Não é interessante
a	d	a	a	Não é interessante

Na Tabela A3 estão as alternativas que foram consideradas as mais interessantes ao propósito do projeto.

Tabela A3 – Alternativas escolhidas.

	1	2	3	4
Alternativa 1	a	c	b	a
Alternativa 2	b	d	a	b
Alternativa 3	c	a	b	b

- Alternativa 1: O funcionamento dessa alternativa consiste em captar energia eólica através de um rotor convencional de três pás, e a energia mecânica obtida seria transmitida através de polias e correias. Porém, essa correia seria composta por materiais piezoelétricos. O funcionamento de uma correia tem como característica suas extremidades serem tracionadas de modo diferente pela polia. Essa diferença também significaria diferença entre a deformação, gerando corrente elétrica. O conjunto estaria suportado por uma torre, que o elevaria até uma altura de ventos favoráveis.
- Alternativa 2: Nesse caso, o rotor é um eixo transversal que apresenta várias pás, distanciadas entre si para que o escoamento seja o menos afetado possível. Diferente do rotor de três pás, o rotor em questão se baseia na ação do vento e não pela diferença de pressões, como ocorre com o rotor de três pás. A energia mecânica obtida é diretamente transmitida a um gerador de indução convencional que irá gerar a potência elétrica. O conjunto é suportado por um dirigível, o que permitiria ao conjunto atingir maiores altitudes e, com isso, regimes de vento melhores e mais estáveis.
- Alternativa 3: Nessa alternativa não há mais rotor, mas uma membrana coberta com material piezoelétrico em contato com o escoamento. O vento irá fletir a membrana, que assim se deformaria semelhantemente a uma viga sujeita a um carregamento distribuído. A diferença entre a deformação entre pontos consecutivos da membrana gera a corrente elétrica. O conjunto é suportado por um dirigível.

Análise pelos critérios: Será analisado o desempenho das alternativas propostas com relação aos critérios adotados. Para tanto, os componentes combinados foram avaliados separadamente e a nota final será o somatório das notas dos subsistemas. A avaliação tem um caráter qualitativo, pois não é possível analisar de modo quantitativo a alternativa com todas as incógnitas existentes, que só serão resolvidas no projeto executivo.

- Potência máxima extraída: Dentre as alternativas propostas, as que apresentam estrutura de dirigível e maior área varrida são as melhores, pois a estrutura de dirigível permite que o conjunto gerador esteja em elevadas

altitude, onde a intensidade do vento é maior, assim como a potência máxima extraída. O rotor de três pás permite área de contato maior que o eixo transversal e a membrana, o que também representa maior potência;

- Eficiência do rotor: Segundo a Figura A2, o melhor rotor é o de três pás. O eixo transversal pode ser considerado semelhante ao eixo vertical, com rendimento menor. A membrana, embora não seja um rotor, a avaliação será feita considerando esta como um, porém a eficiência será multiplicada pela eficiência do material piezoeletroico na conversão de energia de deformação em elétrica, aproximadamente 80%, o que a colocaria em desvantagem em relação às outras alternativas;

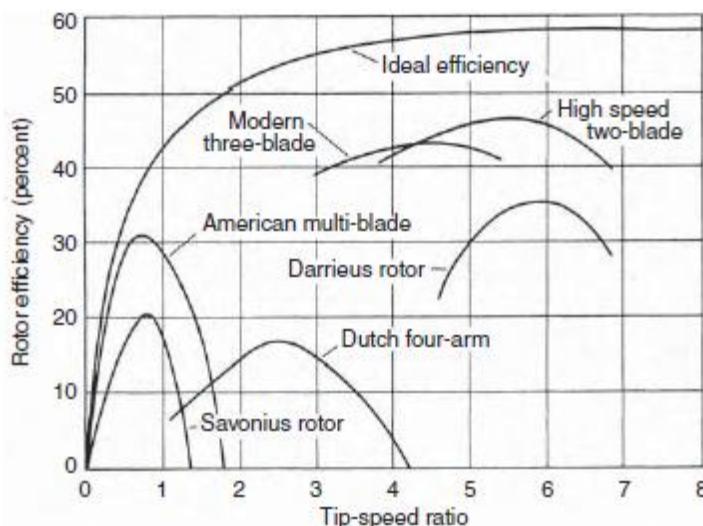


Figura A2 – Eficiência do rotor, extraído do livro de PATEL (2006).

- Qualidade de energia: As alternativas que apresentarem estrutura de dirigível serão as melhores nessa característica, pois o vento em elevadas altitudes apresenta menores variações, e, portanto, o fornecimento de energia eólica é mais contínuo, comparado com um sistema sustentado por uma torre, mais próximo ao solo e sujeito a maiores turbulências e inconstâncias;
- Sistema de controle: As alternativas que apresentam estrutura de dirigível serão as piores nesse requisito, pois necessitam, além do controle da condição de operação do rotor, controle do posicionamento da estrutura;

- Impacto ao meio ambiente: A presença de rotores representa um risco às aves que possam voar ao redor da estrutura pela depressão que esses causam. Assim, a membrana será a melhor nesse requisito;
- Custo: Quanto mais componentes forem necessários, mais custoso será a alternativa;
- Fabricação: Na Tabela A1 está a ordem de facilidade de construção. A dificuldade de fabricação de um componente não é apenas no processo envolvido, mas no número de vezes que esse processo deverá ser repetido, como ocorre com o rotor de varias pás ou a torre. O gerador, embora seja unitário, é o componente mais complexo de todos os apresentados. O dirigível necessita de vários processos, mas o nível de complexidade e a precisão desse não são maiores que o gerador, em comparação;

Tabela A4 – Dificuldades de fabricação.

	Dificuldade de construção	Processos necessários
Rotor de três pás	5	Corte e usinagem
Rotor de várias pás	8	Corte e usinagem
Membrana	1	Corte e fixação
Polias	4	Usinagem
Eixos	3	Torneamento
Gerador	10	Vários
Torre	7	Corte e montagem
Dirigível	6	Vários

- Inovação: Na Tabela A5 estão os componentes mais comuns para a aplicação e os mais inovadores.

Tabela A5 – Grau de inovação dos componentes.

	Inovação	Ocorrencia
Rotor de três pás	0	Convencional
Rotor de várias pás	2	Raro
Membrana	10	Inovador
Polias	5	Não convencional
Eixos	0	Convencional
Gerador	0	Convencional
Torre	0	Convencional
Dirigível	10	Inovador

Para finalizar, a Tabela A6 mostra a nota atribuída às alternativas propostas, que serão utilizadas na matriz de decisão.

Tabela A6 – Notas atribuídas às alternativas propostas.

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Potência máxima extraída	10	7,5	4
Eficiência do rotor	10	5	0
Qualidade da energia	0	10	10
Sistema de controle	10	0	0
Impacto ao meio ambiente	0	5	10
Custo	5	2	10
Processos de fabricação	6	3	10
Inovação	7	0	10

ANEXO B**ROTINA UTILIZADA NOS RESULTADOS**

//PROGRAMA QUE FAZ A ESTIMATIVA DA MÁXIMA CORRENTE E VOLTAGEM CORRESPONDENTE A
 //UM ENERGY HARVESTER PIEZELÉTRICO DO TIPO VIGA ENGASTADA COM CONFIGURAÇÃO BIMORPH
 //E LIGAÇÃO EM PARALELO

//DEFINIÇÃO DA AUTO-FUNÇÃO NORMALIZADA, SUA DERIVADA E PRIMITIVA

```
function [fi]=f(lambr,m,L,x)
  quir=(sin(lambr)-sinh(lambr))/(cos(lambr)+cosh(lambr));
  fi=sqrt(1/(m*L))*(-cosh(lambr*x/L)+cos(lambr*x/L)+quir*(-sinh(lambr*x/L)+sin(lambr*x/L)));
endfunction
```

```
function [dfi]=dfi(lambr,m,L,x)
  quir=(sin(lambr)-sinh(lambr))/(cos(lambr)+cosh(lambr));
  dfi=sqrt(1/(m*L))*(lambr/L)*(-sin(lambr*x/L)-sinh(lambr*x/L)+quir*(cos(lambr*x/L)-cosh(lambr*x/L)));
endfunction
```

```
function [Fi]=Fi(lambr,L,m,x)
  quir=(sin(lambr)-sinh(lambr))/(cos(lambr)+cosh(lambr));
  Fi=sqrt(L/m)*(1/lambr)*(-sinh(lambr*x/L)+sin(lambr*x/L)+quir*(-cosh(lambr*x/L)-cos(lambr*x/L)));
endfunction
```

//CONSTANTES DO PROBLEMA

hp=0.15*10^-3; //ESPESSURA DA LÂMINA PIEZELÉTRICA

hs=0.15*10^-3; //ESPESSURA DO SUBSTRATO

Rl=16; //RESISTÊNCIA LIGADA À SAÍDA DAS LÂMINAS

L=60*10^-3; //COMPRIMENTO DA LÂMINA

b=30*10^-3; //LARGURA DA LÂMINA

c11=61*10^9; //MÓDULO DE ELASTICIDADE DA LÂMINA
PIEZELÉTRICA SUJEITA A CAMPO ELÉTRICO CONSTANTE

Ys=70*10^9; //MÓDULO DE ELASTICIDADE DO SUBSTRATO

rop=7750; //DENSIDADE DA CERÂMICA PIEZELÉTRICA

ros=2700; //DENSIDADE DO SUBSTRATO

e31=-10.4; //É A CONSTANTE DE TENSÃO PIEZELÉTRICA EFETIVA

e33=13.3*10^-9; //PERMISSIVIDADE A TENSÃO CONSTANTE

Wo=0.005; //AMPLITUDE DA EXCITAÇÃO - TRANSLAÇÃO

tf=1; //DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS FÍSICOS DO SISTEMA

m=b*(ros*hs+2*rop*hp); //DETERMINAÇÃO DA MASSA POR UNIDADE DE COMPRIMENTO

```
theta=2*(e31*b/hp)*((hs^2)/4)-(hp+hs/2)^2); //DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE  
ACOPLAMENTO 'BACKWARD'  
  
Cp=2*e33*b*L/hp; //DETERMINAÇÃO DA CAPACITÂNCIA INTERNA  
DA PIEZO-CERÂMICA  
  
YI=(2*b/3)*((Ys*hs^3)/8+c11*((hp+hs/2)^3-(hs^3)/8)); //DETERMINAÇÃO DA RIGIDEZ A  
FLEXÃO DA VIGA  
  
//AUTOVALORES DO SISTEMA (APENAS É ANALISADO OS PRIMEIROS TRÊS MODOS  
  
lambr(1)=1.875104; //AUTO VALORES REFERENTE AO PRIMEIRO  
MODO DE VIBRAÇÃO  
  
lambr(2)=4.694091; //AUTO VALORES REFERENTE AO SEGUNDO  
MODO DE VIBRAÇÃO  
  
lambr(3)=7.854757; //AUTO VALORES REFERENTE AO TERCEIRO  
MODO DE VIBRAÇÃO  
  
//AMORTECIMENTO MECÂNICO  
  
amort(1)=0.1; //AMORTECIMENTO DO PRIMEIRO MODO DE  
VIBRAÇÃO  
  
amort(2)=0.12; //AMORTECIMENTO DO SEGUNDO MODO DE  
VIBRAÇÃO  
  
amort(3)=0.3; //AMORTECIMENTO DO TERCEIRO MODO DE  
VIBRAÇÃO  
  
//FREQUÊNCIAS NATURAIS DO SISTEMA  
  
omegar(1)=(lambr(1)^2)*sqrt(YI/(m*L^4)); //FREQUENCIA DE VIBRAÇÃO REFERENTE  
AO PRIMEIRO MODO  
  
omegar(2)=(lambr(2)^2)*sqrt(YI/(m*L^4)); //FREQUENCIA DE VIBRAÇÃO REFERENTE  
AO SEGUNDO MODO  
  
omegar(3)=(lambr(3)^2)*sqrt(YI/(m*L^4)); //FREQUENCIA DE VIBRAÇÃO REFERENTE  
AO TERCEIRO MODO
```

//DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS MODAIS

for i=1:3

thetar(i)=-e31*b*(hp+hs)*dfi(lambr(i),m,L,L); //DEFINIÇÃO DO TERMO DE ACOPLAMENTO ELETROMECÂNICO MODAL

quip(i)=theta*dfi(lambr(i),m,L,L); //DEFINIÇÃO DO TERMO DE ACOPLAMENTO ELETROMECÂNICO MODAL 'BACKWARD'

kr(i)=-0.5*e31*(hp+hs)*b*dfi(lambr(i),m,L,L); //DEFINIÇÃO DO TERMO DE ACOPLAMENTO ELETROMECÂNICO MODAL 'FORWARD'

end

//DETERMINAÇÃO DOS TERMOS FORÇANTES MODAL

for i=1:3

sigmar(i)=-m*(Fi(lambr(i),L,m,L)-Fi(lambr(i),L,m,0)); //TERMO FORÇANTE PARA TRANSLAÇÃO DA BASE

end

//DETERMINAÇÃO DAS FRF's

function [alfa]=alfa(w,thetar,sigmar,omegar,amort,Rl,Cp) //FUNÇÃO DA FRF DA VOLTAGEM

d=(%i*w*thetar(1)*sigmar(1))/(omegar(1)^2-w^2+;%i^2*amort(1)*omegar(1)*w)+(%i*w*thetar(2)*sigmar(2))/(omegar(2)^2-w^2+;%i^2*amort(2)*omegar(2)*w)+(%i*w*thetar(3)*sigmar(3))/(omegar(3)^2-w^2+;%i^2*amort(3)*omegar(3)*w);

n=1/Rl+;%i*w*Cp+(%i*w*thetar(1)^2)/(omegar(1)^2-w^2+;%i^2*amort(1)*omegar(1)*w)+(%i*w*thetar(2)^2)/(omegar(2)^2-w^2+;%i^2*amort(2)*omegar(2)*w)+(%i*w*thetar(3)^2)/(omegar(3)^2-w^2+;%i^2*amort(3)*omegar(3)*w);

alfa=d./n;

endfunction

function [betar]=betar(w,thetar,sigmar,omegar,amort,Rl,Cp,m,L)

```

d=(%i*w*thetar(1)*sigmar(1))./(omegar(1)^2-
w^2+%i*2*amort(1)*omegar(1)*w)+(%i*w*thetar(2)*sigmar(2))./(omegar(2)^2-
w^2+%i*2*amort(2)*omegar(2)*w)+(%i*w*thetar(3)*sigmar(3))./(omegar(3)^2-w^2+%i*2*amort(3)*omegar(3)*w);

n=1/Rl+;%i*w*Cp+(%i*w*thetar(1)^2)/(omegar(1)^2-
w^2+%i*2*amort(1)*omegar(1)*w)+(%i*w*thetar(2)^2)/(omegar(2)^2-
w^2+%i*2*amort(2)*omegar(2)*w)+(%i*w*thetar(3)^2)/(omegar(3)^2-w^2+%i*2*amort(3)*omegar(3)*w);

betar=(sigmar(1)-thetar(1)*(d./n))*(f(lambr(1),m,L,L))/(omegar(1)^2-w^2+%i*2*amort(1)*omegar(1)*w)+(sigmar(2)-
thetar(2)*(d./n))*(f(lambr(2),m,L,L))/(omegar(2)^2-w^2+%i*2*amort(2)*omegar(2)*w)+(sigmar(3)-
thetar(3)*(d./n))*(f(lambr(3),m,L,L))/(omegar(3)^2-w^2+%i*2*amort(3)*omegar(3)*w);

endfunction

```

//SIMULAÇÕES

//DETERMINAÇÃO DAS FRF

```
w=1:1:31500; //INTERVALO DE FREQUÊNCIAS
```

```
V=abs(alfa(w,thetar,sigmar,omegar,amort,Rl,Cp)); //DETERMINAÇÃO DA FRF DA
VOLTAGEM
```

```
I=abs(alfa(w,thetar,sigmar,omegar,amort,Rl,Cp)/Rl); //DETERMINAÇÃO DA FRF DA
CORRENTE
```

```
D=abs(betar(w,thetar,sigmar,omegar,amort,Rl,Cp,m,L)); //DETERMINAÇÃO DA FRF DO
DESLOCAMENTO DA PONTA DA VIGA
```

```
P=(1/Rl)*V^2; //DETERMINAÇÃO DA FRF DA POTÊNCIA
```

//DETERMINAÇÃO DA RESPOSTA TEMPORAL (EXCITAÇÃO NO MODO FUNDAMENTAL DE VIBRAÇÃO)

```
t=0:0.01:tf; //INTERVALO DE TEMPO
```

```
VT=real(alfa(omegar(1),thetar,sigmar,omegar,amort,Rl,Cp)*Wo*exp(%i*omegar(1)*t)); //DETERMINAÇÃO DA
RESPOSTA TEMPORAL DA VOLTAGEM
```

```
IT=(10^6)*(1/Rl)*VT; //DETERMINAÇÃO DA RESPOSTA TEMPORAL DA
CORRENTE
```

```
PT=(10^6)*(1/Rl)*VT^2; //DETERMINAÇÃO DA RESPOSTA TEMPORAL  
DA POTÊNCIA
```

```
DT=real((10^6)*betar(omegar(1),thetar,sigmar,omegar,amort,Rl,Cp,m,L)*Wo*exp(%i*omegar(1)*t)); //DETERMINAÇÃO  
DA RESPOSTA TEMPORAL DO DESLOCAMENTO DA PONTA DA VIGA
```

```
//ROTINAS DE PLOTAGEM DOS RESULTADOS
```

```
xset('window',1);  
  
plot2d('nl',w/(2*%pi),V);  
  
xtitle("FRF da voltagem","Frequência [Hz]", "|Voltagem| [V/g]");
```

```
xset('window',2);  
  
plot2d('nl',w/(2*%pi),I);  
  
xtitle("FRF da corrente","Frequência [Hz]", "|Corrente| [uA/g]");
```

```
xset('window',3);  
  
plot2d('nl',w/(2*%pi),P);  
  
xtitle("FRF da potência","Frequência [Hz]", "|Potência| [uW/g]");
```

```
xset('window',4);  
  
plot2d('nl',w/(2*%pi),D);  
  
xtitle("FRF do deslocamento da ponta da viga","Frequência [Hz]", "|Deslocamento| [um/g]");
```

```
xset('window',5);  
  
plot2d(t,VT);  
  
xtitle("Resposta temporal - Voltagem","Tempo [s]", "Voltagem [V]");
```

```
xset('window',6);  
  
plot2d(t,IT);
```

```
xtitle("Resposta temporal - Corrente","Tempo [s]","Corrente [uA]");

xset('window',7);

plot2d(t,PT);

xtitle("Resposta temporal - Potência","Tempo [s]","Potência [uW]");

xset('window',8);

plot2d(t,DT);

xtitle("Resposta temporal - Deslocamento da ponta da viga","Tempo [s]","Deslocamento [um]");

//DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE DESEMPENHO

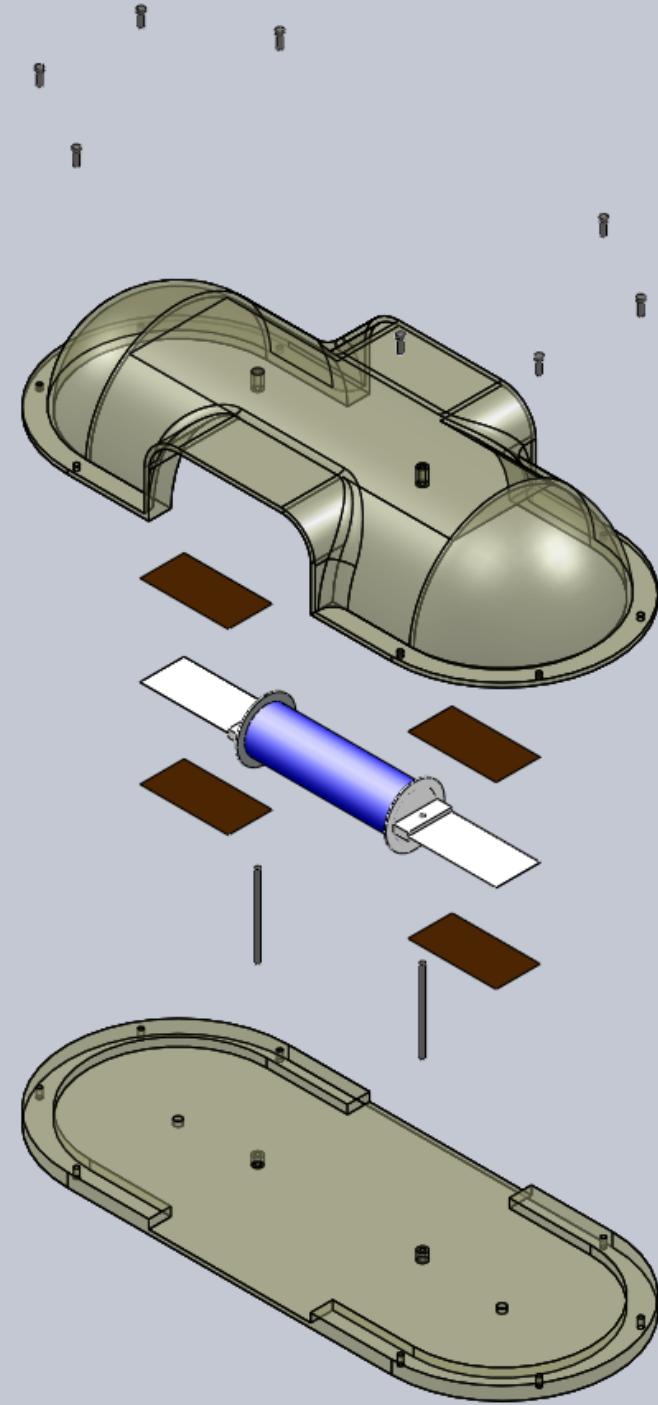
cargaseg=inttrap(t,abs(IT));                                //CORRENTE MÉDIA GERADA


tempo=7200/(cargaseg*10^-6)                                 //TEMPO DE RECARGA DE UMA PILHA AA

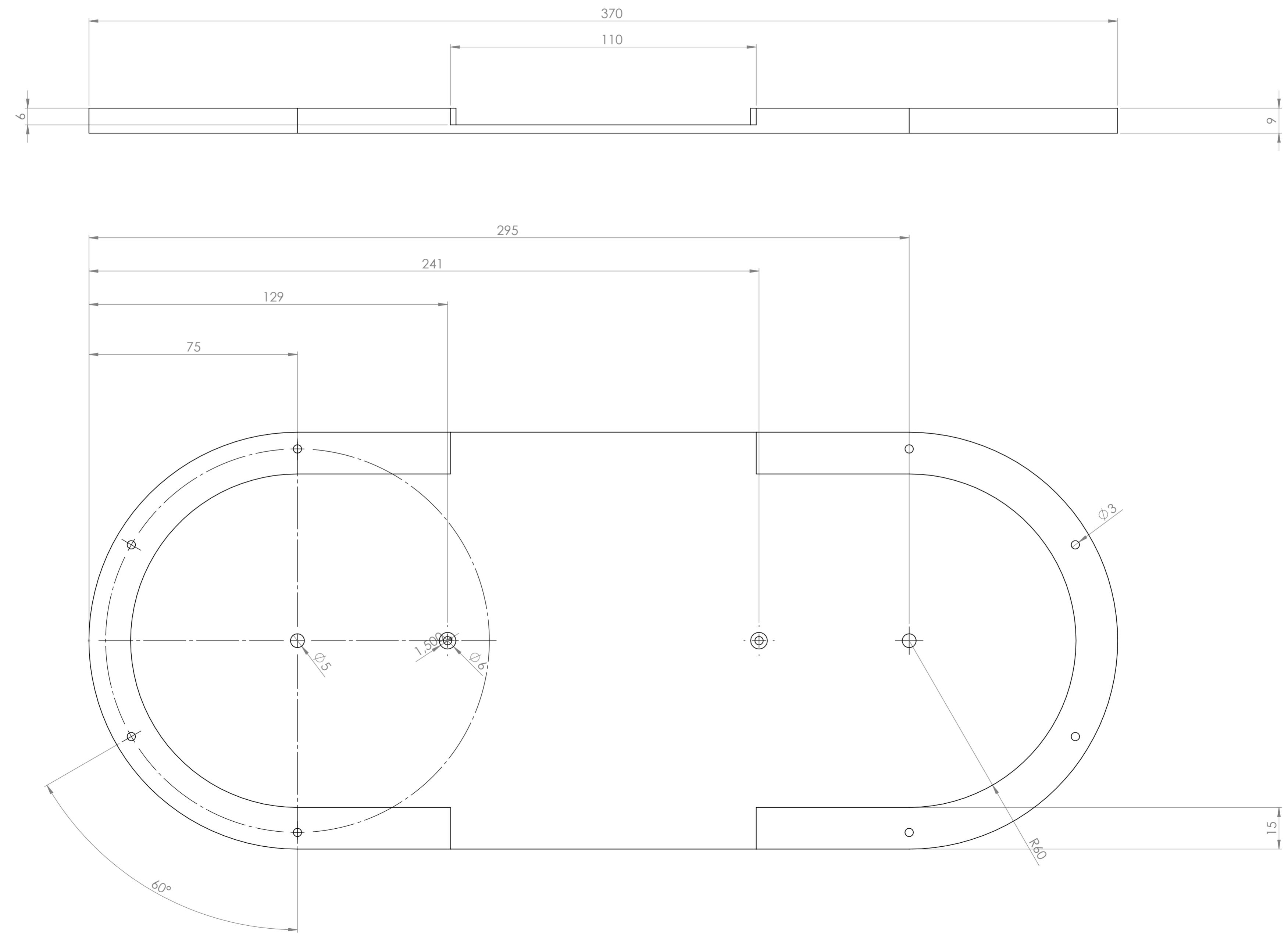
potencia=inttrap(t,PT)*10^-6                                //POTÊNCIA MÉDIA
```

ANEXO C

DESENHOS TÉCNICOS

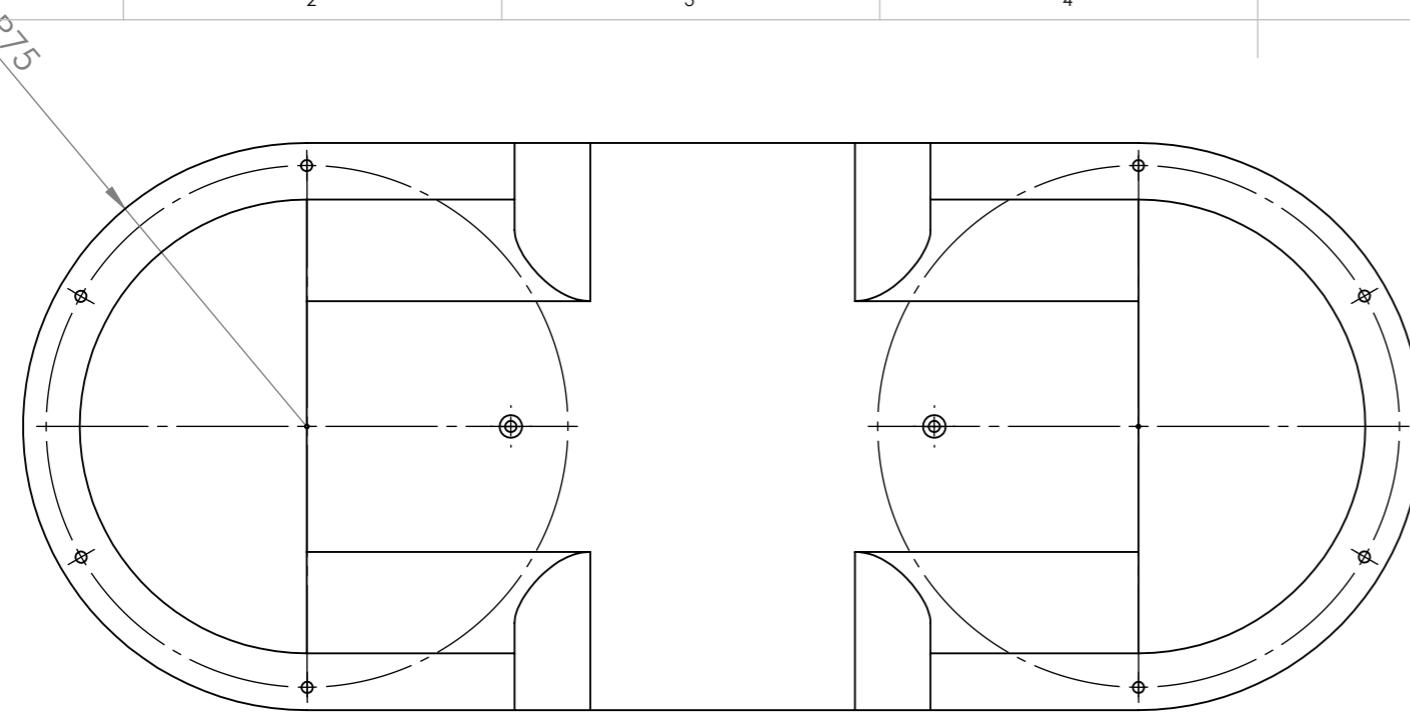




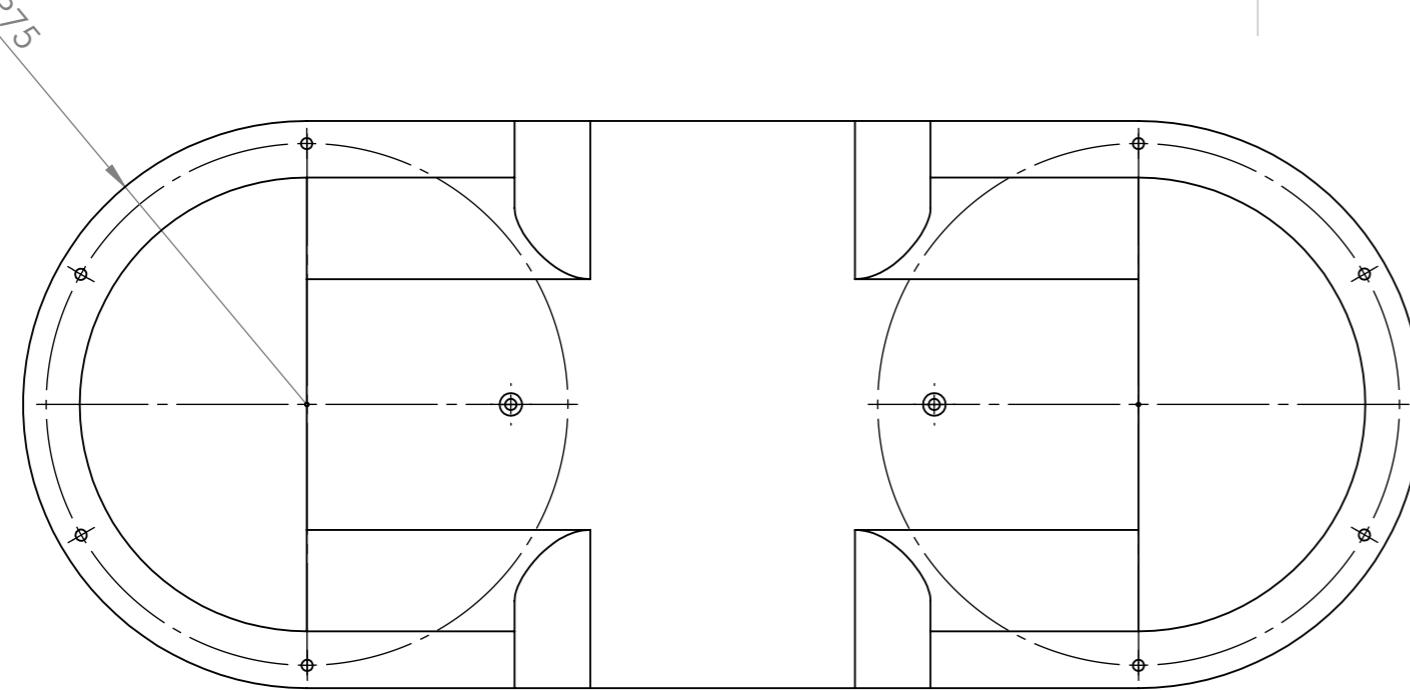


1 2 3 4 5 6 7 8

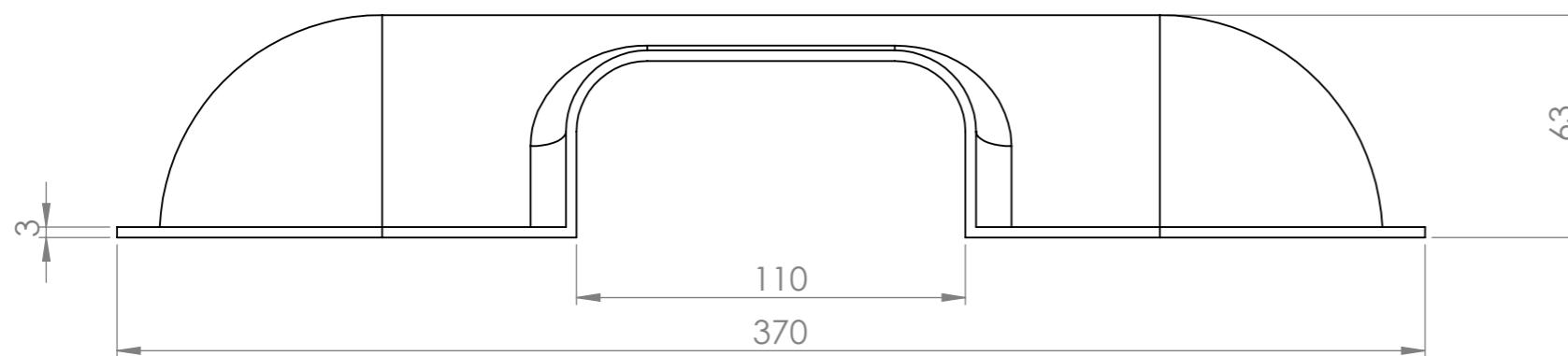
A



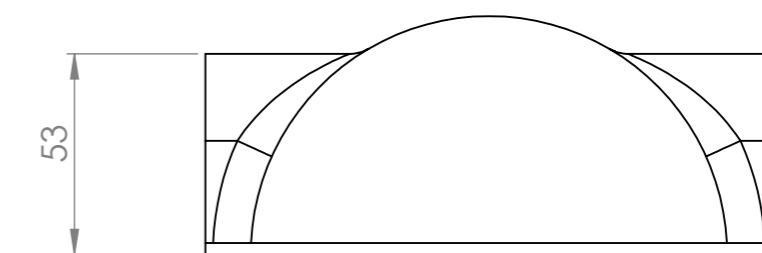
B



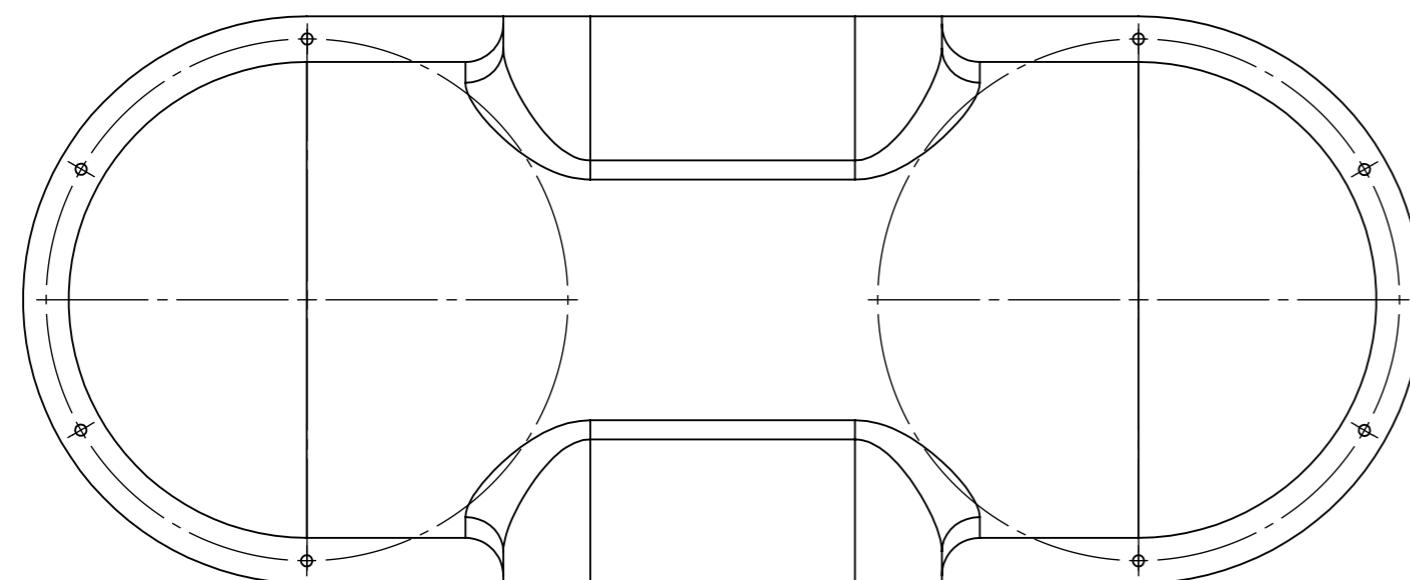
C



D



E



F

1 2 3 4

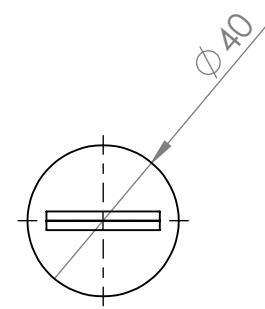
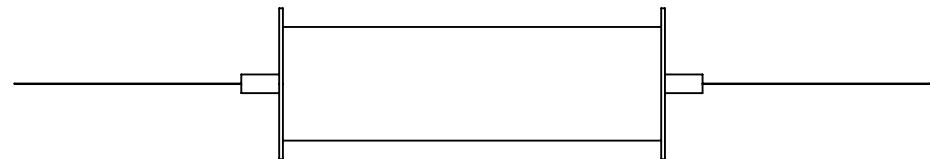
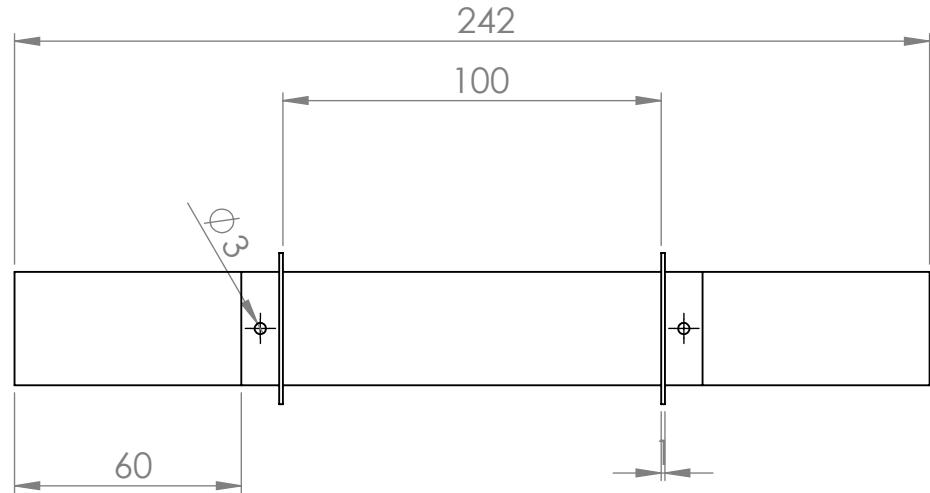
A

B

C

D

1 2 3 4 5 6



1 2

1

2

3

4

5

6

A

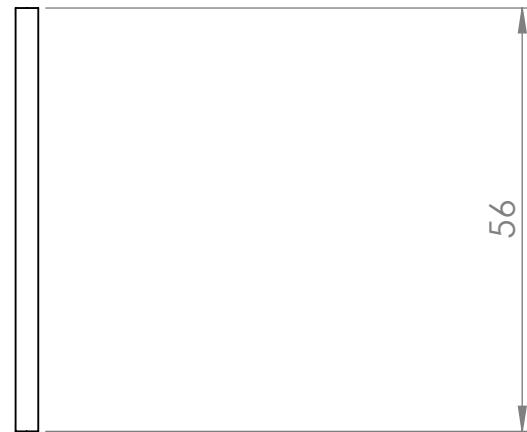
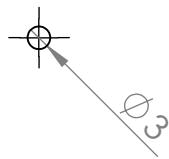
A

B

B

C

D



1

2

1 2 3 4 5 6

A

A

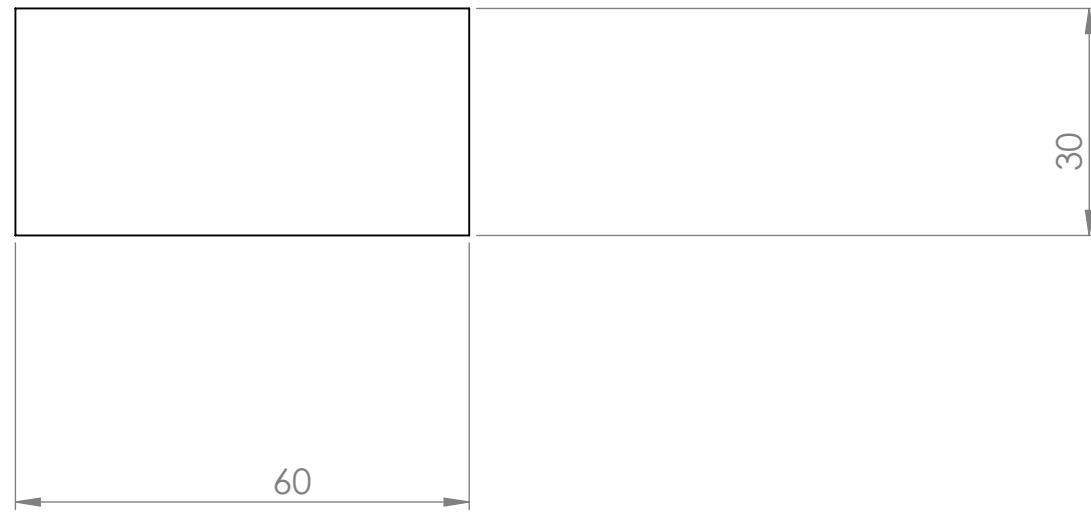
0,150

B

B

C

D



1 2

1 2 3 4 5 6

A

A

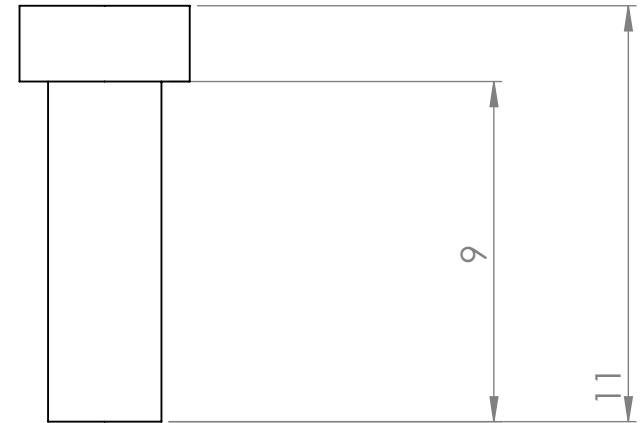
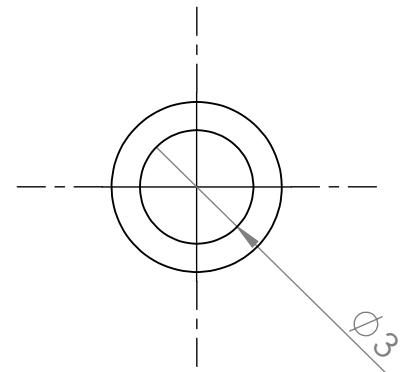
B

B

C

C

D



1 2 3 4 5 6