

PROJETO DE AEROGERADOR – UMA ABORDAGEM DISCIPLINAR

WIND TURBINE PROJECT – AN EDUCATIONAL REVIEW

Entrega dos originais à redação
em: 12/08/2021

Editoração em: 21/09/2023

Beatriz Perez

Engenharia Mecânica- IFSP Campus Piracicaba

Gabriel José Sanches

Engenharia Mecânica- IFSP Campus Piracicaba

Gustavo Maia Lopes

Engenharia Mecânica- IFSP Campus Piracicaba

Leonardo Marques Garcia

Engenharia Mecânica- IFSP Campus Piracicaba

Luís Henrique Vercelino

Engenharia Mecânica- IFSP Campus Piracicaba

Luiz Paulo Mendes

Engenharia Mecânica- IFSP Campus Piracicaba

O objetivo deste trabalho é desenvolver um projeto hipotético de um aerogerador com fins puramente didáticos, utilizando uma série de metodologias de inovação e solução de problemas, tais como o método KT, Princípio da solução inventiva (TRIZ), QFD, MATLAB™ e Método Ashby de seleção de materiais. Na introdução, será brevemente apresentada cada ferramenta utilizada neste trabalho, bem como a importância do mesmo para a formação do aluno. Na sequência, os materiais e métodos dissertará como foi aplicada cada ferramenta e sob qual perspectiva. Por fim, os resultados mostram que cada ferramenta foi aplicada para a solução de problemas teóricos com sucesso..

Palavras-chave: KT, TRIZ, QFD, MATLAB™, Metodo Ashby, Aerogerador.

The main goal of this study is to develop a hypothetical wind turbine project with an educational propose, using some tools to solve technical problems and guide innovative solutions for commercial products, as KT's method, the theory of inventive problem solving (TRIZ), QFD, MATLAB™ e Ashby's method. In the introduction, was briefly presented each tool used in this work, as their importance to the student education development. Later, in the Materials and Methods section, was presented how each tool was used and which criteria have been chosen. To finish, the results shown that each tool could be used to solve a theoretical problem with great success.

Keywords: KT, TRIZ, QFD, MATLAB™, Ashby'S Method, Wind Turbine.

1. INTRODUÇÃO

O projeto mecânico é um estudo amplo o qual possibilita englobar todas as matérias desenvolvidas no curso de Engenharia Mecânica (BUDYNAS; J., 2016). O gerenciamento de projetos é a área do conhecimento que usa de habilidades pessoais, ferramentas e teorias que tem por objetivo atender a um requisito específico (MACHADO, 2019).

Para um projeto de gerador eólico, o conhecimento de fatores como cinética dos ventos, aerodinâmica e conversão de energia são primordiais para o seu desenvolvimento, visto que a turbina eólica é um dispositivo mecânico que tem como objetivo converter a energia cinética presente nos ventos em energia elétrica. Diversos são os modelos existentes de aerogeradores, como por exemplo os geradores horizontais, verticais, oscilatórios e a escolha do modelo utilizado depende da sua aplicação e das necessidades do cliente.

Desta forma, o projeto de um aerogerador passa por inúmeras áreas do conhecimento. Sua eficácia depende de um efetivo gerenciamento de projetos (MACHADO, 2019). Existem inúmeras metodologias para solução e resolução de problemas encontrados no caminho de seu desenvolvimento.

Dentre as metodologias criadas para resolução de problemas, a análise KT é uma maneira eficaz para encontrar a possível causa raiz de um problema ocasionado por um evento atípico. Essa análise utiliza o método “é ou não é”. (KEPNER & TREGOE, 2008) Por outro lado, quando a resolução do problema raiz possibilita uma saída inovadora, a metodologia Triz é a mais adequada para este fim. Caracteriza-se pelo uso de tabelas de soluções de engenharia e de princípios inventivos (CARVALHO & BACK, 2001).

Além das resoluções de problemas para a inovação, se faz necessária uma análise de mercado e da concorrência. Para esta abordagem, o Desdobramento da função qualidade (QFD) é uma ferramenta simples e eficiente que possibilita unir a voz do cliente a competitividade do mercado. Ademais, para um completo desenvolvimento de qualquer projeto, se faz necessária a simulação de parâmetros que são essenciais para seu funcionamento e ajuste. Logo, softwares como MatLab™ são indispensáveis para o refinamento dos parâmetros projetados. Após as simulações, uma das decisões mais importantes de um projeto, de acordo com Norton (2013), é a escolha dos materiais, pois os materiais limitam os projetos. um dos critérios para se selecionar o melhor material em uma aplicação é analisando o Índice de mérito, fator este utilizado para maximizar as propriedades do produto final. Todas as metodologias citadas, fazem parte do conteúdo programático da disciplina de projetos de máquinas, ministrada por PANIAGO, A. (2021) no Campus Piracicaba do Instituto Federal de São Paulo e a prática destes métodos são de suma importância para o aprendizado do profissional de engenharia em formação.

Desta forma, o objetivo deste trabalho é, através da utilização das ferramentas, tais com KT, Triz, QFD, MatLab™ e metodologia de seleção de materiais de Ashby (2005), desenvolver com fins diádicos, o projeto hipotético de um aerogerador eólico.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 KT

A análise KT foi desenvolvida por Kepner e Tregoe (2008), que representa um método de auxílio no encontro dos problemas. Tal análise usufrui de uma metodologia estruturada para identificar, priorizar e avaliar os riscos para que então seja realizada a tomada de decisão. Portanto, em um hipotético aerogerador foi realizada uma manutenção preventiva (de rotina) em sua caixa de

engrenagens. No qual são realizadas a troca de lubrificantes das engrenagens, substituição dos rolamentos e calibração dos sensores de vibração. As peças substituídas foram recomendadas pelo fabricante. A equipe responsável pela manutenção de rotina sofreu um surto de COVID-19 e devido a isso, uma equipe substituta realizou o serviço em seu lugar. Então, um mês depois o sensor de vibração sinalizou uma trinca no anel externo do rolamento do eixo da gearbox (caixa de engrenagens).

Com a situação-problema descrita, a análise KT tem início. As perguntas foram feitas em quatro dimensões para especificar os problemas, “o que?” (identidade do problema); “onde?” (local do problema); “quando?” (tempo do problema); e por fim “quanto?” (que são a extensão e o tamanho do possível erro). E seus desfechos são apresentadas no tópico de análise de resultados do KT.

2.2 Metodologia de Inovação (TRIZ)

Altshuller (2007) apresentou uma teoria chamada de TRIZ, no qual apresenta os Princípios Inventivos (PI) e Parâmetros de Engenharia (PE). Neste projeto, busca-se uma solução para um problema no aerogerador, que se faz pelo elevado ruído das pás, portanto, espera-se reduzir com a utilização deste método para 60db's os ruídos emitidos.

O primeiro passo deve se basear na análise do Sistema Técnico (ST). Então, é realizado um questionamento, caso o usuário não deseje utilizar o Método das Contradições (MC), segue-se para a análise dos Princípios Inventivos que são escolhidos a critério do usuário. Caso contrário parte-se para um outro método de resolução, da mesma forma como foi realizada neste projeto de aerogerador.

Seguindo pelo método das contradições observa-se se quer melhorar ou reduzir, bem como eliminar o problema. A formulação para ambos os casos são semelhantes e devem ser: Identificação da característica desejada/indesejada a ser melhorada, neutralizada ou eliminada; Identificação da solução convencional; Identificação da característica prejudicada com o uso da solução convencional; Formulação da contradição técnica. Após isso, cabe ao usuário analisar a tabela de parâmetros de engenharia para escolher dois parâmetros no mínimo, para então montar uma Matriz de Contradições, que com ela ele encontrará quais os melhores princípios inventivos para a sua situação problema. (ALTSHULLER, 2007).

Com os PIs identificados, é preciso escolher entre os princípios sugeridos, qual o melhor que se adequa para a situação e com isso é realizada a aplicação dos princípios inventivos para solucionar as contradições, recomenda-se que se escolham dois princípios no mínimo, para que então se encontre bons resultados.

2.3 QFD

A fim de atender às características exigidas no projeto, tal como o baixo ruído e análise do mercado, foi aplicado o QFD, que é um método utilizado para converter requisitos e desejos do cliente em características de qualidade do projeto, produto e serviço. O QFD é geralmente utilizado como parâmetro de estudo e análise sobre um determinado projeto, através da chamada Casa da Qualidade, que compila os desejos do cliente com as características do produto ou projeto. Segundo Filho (2007) primeiramente é realizada uma pesquisa com o público-alvo sobre seus desejos e necessidades sobre o produto e serviço, após isso, essas opiniões são traduzidas em características do produto e são correlacionadas com fatores técnicos, atribuindo um grau de importância que varia de 0 a 9. Além disso, essas características são relacionadas entre si. Ademais, é realizada uma comparação entre o produto em desenvolvimento e a concorrência. Após essas três análises é encontrado qual deve ser o foco do projeto, ou seja, aquele que diante dessas análises possui o maior grau de importância.

Foi realizada uma reunião entre os alunos na qual foram pontuadas possíveis causas de reclamações de clientes e aprimoramentos no projeto inicial, que são passíveis de serem realizadas. Após as considerações iniciais, essas exigências dos clientes foram traduzidas para uma linguagem técnica e interpretadas como Qualidades exigidas (QE) (utilizadas posteriormente na Casa da Qualidade). Cada QE pode originar ao menos uma Característica da Qualidade (CQ) que são atributos necessariamente mensuráveis capazes de alterar a Qualidade Exigida. Para finalizar essa etapa inicial, foi atribuído um grau de importância (de 0 a 5) para cada item da qualidade exigida.

Uma vez determinadas os QE, CQ e os graus de importância, dá-se início na construção da Casa da Qualidade, na qual a Qualidade Exigida são colunas e a Característica da Qualidade são colunas. A seguir, foram relacionados todos os QE com os CQ atribuindo um valor de influência entre eles, com valores de 1 (baixa influência), 3 (média influência) ou 9 (alta influência), multiplicadas pelos respectivos valores de Grau de importância para cada QE. Por fim, são somados os valores para cada CQ para se obter o peso absoluto e relativo de cada CQ. Por fim, é feita uma segunda pesquisa, buscando informações de mercado que simulam o comportamento de diferentes empresas sob o mesmo produto, em que, novamente, é calculada o peso relativo de cada QE.

A partir dos pesos relativos calculados, é feita uma análise cujo a qual cria uma ordem de priorização de cada CQ, ou seja, indica qual característica da qualidade é mais influente sobre as exigências do cliente.

2.4 Simulação computacional

A utilização de softwares em projetos de engenharia é algo que está se tornando predominante, visto que o emprego de tais ferramentas sofreu um crescimento exponencial nos últimos 12 anos segundo uma pesquisa bibliográfica realizada por MACHADO, SILVA, CARVALHO (2021), envolvendo cerca de 25 artigos científicos relacionados com o tema.

Ademais, para a presente etapa do projeto foram utilizadas ferramentas computacionais específicas para modelagem matemática de uma situação teórica utilizando Python™, Excel™ e MatLab™/Simulink™ para analisar o comportamento de rotação das pás do aerogerador e as forças atuantes no conjunto.

O uso do Excel™ teve como premissa a necessidade de realizar uma regressão não linear para obtermos uma equação que relacione a velocidade do vento com as horas do dia por meio de dados coletados no período de 3 dias na cidade de Osório-RS (CLIMATEMPO, 2021), que é um dos maiores complexos de energia eólica do Brasil.

Outrossim, a linguagem de programação Python™ foi utilizada em conjunto com o Jupyter Notebook™, um ambiente de desenvolvimento interativo que permite organizar e separar partes específicas de um “*Script*” em células que são parcialmente independentes uma da outra. Tal característica foi fundamental para uma primeira abordagem, visto que também é possível fazer processamento de imagens, cálculos e plotagem de gráficos por meio de bibliotecas disponibilizadas na internet, sendo necessário apenas instalá-las utilizando o gerenciador de pacotes PIP, que por padrão é instalado junto com o Python™.

Por fim, para uma modelagem matemática mais elaborada e visual utilizou-se o Simulink™, pois com essa ferramenta em específico é possível utilizar a lógica de diagrama de blocos tornando mais fácil a compreensão do que se deseja simular e a relação existente entre cada variável do projeto, sendo essas representadas pela figura 1 e pelas equações apresentadas adiante.

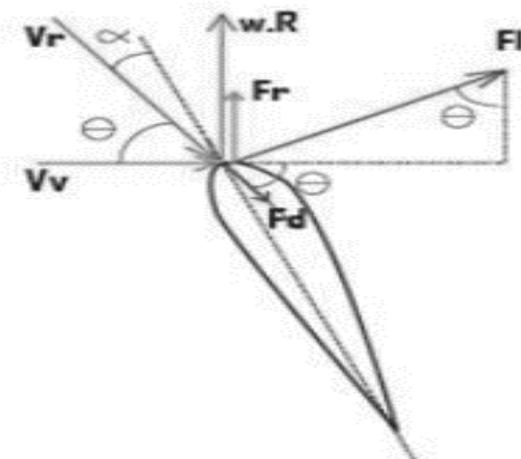


Figura 1 - Forças atuantes na pá de uma turbina Hawt horizontal

Fonte - SIMONSEN, H. (2009)

Equação 1

$$V_a = \sqrt{(w * r)^2 + V_v^2} \quad (1)$$

Equação 2

$$\theta = \alpha \tan\left(\frac{w * r}{V_{vento}}\right) \quad (2)$$

Equação 3

$$F_d = C_d * \frac{1}{2} * A * \rho * V_{aparente}^2 \quad (3)$$

Equação 4

$$F_l = C_l * \frac{1}{2} * A * \rho * V_{aparente}^2 \quad (4)$$

Equação 5

$$F_R = F_l * \cos \theta - F_d * \cos \theta \quad (5)$$

Em que:

V_a = velocidade aparente (m/s)

w = velocidade angular do rotor/pá (rad/s)

r = raio do rotor (m)

V_v = velocidade do vento (m/s)

α = ângulo de ataque

θ = direção da velocidade aparente

F_d = força de arraste (N)

C_d = coeficiente de arraste

A = área da pá (m²)

F_l = força de sustentação (N)

C_l = coeficiente de sustentação

F_R = força resultante (N)

2.5 Seleção de materiais

A seleção de materiais é um método muito eficaz para a construção sustentável de alguns componentes, pode ser então definida como uma seleção de produtos com intuito de obter, através de uma análise, um aumento da economia, diminuição do peso, melhores características mecânicas e entre outras coisas. A análise de seleção de matérias para o projeto proposto foi determinar um material para molas que suportam um gerador de uma turbina eólica. Dessa forma, de acordo com Ashby (2005), as molas vêm em muitos formatos e têm muitas finalidades, temos alguns tipos como

as molas axiais (por exemplo, um elástico), molas de lâmina, molas helicoidais, molas em espiral entre outras. Mas, independentemente de sua forma ou uso, o melhor material para uma mola é aquele que apresenta a menor massa.

Para isso, foi utilizado alguns métodos de análise em que podemos fazer uma seleção de materiais em projetos limitados por deformação elástica que é delimitada pelo módulo de Young's evidenciado pela equação 6 e pela deformação plástica que analisada a partir da resistência a fratura do material e evidenciada pela equação 7.

Equação 6

$$\delta = \frac{\sigma}{E} \quad (6)$$

Equação 7

$$K_{ic} = \sigma_f (\pi \alpha_c)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

Em que:

δ = Deformação (MPa)

σ = Tensão aplicada (MPa)

E = Módulo de elasticidade ou módulo de Young (Mpa)

K_{ic} = Resistencia a Fratura (Mpa*m^{1/2})

σ_f = amostra ou geometria da trinca

α_c = comprimento da trinca (mm)

A análise feita para a seleção de matérias do projeto proposto, foi realizado utilizando a ideia de projetos limitados por deformação plástica que utiliza a densidade do material como fator de cálculo. Com isso, para determinar as forças exercidas pela mola, foi determinado a força que a mola exerce e as condições de massa dado pelo volume e massa específica, a partir disso realizamos os seguintes cálculos para determinar o índice de mérito.

Para a fórmula de força da mola:

Equação 8

$$F = \frac{\pi d^3 \sigma}{32 \left(\frac{D}{2}\right)} \quad (8)$$

Partindo do pressuposto que massa é definida como sendo o produto do volume com a massa específica, é possível representar matematicamente a massa da mola por meio de suas dimensões conforme exposto pela equação 9.

Equação 9

$$m = \left(\frac{\pi * d^2}{4} \pi * D * N \right) * \rho \quad (9)$$

Logo, isolando o diâmetro do fio (d) das duas equações e substituindo a equação 8 e 9 temos a

seguinte equação:

Equação 10

$$m = N * \left(\pi^2 * D^{\frac{5}{2}} * 2F \right)^{\frac{2}{3}} * \left(\frac{\rho}{\sigma^{\frac{2}{3}}} \right) \quad (10)$$

Equação 11

$$IM = \left(\frac{\sigma^{\frac{2}{3}}}{\rho} \right) \quad (11)$$

Em que:

N = número de espiras ativas

D = diâmetro externo da mola (m)

d = diâmetro do fio (m)

F = força sobre a mola (N)

ρ = massa específica (kg/m³)

σ = densidade do material (Kg/m³)

m = massa da mola (Kg)

IM = índice de mérito

Essa seleção tem por finalidade identificar os melhores materiais que podem ser utilizados para o projeto tendo em vista a seleção dos que tem a menor massa e a o maior índice de mérito, que no caso é o índice determinado pela modulo que a força é exercida sobre o material e pelo fator custo em que é determinado pelo material mais barato com a menor massa. Assim, a seleção do projeto proposto terá o melhor material com a menor quantidade de massa possível e o menor gasto de componente. Foi utilizado a tabela de materiais de Ashby (2005) para determinar os melhores materiais para mola.

Uma vez selecionado os materiais, foi realizado o dimensionamento da mola com auxílio do Excel™, a fim de se obter dados operacionais do sistema, tais quais valores de tensão admissível, comprimento, deformação máxima e constante da mola. A base teórica utilizada neste dimensionamento foi retirada do livro do Shigley (1984). A base de dimensionado, foi realizada a partir das seguintes equações:

Equação 12

$$Y = \frac{8FD}{\pi d^3 G} \quad (12)$$

Equação 13

$$k = \frac{d^4 G}{8 D^3 N} \quad (13)$$

Equação 14

$$L_{\text{sólido}} = Nt * d \quad (14)$$

Equação 15

$$L_{\text{máx}} = \frac{F}{K} + L_{\text{sólido}} \quad (15)$$

Em que:

Y = Deformação da mola (mm)
 k= constante da mola (N/mm)
 F = força sobre a mola (N)
 D = diâmetro externo da mola (mm)
 d = diâmetro do fio (mm)

Nt = Número de espiras totais
 Lsólido = Largura nominal da mola (mm)
 Lmáx = Largura máxima da mola (mm)
 G = Modulo de elasticidade ao cisalhamento (GPa)

3. RESULTADOS

Serão apresentados os resultados obtidos para cada conteúdo em específico, englobando algumas considerações adotadas, tabelas formuladas pelos alunos e a aplicação prática de conteúdos absorvidos durante as aulas da disciplina de Projetos Mecânicos.

3.1 KT

Com a análise de resultados KT, foram desenvolvidas diversas situações e também respondidas todas as perguntas supracitadas na metodologia. Em primeiro plano, respondeu-se as perguntas para identificar o problema, e as respostas estão exibidas na figura 2:

	É	Não É	O que é distintivo a quanto...
Que	Que objeto apresenta defeito?	Que objeto não apresenta defeito, mas bem poderia apresentar ?	Apenas os rolamentos e as gaxetas foram substituídos
	Rolamento	Eixos, engrenagens, parafusos, vedações	
	Que defeito apresenta o objeto?	Que defeito não apresenta o objeto, mas bem poderia apresentar?	O anel externo fica com interferência na carcaça do redutor
	Anel externo do rolamento	Anel interno, elementos rolantes, vedação, gaiola	

Figura 2 - Perguntas e respostas referentes a identificação do problema ("o que?")
 Fonte - Elaborado pelos autores

Após identificar o problema, foi necessário encontrar os locais onde o objeto com defeito estão e em que lugar específico do objeto se observa o defeito. É realizado um levantamento respondendo às perguntas “é” e “não é”, como pode ser visto na figura 3.

	É	Não É	O que é distintivo a quanto...
Onde	Onde foi observado o objeto com defeito? (Geograficamente)	Onde não foi observado o objeto com defeito, mas bem poderia ter sido? (Geograficamente)	Houve apenas manutenção na caixa de engrenagens
	Na gearbox	No gerador, no eixo, nas hélices	
	Onde foi observado o defeito no objeto? (Física)	Onde não foi observado o defeito no objeto, mas bem poderia ter sido? (Física)	O rolamento demanda uma maior precisão de montagem e menor vida útil
	No rolamento	Nas engrenagens, nos parafusos, nas gaxetas.	

Figura 3 - Perguntas e respostas para encontrar o local do problema ("onde?")
 Fonte – Elaborado pelos autores

Partindo para a terceira etapa da análise e restringindo cada vez mais as possíveis causas, as perguntas respondidas foram referentes a “quando” ocorreu o problema. Para se ter um parâmetro temporal, foi adotado o acontecimento de uma manutenção preventiva conforme mencionado nos materiais e métodos, como mostrado na figura 4.

	É	Não É	O que é distintivo a quanto...
Quando	Quando foi observado o objeto com defeito? (Hora, dia) 30 dias após finalizado a manutenção	Quando não foi observado o objeto com defeito, mas bem poderia ter sido? (Hora, dia) Antes da manutenção	Houve um surto de Covid-19 uma semana antes da manutenção
	Quando foi observado o defeito no objeto? (Circunstância) Após o sensor de vibração acusar comportamento anormal do sistema	Quando não foi observado o defeito no objeto, mas bem poderia ter sido? (Circunstância) Logo após o término da manutenção	A mudança de estação causou um aumento considerável na velocidade dos ventos.

Figura 4 - Perguntas e respostas referentes ao tempo que ocorreu o problema ("quando?")

Fonte - Elaborado pelos autores

Para finalizar a análise foram respondidas as perguntas relacionadas com a quantidade de peças que apresentaram defeito e a quantidade de defeito apresentado pela peça, exibidas na figura 5.

	É	Não É	O que é distintivo a quanto...
Quanto	Quanto Objetos apresentaram defeito? (Quantidade) Apenas um rolamento	Quanto Objetos não apresentaram defeito, mas bem poderia ter apresentado? (Quantidade) O restante dos componentes da gearbox	N/A
	Quanto de defeito apresentou o objeto? (Extensão) O sistema fica inoperante após a quebra do rolamento	Quanto de defeito não apresentou o objeto, mas bem poderia ter apresentado? (Extensão) As pás não deixaram de girar	A quebra do rolamento impediu a transmissão de energia mecânica

Figura 5 - Perguntas e respostas referentes a extensão e tamanho do possível erro ("quanto?")

Fonte – Elaborado pelos autores

Em síntese, com os resultados desta análise é possível perceber que a quebra ocorreu em apenas um rolamento após um período de 30 dias de uma manutenção preventiva. Contudo, o sensor de vibração já evidenciou anormalidades depois da troca do rolamento, que foram aumentando gradativamente. Dessa forma, em conjunto com a substituição de alguns colaboradores da equipe devido as consequências geradas pelo COVID 19, pode-se concluir que a quebra do rolamento ocorreu por conta inexperiência por parte dos novos colaboradores no processo de montagem do rolamento no mancal.

3.2 TRIZ

Em primeira instância foram preenchidos os dados para elaboração do Sistema Técnico e por meio disso foram formuladas a matriz de contradições e coletados os parâmetros de engenharia adequados para a determinada situação que se deseja melhorar, conforme é visto no quadro 1 onde é mostrada a formulação matriz de condições e quadro 2 parâmetros de engenharia.

Quadro 1 – Formulação Matriz de contradições

Formulação da Matriz de Contradições Técnicas	
Identificação da característica indesejada a ser deduzida, eliminada ou neutralizada	Ruído que está superior a 60 dB quando o aerogerador está em funcionamento.
Identificação da solução convencional para reduzir, eliminar ou neutralizar característica indesejada	Encontrar os produtores de ruídos, para promover uma alteração na geometria com a finalidade de alterar sua aerodinâmica
Identificação da característica prejudicada com o uso da solução convencional	Complexidade do ST ou Reconstrução do ST.
Formulação da contradição técnica	Se for alterada a geometria da pá, com a finalidade de reduzir os ruídos emitidos pelo aerogerador, então a complexidade do ST aumentará.

Fonte – Elaborado pelos autores

Quadro 2 – Parâmetros de engenharia

Parâmetros de Eng.	36 (Complexidade de Objeto)
23 (Perda de Substância)	35
	10
	28
	24

Fonte – Elaborado pelos autores

Por meio dessa matriz de contradição, foi possível analisar o quadro 3, de Altshuller (2007), que trabalha as relações existente entre os PEs e os PIs, apresentado quais são os melhores resultados para essa intersecção de ideias.

Quadro 3 – Pi(s) Escolhidos

Pi(s) Escolhidos	
Numeração do PI	Significado numérico do PI
35	Mudança de Parâmetros e Propriedades
10	Ação Prévia
28	Substituição de Meios mecânicos
24	Mediação

Fonte – Elaborado pelos autores

A partir da determinação dos Princípios inventivos sugeridos pela matriz de contradição, o PI 24, de mediação e o PI 28, de substituição de meios mecânicos foram escolhidos para basear a solução proposta para o problema do barulho excessivo durante o funcionamento do aerogerador. Portanto, a aplicação dos princípios foi apresentada de duas formas:

1. Com uso da PI 24 (Mediação), foram identificadas as seguintes ideias: Colocação de um painel serrilhado que foi construído em softwares computadorizados. Tendo por finalidade modificar a aerodinâmica da saída de ar nas pás (redução da turbulência na borda da turbina). Essa modificação atende ao princípio inventivo 24, pois é utilizado um objeto intermediário (painel serrilhado), para realizar uma ação, que no caso é a redução do ruído (MARTINS, 2016).
2. Com uso da PI 28 (Substituição dos meios mecânicos), foram identificadas as seguintes ideias: Para aplicar o Parâmetro inventivo 28, será necessário a reconstrução do sistema físico. Portanto, para reduzir o ruído é preciso reconstruir a pá. A nova pá deve seguir o parâmetro da "Asa de Coruja", pois apresenta o menor ruído durante o seu funcionamento (MARTINS, 2016).

3.3 QFD

Os dados coletados na pesquisa interna com os clientes foram traduzidos para as qualidades exigidas, e a partir dessas qualidades foi possível obter as características da qualidade, tal como mostrado na Tabela 1. A essas qualidades exigidas, foram atribuídas um grau de importância, bem como o tipo da qualidade, tal qual o quadro 4. O maior grau de importância foi dado ao Ruído e ao baixo custo. Isso foi dado pois, para o cliente, o menor ruído representa maior conforto e o menor preço o agrada em todos os sentidos.

Tabela 1- Tabela de desdobramentos

TABELA DE DESDOBRAMENTOS				
Dados originais	Item exigido	Qualidade exigida	Característica da	Unidade de
Faz muito barulho	Funcionamento do gerador com menores níveis de ruído	menos Ruído	Decibéis	Db
Baixo rendimento	Aumento da eficiência energética	maior produção energética do gerador	Eficiência capacidade de torque ângulo de ataque Coeficiente de sustentação Coeficiente de arrasto	W/W N.m rad Adimensional Adimensional
É muito caro	Redução de custo	custo baixo	custo da aquisição custo de manutenção custo de instalação	R\$ R\$ R\$
Muito difícil de instalar sozinho	Facilidade de instalação	Prático de instalar	dimensões Massa	m Kg
Quebra muito fácil	Uso do produto por longos períodos	Durabilidade	Ciclo de vida	Anos
que seja seguro	Aumentar a Confiabilidade	maior segurança	Voltagem estável	Volts
É muito feio	Criar produto atrativo	atratividade visual	Design	escala sensorial

Fonte: Elaborado pelos autores

Quadro 4 -Ranking das qualidades exigidas

Qualidade exigida	Grau Import.	Tipo de Quality
menos Ruído	5	Atrativa
maior produção energética do gerador	4	Atrativa
custo baixo	5	Atrativa
Prático de instalar	3	Atrativa
Durabilidade	2	Óbvia
maior segurança	4	Óbvia
atratividade visual	1	Linear

Fonte: Elaborado pelos autores

Após isso, foi correlacionado essas características de qualidade com as qualidades exigidas. Foi atribuído um índice de influência dos parâmetros, tal como descrito na metodologia. Embora apresentasse a maior dificuldade técnica das características da qualidade, o maior peso relativo desta análise foi atribuído a Coeficiente de arrasto da pá, apresentando 12,57% de índice de influência. Desta forma, foi possível compreender que o coeficiente de arrasto é uma característica determinante para a escolha do aerogerador, pois está atrelada aos principais itens de qualidade exigidas pelo cliente que é menor ruído, maior produção energética do gerador e custo baixo. Em sequência, está a Capacidade de torque, com 9,78% de peso relativo. Isto por que esta característica da qualidade está relacionada com as qualidades exigidas de maior produção energética do gerador e maior segurança.

Por fim, a análise de mercado atribuída neste trabalho é apresentada na Tabela 2. Nela é possível observar que o concorrente 1 possui atratividade mediana aos clientes, sobretudo devido ao índice adquirido na quantidade de ruído e de custo (maiores Graus de importância). Já o concorrente 2 é mais atraente ao cliente devido suas altas atribuições em relação ao ruído e a produção energética, porém é o mais caro dentre todas as empresas analisadas. Examinando o plano de melhoria em função dos concorrentes e o argumento de venda, é entendido que a diminuição do ruído é a principal qualidade exigida que deve ser alterada, apresentando 40,43% de peso relativo quando comparado com as outras qualidades. Isso se dá principalmente por que o atual índice de ruído da empresa em análise é o maior dentre todas as examinadas. Em segundo lugar, com peso relativo de 20,22%, se encontra o aumento da segurança, já que também possui grande grau de importância e baixo índice

de segurança no projeto inicial da empresa hipotética em análise.

Tabela 2: Análise de mercado

Avaliação competitiva				
G.I.	Qualidade exigida	Empresa em análise	Concorrente1	Concorrente2
5	menos Ruído	1	3	4
4	maior produção energética do gerador	3	4	4
5	custo baixo	5	3	1
3	Prático de instalar	1	4	4
2	Durabilidade	3	3	1
4	maior segurança	2	3	3
1	atratividade visual	4	1	4

Fonte: elaborado pelos autores

A partir dos resultados obtidos, percebeu-se que a alteração do coeficiente de arrasto da pá resultará em um aerogerador mais chamativo aos clientes, uma vez que corrobora com os principais itens de qualidade exigidos pelo mesmo, tal qual o ruído do produto e sua eficiência energética.

3.4 Simulação computacional

Temos a apresentação esquemática do sistema desenvolvida no software Simulink™, na figura 6 que seria parte principal para explorar visualmente as variáveis e como elas se comportam com o tempo.

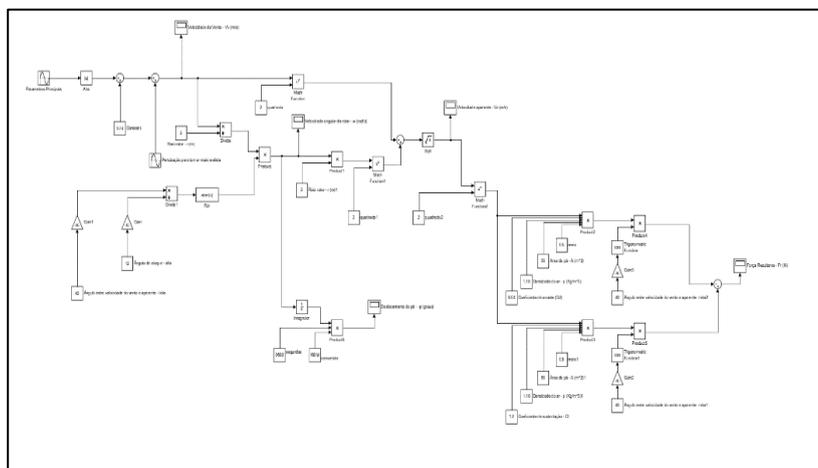


Figura 6 - Modelagem no Smulink™

Fonte – Elaborado pelos autores

Para alcançar tal modelo foi necessário adotar alguns parâmetros, sendo estes mostrados na figura 7 que é a captura da no software Jupyter Notebook™ em que foram feitas as primeiras análises.

- Velocidade do vento sempre paralela ao eixo do rotor
- Cidade utilizada para análise: Osório(RS) - 23/06/2021 até 26/06/2021
- $\alpha = 12^\circ$
- $r = 2\text{m}$
- $R = 20\text{m}$
- $C_d = 0,04$
- $C_l = 1,2$
- $\rho \approx 1,18 \text{ kg/m}^3$
- $A = 50\text{m}^2$

Figura 7 - Parâmetros adotado
 Fonte - Elaborado pelos autores

Ademais, como mostrado na figura 7, foi analisado uma cidade em específico no período de 3 dias por meio de uma ferramenta de previsão do tempo disponibilizada na web. Tal etapa foi importante pois a simulação realizada tem a velocidade do tempo representada por uma senoide pulsante, ou seja, restrita apenas para dados positivos de modo que foi dado um offset no valor mínimo observado na velocidade, algo próximo de 2,58 m/s, um “delay” para que o pico da senoide atingisse sempre o horário das 16hrs do dia e a amplitude que é o valor máximo da velocidade do vento analisada para esses 3 dias, 7,8m/s.

Contudo percebeu-se que a senoide gerada era algo muito artificial e houve a ideia de fazer algo semelhante a uma perturbação. Dessa forma, foi seguido o princípio das harmônicas, fenômeno de perturbação que ocorre por conta de ruídos presentes na rede elétrica, de modo que a velocidade do vento seria multiplicada por uma outra senoide com parâmetros diferentes da senoide inicial, assim havendo perturbações e deixando a forma de onda mais próxima da realidade para a simulação.

O resultado obtido por esse processo é dado pela Figura 8, onde temos a velocidade em função das horas do dia para um período de análise de uma semana.

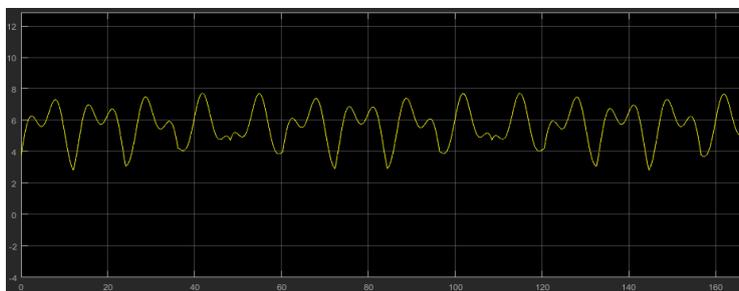


Figura 8 - Velocidade do vento formulada
 Fonte: Elaborado pelos autores

Após a formulação da velocidade do vento, foram utilizadas as equações apresentadas nos materiais e métodos da simulação computacional e os parâmetros adotados para realizar a simulação do movimento das pás, seu deslocamento em metros e a força resultante do conjunto, sendo possível observar cada resultado nas Figuras 9 e 10.

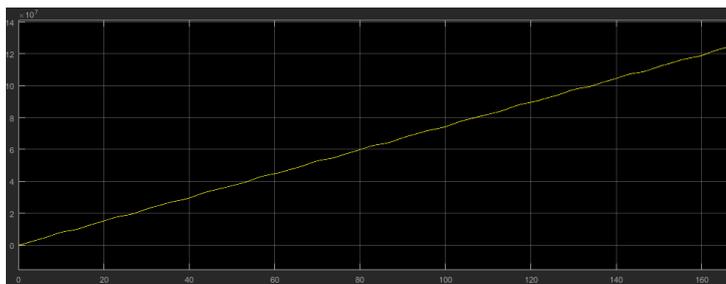


Figura 9 - Deslocamento das pás em metros

Fonte - Elaborado pelos autores

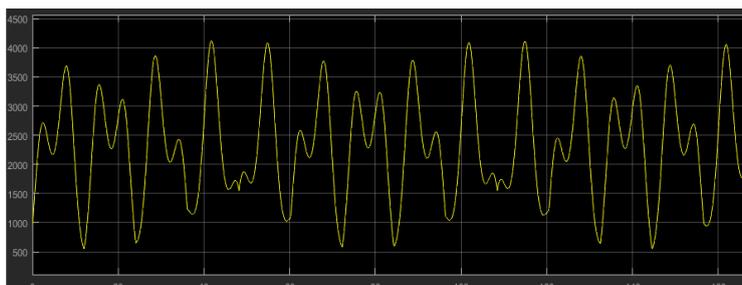


Figura 10 - Força resultante em Newtons

Fonte: Elaborado pelos autores

3.5 Seleção dos materiais

Na seleção de materiais, os materiais foram determinados utilizando o gráfico da deformação plásticas de acordo com livro do Ashby (2005), assim, os materiais escolhidos pelo grupo foram o aço alto carbono, GFRP (polímeros reforçados por fibra de vidro), aço baixa liga, CFRP (polímeros reforçados por fibra de carbono) e aço mola. Dessa forma, foram consideradas algumas propriedades para os cálculos, como o peso do gerador sendo de 196200N, distribuídos em 16 molas para suportar o sistema, bem como o diâmetro da mola sendo de 100 mm. A partir dessas informações, foi feita a Tabela 3 determinando algumas propriedades para os materiais, como a densidade, resistência a compressão e o índice de mérito, com esses dados determinamos a massa e o custo total do projeto de cada material.

Tabela 3 – Cálculos para determinar a massa e o custo dos materiais

Material	σ_y (Mpa)	ρ (Mg/m ³)	Índ. de Mérito	Massa (kg)	Custo R\$/Kg	Diametro do fio (mm)	Preço unitário (R\$)	Preço Projeto (R\$)
Aço Alto Carbono	757,5	7,85	10,5857	63,2378	5	16,5207	316,19	5059,04
GFRP	152	1,75	16,2751	41,1312	3,4	28,2190	139,85	2237,6
Aço baixa Liga	750	7,85	10,5157	63,6587	4,95	16,5756	315,12	5041,92
CFRP	800	1,55	55,5983	12,0402	160	16,2228	1926,44	30823,04
Aço Mola (6150)	1100	7,85	13,5746	49,3140	3,8	14,5890	187,4	2998,4

Fonte: Elaborado pelos autores.

Portanto, para a selecionar o material mais adequado para o projeto, foram utilizados os critérios de o material ter um baixo custo, combinado com uma baixa massa. Logo, foi realizada as seguintes considerações: o material CFRP, tem a menor massa, porém seu custo é elevado, não sendo viável economicamente. O GFRP é um bom material, porém não é indicado para o projeto de molas de vibração (SHIGLEY, 1984). O aço baixa liga e alto carbono apresentam altas massas e preços elevados, então foram descartados. Por fim, escolheu-se o Aço mola que apresenta as melhores características para esse projeto e seu preço não é elevado, sua resistência a compressão é a maior dentre os avaliados e tem um bom índice de mérito.

Assim, com o material escolhido (Aço mola), foi realizado o dimensionamento das molas, sendo calculadas a deformação da mola, a constante da mola, o comprimento nominal e máximo, segundo descreve a metodologia e assumindo características dos materiais. Com isso, foi considerado o diâmetro do fio de 15mm, e definido uma mola com 8 espiras ativas. A partir destas considerações, foi possível realizar os cálculos finais, que são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Dimensionamento da Mola

Material	Força axial (N)	Diâmetro externo (mm)	Diâmetro do fio (mm)	Espiras ativas	Espiras totais	Deformação (mm)	Constante da mola (N/mm)	Comp. sólido (mm)	Comp. máximo (mm)
Aço Mola	12262,5	100	15	8	10	123,319977	99,4364441	150	273,31998

Fonte:

Elaborado pelos autores

5. CONCLUSÕES

A partir do exposto foi possível afirmar que o trabalho cumpriu com o propósito de, através da utilização das ferramentas tais com KT, Triz, QFD, MatLab™ e metodologia de seleção de materiais de Ashby, desenvolver com fins diádicos, o projeto hipotético de um aerogerador eólico.

Os principais resultados apresentados pelo projeto foram, em relação a Análise KT, o rolamento quebrado se deve a inexperiência da equipe de manutenção que substituiu os colaboradores afastados devido ao COVID 19, já na Análise Triz concluiu-se que a utilização da pá “Asa de Coruja” poderia ser uma solução para melhorar a aerodinâmica e conseqüentemente reduzir o ruído. Em relação ao QFD, os resultados apresentados confirmaram a Análise Triz, o foco principal do projeto deve ser o coeficiente de arrasto da pá, visto que influencia diretamente nos itens requeridos pelos clientes e a pesquisa de mercado, tais como baixo ruído, maior produção energética e custo. Já em relação a simulação, foi possível descrever graficamente comportamento da força resultante e o deslocamento das pás. Por conseguinte, para as molas do aerogerador foi escolhido o material aço mola devido as suas características e seu baixo custo, e após isso, se dimensionou a mola de tal forma que ela apresentasse as melhores características mecânicas, tanto em valores de compressão, quando de resistência à deformação, sendo ainda apresentado seus atributos de tamanhos.

O projeto mecânico é um estudo amplo o qual possibilita englobar todas as matérias desenvolvidas no curso de Engenharia Mecânica. Para o grupo de autores deste trabalho, a aplicação das ferramentas de solução de problemas foi muito elucidativa, visto que propiciou uma experiência que estará presente no cotidiano dos futuros engenheiros mecânicos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALTSHULLER, Genrich Saulovich. The innovation algorithm: TRIZ, Systematic Innovation and Technical Creativity. 2. ed. rev. Worcester: Technical Innovation Center, 2007. 283 p. v. 1. ISBN 0-9640740-4-4.

ASHBY, Michael F. Materials Selection in Mechanical Design. 3. ed. rev. Burlington: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005. 602 p. v. 1. ISBN 0 7506 6168 2.

CLIMATEMPO 2021. Disponível em: <https://www.climatempo.com.br/previsao-do->

tempo/cidade/1404/osorio-rs Acesso em: 27 de jun. de 2021.

BUDYNAS, Richard G.; J., Keith Nisbett. Elementos de Máquinas de Shigley. 10. ed. atual. [S. l.]: AMGH, 2016. 1096 p. ISBN 858055554X.

CLIMATEMPO 2021. Disponível em: <https://www.climatempo.com.br/previsao-do-tempo/cidade/1404/osorio-rs> Acesso em: 27 de jun. de 2021.

FILHO, Leonel Del Rey de Melo. QFD na garantia da qualidade do produto durante seu desenvolvimento: caso em uma empresa de materiais. Produção, Scielo Brasil, p. 604-624, 22 nov. 2007. DOI <https://doi.org/10.1590/S0103-65132007000300015>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/prod/a/WNq9Kj8gBWnQ9rNzvJCc9jC/?lang=pt#>. Acesso em: 15 jul. 2021.

KEPNER, Charles H; TREGOE, Benjamin B. O Administrador Racional. 2. ed. [S. l.]: Atlas, 1972. 242 p. v. 1. ISBN 1000182478740.

MACHADO, Carlos Alberto Gonçalves da Silva Maistro; SILVA, Angelica da Fontoura Garcia; CARVALHO, Diego Fogaça. A Utilização de Softwares no Ensino e Aprendizagem dos Cursos de Engenharia. Ensino, [s. l.], ano 2021, v. 22, n. 2, ed. 2, p. 146 - 151, 2021.

MARTINS, Romulo Matheus Emmerick. Simulação numérica da redução de ruído em pás de aerogeradores. 2016. 58 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Guarapuava, 2016.

SHIGLEY, Joseph Edward. Elementos de máquinas. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1984. 183 p. v. 2. ISBN 85-216-0369-X.

SIMONSEN, Henrique. PROJETO E CONSTRUÇÃO DE TURBINA EÓLICA DE BAIXA POTÊNCIA. Universidade de São Paulo - USP. 2009 Disponível em: http://sites.poli.usp.br/d/pme2600/2009/artigos/art_tcc_039_2009.pdf. Acesso em 27/05/2021