

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA - CÂMPUS JARAGUÁ DO SUL - RAU
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM FABRICAÇÃO MECÂNICA

JIANCARLO VENTURI

ANÁLISE DO SISTEMA MECÂNICO DA RODA D'ÁGUA DO MUSEU WEG COM O
INTUITO DE AUMENTAR A EFICIÊNCIA NO PROCESSO DE GERAÇÃO DE
ENERGIA

JARAGUÁ DO SUL

JUNHO DE 2019

JIANCARLO VENTURI

ANÁLISE DO SISTEMA MECÂNICO DA RODA D'ÁGUA DO MUSEU WEG COM O
INTUITO DE AUMENTAR A EFICIÊNCIA NO PROCESSO DE GERAÇÃO DE
ENERGIA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Superior de Tecnologia em Fabricação Mecânica do Câmpus Jaraguá do Sul – Rau, do Instituto Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do diploma de Tecnólogo em Fabricação Mecânica.

Orientador: Anderson José Antonietti, Mestre em Engenharia Mecânica.

JARAGUÁ DO SUL

JUNHO DE 2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
por meio do programa de geração automática do câmpus Rau, do IFSC

Venturi, Giancarlo

Análise do sistema mecânico da roda d'água do Museu WEG com o intuito de aumentar a eficiência no processo de geração de energia / Giancarlo Venturi ; orientação de Anderson José Antonietti. Jaraguá do Sul, SC, 2019.

50 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Jaraguá do Sul - Rau. Tecnologia em Fabricação Mecânica. . Inclui Referências.

1. Roda d'água. 2. Energia. 3. Eficiência. I. Antonietti, Anderson José. II. Instituto Federal de Santa Catarina. . III. Título.

JIANCARLO VENTURI

ANÁLISE DO SISTEMA MECÂNICO DA RODA D'ÁGUA DO MUSEU WEG COM O
INTUITO DE AUMENTAR A EFICIÊNCIA NO PROCESSO DE GERAÇÃO DE
ENERGIA

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título em Tecnólogo em
Fabricação Mecânica, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de
Santa Catarina, e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo
indicada.

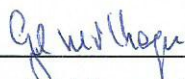
Jaraguá do Sul, 14 de junho de 2019



Prof. Me. Anderson José Antonietti

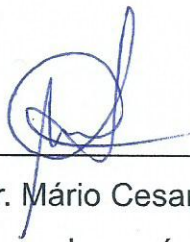
Orientador

IFSC – Campus Jaraguá do Sul – RAU



Prof. Dr. Gil Magno Portal Chagas

IFSC – Campus Jaraguá do Sul – RAU



Prof. Dr. Mário Cesar Sedrez

IFSC – Campus Jaraguá do Sul – RAU

Dedico a todos meus familiares pelo apoio recebido nos momentos difíceis no decorrer do curso, assim como pela compreensão nos momentos de ausência.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por ser base nas minhas conquistas.

Aos queridos amigos de sala de aula, por todo apoio e material disponibilizado no decorrer do curso.

Aos professores, por compartilhar conosco seus conhecimentos.

Ao IFSC, pelo incentivo aos diversos saberes.

*"No meio da dificuldade vive a oportunidade."
Albert Einstein*

*"A mente que se abre a uma idéia, jamais voltará
ao seu tamanho original."
Albert Einstein*

*"Nem tudo que se enfrenta pode ser modificado,
mas nada pode ser modificado até que seja
enfrentado."
Albert Einstein*

RESUMO

A roda d'água foi, em tempos passados, uma alternativa na geração de energia utilizando recursos naturais, mas o crescimento da demanda energética exigiu uma evolução para as grandes turbinas hidráulicas. Apesar de não pertencer ao grupo dos equipamentos produtores de energia elétrica em larga escala, a memória do precursor da geração de energia por meio hídrico deve ser preservada. O Museu WEG, situado na cidade de Jaraguá do Sul/SC, possui um conjunto rudimentar de geração de energia elétrica por roda d'água, porém, devido à falta de manutenção dos componentes mecânicos do conjunto (rolamentos, mancais de rolamento, eixos, polias e correias), a eficiência no processo de geração é prejudicada. De modo a extrair o maior rendimento possível do sistema mecânico foram propostas soluções mecânicas compatíveis com os problemas encontrados e selecionados os componentes adequados a cada caso. Foram selecionados rolamentos autocompensadores e fixos de esferas para os mancais de rolamento, considerando a força radial a que estavam expostos; foi proposto aplicar um revestimento metálico nas polias de madeira para evitar o desgaste da pista; foi realizado o dimensionamento e seleção das correias apropriadas e verificados outros componentes do sistema como os eixos, por exemplo, procurando sempre manter as características históricas do equipamento. Assim, mesmo não sendo possível quantificar, espera-se aumentar a eficiência no processo de geração de energia elétrica aproveitando ao máximo a energia cinética disponível para tal fim.

Palavras chave: Roda d'água, energia, eficiência.

ABSTRACT

The water wheel was once an alternative in the generation of energy using natural resources, but the growth of the energy demand demanded an evolution for the big hydraulic turbines. Although it does not belong to the group of large-scale electric power equipment, the memory of the precursor of energy generation by water must be preserved. The WEG Museum, located in the city of Jaraguá do Sul / SC, has a rudimentary set of electric power generation by water wheel, however, due to the lack of maintenance of the mechanical components of the assembly (bearings, rolling bearings, pulleys and belts), the efficiency in the generation process is impaired. In order to extract the highest possible yield from the mechanical system, mechanical solutions were proposed compatible with the problems encountered and selected the appropriate components in each case. Self-aligning and fixed ball bearings were selected for the rolling bearings, considering the radial force to which they were exposed; it was proposed to apply a metallic coating on the wood pulleys to avoid the wear of the track; it was carried out the sizing and selection of the appropriate belts and verified other components of the system as the axes, for example, always trying to maintain the historical characteristics of the equipment. Thus, even though it is not possible to quantify, it is expected to increase the efficiency in the electric power generation process taking advantage of the kinetic energy available for this purpose.

Key words: Water wheel, Energy, Efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Rodas d'água acionadas: (a) pela parte superior; (b) pela parte inferior e (c) lateralmente.	17
Figura 2 – Aplicação do conceito de energia cinética e de energia potencial.	18
Figura 3 - Representação de forças.	19
Figura 4 - Exemplo de principais tipos de rolamentos.	20
Figura 5 - Exemplo de carga aplicada nos mancais.	21
Figura 6 - Partes de uma polia.	24
Figura 7 - Conjunto correia dentada.	26
Figura 8 – Alternador carcaça 160 WEG.	27
Figura 9 - Roda d' água acionada por cima.	30
Figura 10 - Esboço do sistema de geração de energia por roda d'água do Museu WEG.	31
Figura 11 - Roda d'água do Museu WEG.	32
Figura 12 - Primeiro eixo do sistema.	33
Figura 13 - Segundo eixo do sistema.	33
Figura 14 - Terceiro eixo do sistema.	34
Figura 15 - Eixos do conjunto.	34
Figura 16 - Mancal do primeiro eixo danificado.	35
Figura 17 - Eixo acoplado direto na madeira causando desgaste.	36
Figura 18 – Polia desgastada e correia do sistema.	36
Figura 19 – Gerador acionado no final do sistema.	37
Figura 20 - Forças nos mancais primeiro eixo.	42
Figura 21 - Forças nos mancais segundo eixo.	43
Figura 22 - Referências das caixas em relação ao rolamento.	43
Figura 23 - Largura correias.	44
Figura 24 - Especificação das correias.	45

LISTA DE SÍMBOLOS

- Σ – Somatório.
- F_x – Força no eixo x.
- F_y – Força no eixo y.
- F_R – Força radial.
- F_A – Força axial.
- M_0 – Momento fletor.
- L_{10h} – Vida útil do rolamento em horas.
- $^{\circ}F$ – Graus Fahrenheit.
- θ – Ângulo de contato.
- B – Largura da polia.
- b – Largura da correia.
- C – Distância entre eixos.
- C_r – Força tabelada do rolamento.
- D – Diâmetro.
- d – Diâmetro menor.
- F – Correias planas
- FK – Fabricante de caixas para mancais.
- Hz – Hertz.
- HS – Cabo de tração com resistência elevada.
- i – Relação de transmissão.
- KVA – Quilovoltampere.
- L – Comprimento.
- M – comprimento da correia.
- mm – Milímetros.
- N – Newton.
- n – Rotação
- P – Carga.
- p – Força no mancal.
- rpm – Rotações por minuto.
- X – Coeficiente de carga radial.
- Y – Coeficiente de carga axial.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Objetivo geral	13
1.1.1 Objetivos específicos.....	13
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1 A roda d'água e sua contribuição para o meio ambiente	15
2.2 Tipos e características das rodas d'água	16
2.3 Energia Cinética e Energia Potencial	17
2.4 Força radial e axial em rolamentos	18
2.5 Mancais de rolamento	19
2.6 Mancais de bucha	23
2.7 Eixos, polias e correias.....	23
2.8 Geradores de Energia Síncronos Trifásicos	26
3 METODOLOGIA.....	28
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	30
4.1 Análise do sistema de geração de energia por roda d'água.....	30
4.1.1 Roda d'água.....	31
4.1.2 Eixos.....	32
4.1.3 Mancais.....	35
4.1.4 Polias e correias.....	36
4.1.5 Gerador	37
4.1.6 Eficiência do conjunto.....	38
4.1.7 Contribuição dos componentes mecânicos na eficiência total do conjunto	39
4.2 Soluções mecânicas propostas visando o aumento da eficiência do sistema.....	40
4.2.1 Seleção dos componentes mecânicos visando a melhor relação custo/vida ...	41
5 CONCLUSÃO.....	46
REFERÊNCIAS.....	48

1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional das últimas décadas fez crescer muito a demanda por energia. Por outro lado, deve-se observar que esta demanda energética descontrolada promoveu efeitos devastadores no meio ambiente devido aos efeitos causados na produção dessa energia. A demanda energética continua crescendo, porém a forma de atender essa demanda deve ser cautelosa, de modo a evitar danos maiores ao meio ambiente.

A crise ambiental parte de três aspectos básicos: crescimento populacional, demanda de energia, materiais diversos e geração de resíduos. Assim, abrem-se oportunidades para estudos das diversas formas de energias renováveis visando o menor impacto ambiental possível. Uma opção de energia renovável é a energia hídrica que acompanha os desníveis geográficos. A roda d'água foi, em tempos passados, uma alternativa na geração de energia utilizando recursos naturais, porém o crescimento da demanda energética exigiu uma evolução para as grandes turbinas hidráulicas.

Como meio de execução deste trabalho foi considerado o sistema de geração de energia por roda d'água presente no Museu Weg. Este museu está situado na cidade de Jaraguá do Sul/SC e foi inaugurado em 16 de setembro de 2003 quando a empresa comemorava seus 42 anos de existência. O objetivo do museu é mostrar a evolução da empresa WEG ao longo do tempo, tendo grande importância histórica para a cidade de Jaraguá do Sul. Encontra-se lá também a história dos três fundadores, onde Werner Ricardo Voigt com habilidades de electricista, o administrador Geraldo Werninghaus e Eggon João da Silva especialista em mecânica, com muito empenho e trabalho, fundaram a empresa que atualmente é a maior fabricante de motores elétricos do mundo.

A roda d'água do Museu WEG representa uma forma primitiva de transformação da energia de movimento em energia elétrica, sistema que na época de início da empresa era muito usual em todos os segmentos. Atualmente, a roda d'água do Museu WEG é utilizada para o acionamento de lâmpadas de iluminação interna, porém, o sistema de geração de energia – roda d'água, polias, correias, eixos, rolamentos, gerador, entre outros – é antigo e encontra-se avariado pelo tempo, tendo sua eficiência prejudicada.

Esta roda d'água preserva as características da época de início das atividades

da empresa WEG e, portanto, suas características físicas e também históricas não serão modificadas neste trabalho. Com isso, o foco será direcionado para os elementos de máquina presentes no sistema e não nos materiais construtivos da roda d'água.

Este trabalho tem como objetivo analisar o sistema de geração de energia por roda d'água do Museu WEG e propor soluções mecânicas visando o aumento da eficiência na produção de energia elétrica pelo gerador.

1.1 Objetivo geral

Analisar o sistema de geração de energia por roda d'água do Museu Weg e propor soluções mecânicas visando o aumento da eficiência na produção de energia elétrica pelo gerador.

1.1.1 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral deste trabalho são definidos os seguintes objetivos específicos:

- Pesquisar sobre tipos, aplicações e características das rodas d'água;
- Obter dados dimensionais do sistema de geração de energia por roda d'água;
- Determinar a eficiência atual do conjunto;
- Propor soluções mecânicas visando o aumento da eficiência;
- Analisar a contribuição de cada componente para o conjunto;
- Selecionar os componentes adequados visando obter a melhor relação Custo/Vida;

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O estudo do sistema de geração de energia por roda d'água abrange diversas áreas, dentre elas se destacam a área da mecânica e a área da elétrica. Com base nisso, trabalhos de diversos autores e de áreas distintas são mencionados a seguir e formam a base de execução desta análise.

Harwood (1980) apresenta a construção de três rotores de baixo custo para uma pequena usina hidrelétrica para uso de moradores ribeirinhos isolados. Os rotores testados foram uma turbina de fluxo axial, um rotor Savonius e uma roda d'água. Cada rotor foi testado empiricamente medindo-se a potência, o torque e a velocidade de rotação para várias velocidades lineares. Dentre os rotores testados a turbina de fluxo axial forneceu a mais alta potência.

Santos (2011) fez uma observação sobre a importância do desenvolvimento de uma bomba acionada por roda d'água que seja leve, barata e adaptável em várias situações. Para tanto, o objetivo do autor foi desenvolver e avaliar um sistema de bomba por roda d'água que tenha baixo custo e que seja de fácil montagem, instalação e manuseio. Os resultados obtidos mostraram-se coerentes com os esperados pelo autor, em que a maior vazão foi conseguida com a menor altura de recalque.

Souza e Souza (2006) construíram uma roda d'água em madeira de lei para utilizar no acionamento de uma bomba d'água em propriedades rurais. O sistema assim disposto gira entre 40 e 45 rotações por minuto e faz com que mais de 4000 litros de água diários sejam bombeados. Esta quantidade é suficiente para fornecer água para 6 pessoas e 100 bovinos.

Souza (2011) desenvolveu um aplicativo para fazer uma análise técnico-econômica que auxilia na determinação da viabilidade de adaptação de uma roda d'água, acionada por cima, para a geração de eletricidade utilizando um gerador de ímã permanente. Este aplicativo calcula a quantidade de potência gerada pelo conjunto roda/gerador, além de calcular o valor a se investir para efetuar tal adaptação.

Biesek Júnior (2017) apresenta um estudo da aplicação de análise de vibração para a detecção de falhas por desalinhamento de eixos em máquinas rotativas. Desalinhamentos paralelos, angulares e combinados foram impostos entre dois eixos de uma bancada didática de modo controlado com auxílio de um sistema

de medição de desalinhamento a laser. Por fim, realiza a avaliação dos indicadores de falha que ofereceram maior sensibilidade à anomalia de desalinhamento, seja no domínio do tempo ou no domínio da frequência.

Wisbeck (2000) discorre sobre o modelamento de mancais radiais acoplados sujeitos a carregamento dinâmico, bem como sobre sua metodologia de solução, incluindo atrito sólido e desgaste. O modelo considera o acoplamento entre dois mancais radiais de um mesmo eixo, levando em conta os deslocamentos e desalinhamentos radiais.

Silva, Santos e Fernandes (2012) descrevem a funcionalidade do mancal e sua aplicação em variados tipos de cargas. Afirmam que havendo algum problema no mancal, a exatidão do funcionamento da máquina será comprometida e a linha de produção conseqüentemente será prejudicada. De acordo com os autores, por esse motivo, é essencial que o mancal seja constantemente avaliado e aplicado para suportar uma determinada carga que o possibilite funcionar corretamente.

Freitas et al. (2005) apresentam uma análise comparativa entre máquinas síncronas e de indução para uso em sistemas de geração distribuída. Os impactos desses geradores no desempenho de redes de distribuição foram determinados e confrontados utilizando diferentes ferramentas e modelos de simulação computacional. Os resultados obtidos mostraram que a melhor decisão do ponto de vista técnico deve ser baseada nas características da rede.

2.1 A roda d'água e sua contribuição para o meio ambiente

No início dos tempos a roda d'água supria a necessidade energética, porém com o aumento da demanda, acabou sendo deixada de lado e caindo no esquecimento.

Por volta de 85 a.C. os gregos utilizavam a roda d'água acionada pela lateral. Já a roda acionada por cima começou a ser utilizada por volta de 15 a.C.. Até o desenvolvimento do motor a vapor, as únicas fontes de energia eram o vento e a água. Os geradores elétricos foram desenvolvidos no século XIX, onde a energia hidráulica foi o meio natural mais utilizado para a geração, transformando energia potencial em energia cinética.

Os recursos energéticos disponíveis são classificados em primários e secundários. Os primários são recursos da natureza, também divididos em

renováveis e não renováveis. Já os secundários são os recursos artificiais obtidos através de transformações físicas dos recursos naturais. Segundo Junior e Filho (2007), são consideradas fontes não renováveis de energia aquelas que uma vez retirados do solo, não são imediatamente repostas, como o petróleo, gás ou o carvão. Ainda segundo Junior e Filho (2007), energia renovável é aquela que rapidamente é repostada e geralmente está disponível em abundância como uma fonte inesgotável, por exemplo, a energia solar, a energia eólica, a biomassa e a energia hidráulica.

Sustentabilidade ambiental era até pouco tempo um termo pouco usado ou conhecido, porém atualmente é empregado em várias áreas, principalmente nas referentes à tecnologia. Como resultado do descaso do ser humano para com a manutenção das condições existenciais do meio ambiente, vários problemas estão aparecendo e alarmando pesquisadores e a própria sociedade. A sustentabilidade ambiental define o modo como o homem age na utilização dos bens naturais de modo a garantir que as gerações futuras também usufruam desses benefícios. Sendo assim, muitos caminhos podem ser seguidos para a conservação dos recursos naturais e para que os objetivos da sustentabilidade sejam alcançados.

Um dos pontos críticos observáveis é o consumo energético. As consequências desse consumo desenfreado para as gerações futuras causa muita discussão devido aos impactos ambientais gerados. A roda d'água, mesmo que em baixa escala, poderá auxiliar na diminuição desse impacto, pois aproveita o deslocamento natural das águas para produzir energia.

2.2 Tipos e características das rodas d'água

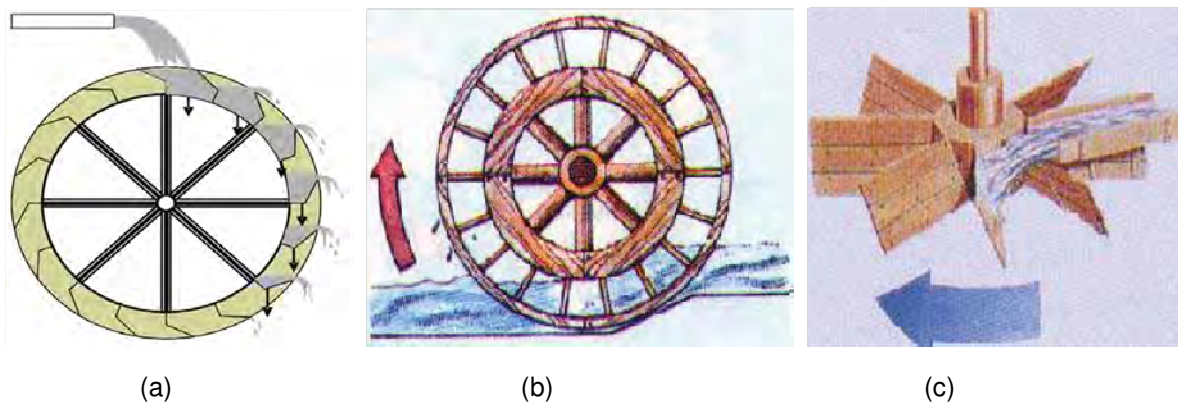
As primeiras rodas d'água começaram a ser desenvolvidas por volta de 200 a.C., sendo muito utilizada até os dias atuais através dos moinhos, bombas, geração de energia elétrica ou até mesmo para embelezar paisagens. Sua evolução resultou nas atuais e potentes turbinas hidráulicas das centrais hidrelétricas, que geram até milhões de watts de potência (SOUZA, 2011).

Poças (2013) definiu a roda d'água como um dispositivo circular com um eixo no centro, apoiado sobre dois mancais contendo aletas em torno de seu perímetro a fim de aproveitar a energia do fluxo de água.

Segundo Stano Júnior (2007), a roda d'água pode ser acionada de três

maneiras: pela parte superior, pela parte inferior e lateralmente (Figura 1).

Figura 1 – Rodas d'água acionadas: (a) pela parte superior; (b) pela parte inferior e (c) lateralmente.



Fonte: Souza (2011)

Portanto, o que determina o modelo de roda d' água é a forma que a água fará o contato com as pás, ou seja, pela forma de seu acionamento. As rodas d'água com admissão por cima funcionam com o peso da água, enquanto aquelas com admissão por baixo funcionam com a velocidade do fluxo. Já as rodas com admissão lateral funcionam com a associação dos dois princípios conforme Poças (2013). Seja qual for o tipo de roda, o seu giro é provocado por uma grandeza física de nome torque.

Segundo Souza (2011), a roda d'água acionada por cima é o modelo mais usado e eficiente. Nesse processo a água é levada até a roda através de um tubo PVC rígido ou de uma calha de madeira, alvenaria ou chapas de aço. A calha deverá possuir tamanho e inclinação adequadas para que a água caia suavemente sobre a roda atingindo os primeiros reservatórios situados logo no topo da mesma (POÇAS, 2013).

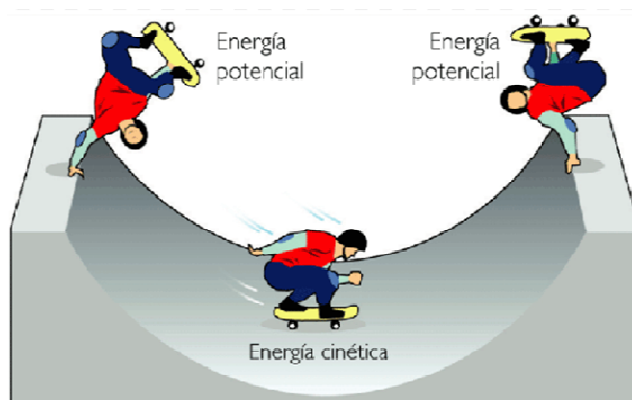
2.3 Energia Cinética e Energia Potencial

Energia pode ser definida como a capacidade de realizar trabalho. Quando do trabalho realizado por uma roda d'água dois tipos de energia surgem como os principais, a energia cinética e a energia potencial.

De acordo com Halliday, Resnick, Walker (2012), a energia cinética está associada ao movimento de um objeto. Quanto mais rápido o objeto se move, maior a energia cinética, sendo a mesma nula quando o objeto está em repouso. Já a

energia potencial é a energia que pode ser armazenada em um sistema físico e tem a capacidade de ser transformada em energia cinética. Conforme a energia potencial do corpo diminui a energia cinética do corpo aumenta e vice-versa. (Figura2).

Figura 2 – Aplicação do conceito de energia cinética e de energia potencial.



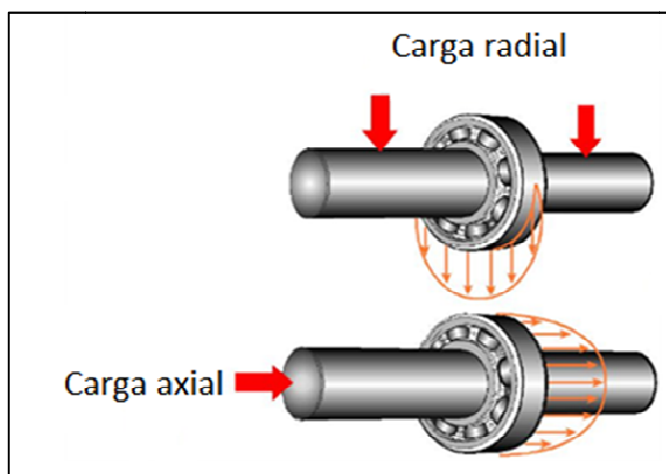
Fonte: <https://www.blogspot.com/2013/03/energia-cinetica>

O processo de transformação da energia potencial em energia cinética é o que permite o funcionamento da roda d'água.

2.4 Força radial e axial em rolamentos

A roda d'água é composta por diversos componentes mecânicos que tem como função captar a energia mecânica gerada e transmitir essa energia para o conjunto acionado pelo sistema. Como a roda d'água em operação apresenta movimento rotacional, o uso de elementos girantes de baixo atrito é essencial para o bom rendimento do sistema de transmissão. As forças exercidas pelo sistema em cada eixo se concentram sobre os elementos de apoio (mancais) gerando forças radiais e axiais em relação ao elemento girante (Figura 3).

Figura 3 - Representação de forças.



Fonte: Generoso (2009)

A carga radial (F_R) é a força exercida perpendicularmente do eixo, ou seja, para um eixo na horizontal a força é aplicada verticalmente ao eixo. Já a carga axial (F_A) é paralela ao eixo, desse modo, tanto a força quanto o eixo estão na mesma direção. Em situações de carga combinada, carga radial e axial num mesmo elemento rolante, será necessária determinar a carga resultante (P) do sistema através da Equação 1.

$$P = X \cdot F_R + Y \cdot F_A \quad (1)$$

Sendo, P carga, X coeficiente de carga radial, F_R força radial, Y coeficiente de força axial e F_A coeficiente de força axial.

2.5 Mancais de rolamento

Os mancais de rolamento são utilizados em uma vasta gama de equipamentos com a finalidade de suportar uma carga transferida geralmente por um eixo, possibilitando sua rotação em relação ao elemento de apoio.

Os rolamentos são em geral constituídos por anéis, elementos rolantes e gaiola. Em função da direção da carga a ser apoiada, são divididos em rolamentos radiais, rolamentos axiais e rolamentos mistos, explica Budynas e Nisbett, (2011). Ainda em função do tipo de elemento rolante, é possível separá-los em rolamentos de esferas rolos e agulhas, podendo ser classificados também em função da configuração e da aplicação específica destes.

Os rolamentos radiais de esferas são compostos de um anel interior e um exterior, assim como, uma gaiola com folga de precisão para as esferas. Esses rolamentos são projetados para suportar cargas radiais e axiais em qualquer direção e permitir o funcionamento a uma velocidade relativamente alta.

Os rolamentos de rolo, por sua vez, são rolamentos de construção simples em que os rolos estão em contato linear com a pista. Possuem uma grande capacidade de carga radial, porém não suportam cargas no sentido axial.

Sempre que o sistema de transmissão for formado por eixos haverá a necessidade de alguma forma de mancal, seja por meio de rolamentos ou mancais de deslizamento.

Tem-se a disposição muitos modelos de rolamentos, cada qual direcionado para uma utilização. A Figura 4 representa alguns dos principais modelos.

Figura 4 - Exemplo de principais tipos de rolamentos.



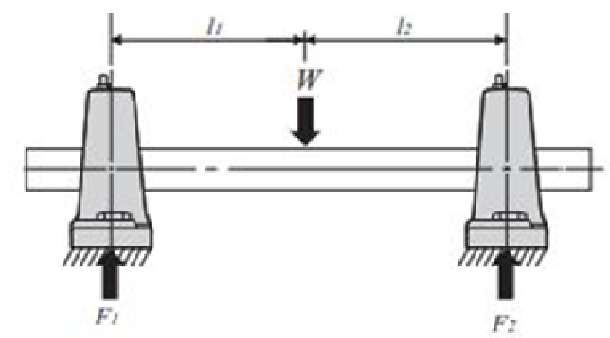
Fonte: Catálogo NSK (2013)

Dentre os modelos apresentados anteriormente, conforme Catálogo NSK (2013), destaca-se o rolamento autocompensador de esferas, projetado para suportar carga radial e axial em eixos com certo grau de desalinhamento. O torque de atrito é pequeno, sendo o mais adequado para aplicações que requerem baixo ruído e vibração, e em locais de alta velocidade de rotação. Neste rolamento, além do tipo aberto, existem os blindados com placas de aço, os vedados com proteção

de borracha, e os com anel de retenção no anel externo. Geralmente, as gaiolas utilizadas são as prensadas de aço.

Segundo Catálogo NSK (2013), é necessário seguir um roteiro de cálculo e fazer uso dos catálogos para determinar o rolamento mais indicado para a utilização. Primeiramente, deve-se desenvolver o diagrama de corpo livre do conjunto para determinar a posição das cargas atuantes (Figura 5).

Figura 5 - Exemplo de carga aplicada nos mancais.



Fonte: Catálogo NSK (2013)

Conforme Hibbeler (2010), a força aplicada nos pontos de apoio pode ser calculada através das equações de equilíbrio de forças e momentos, mostrado na Equação 2.

$$\begin{aligned}\sum F_x &= 0 \\ \sum F_y &= 0 \\ \sum M_0 &= 0\end{aligned}\tag{2}$$

Onde, \sum indica somatório, F_x força no eixo x, F_y força no eixo y e M_0 momento fletor.

Tendo com base Catálogo NSK (2013), após obter os valores das cargas que o rolamento deve suportar, deve-se procurar no catálogo o modelo de rolamento desejado. Considerando o valor do diâmetro do eixo, deve-se definir dentre as opções o rolamento que apresenta capacidade de carga compatível com as cargas que o rolamento terá que suportar. Por fim, deve-se avaliar a vida útil do rolamento em horas de trabalho quando submetido a certa rotação. Para rolamentos de esfera, a vida útil pode ser determinada através da Equação 3.

$$L_{10h} = \frac{1000000}{60 \cdot n} \cdot \left(\frac{C_r}{P}\right)^3 \quad (3)$$

Sendo, L_{10h} vida útil do rolamento em horas, n rotação, C_r força tabelada do rolamento e P força no mancal.

Na visão de Tandon e Choudhury (1997), o correto funcionamento dos rolamentos depende, predominantemente, de um brando contato entre seus componentes. Segundo Budynas e Nisbett, (2011), um lubrificante para rolamentos deve ser capaz de:

- Proporcionar lubrificação entre as superfícies deslizantes e rolantes;
- Facilitar a distribuição e dissipação do calor;
- Evitar a oxidação das superfícies do rolamento;
- Proteger a entrada de materiais estranhos no rolamento.

A escolha de um lubrificante adequado e do método de lubrificação para cada aplicação de rolamentos é, portanto, importante assim como a manutenção correta. Uma ampla gama de graxas e óleos está disponível para a lubrificação de rolamentos, além de lubrificantes sólidos para condições de temperaturas extremas. A escolha de um lubrificante depende principalmente das condições operacionais, ou seja, da faixa de temperatura e das velocidades, bem como da influência do ambiente ao redor, como pode ser visto na Tabela 1.

Tabela 1 – Comparativo entre graxa e óleo.

Uso de graxa	Uso de óleo
1. A temperatura não supera os 200°F.	1. As velocidades forem altas.
2. A velocidade for baixa.	2. As temperaturas forem altas.
3. Proteção incomum for requerida contra a entrada de material estranho.	3. As vedações herméticas puderem ser prontamente empregadas.
4. Recintos simples de mancal forem desejados.	4. O tipo de mancal não se prestar a lubrificação por graxa.
5. Operação por longos períodos, sem atenção for desejável.	5. O mancal for lubrificado por fornecedor central compartilhado com outros componentes de máquina.

Fonte: Adaptado de Budynas e Nisbett. 2011

As graxas lubrificantes são compostas de um óleo sintético ou mineral combinado com um espessante. Segundo Catálogo tecnolub (2010) os espessantes

geralmente são sabões metálicos. No entanto, outros espessantes como a poliuréia, podem ser utilizados para desempenho superior em determinadas áreas, como aplicações em altas temperaturas. Os aditivos também podem ser incluídos para aprimorar determinadas propriedades da graxa.

O método mais simples de lubrificação com óleo é o banho de óleo. O óleo, que é coletado através dos componentes de rotação do rolamento, é distribuído dentro do rolamento e depois derramado de volta para o banho de óleo. O nível de óleo deve quase alcançar o centro do corpo rolante inferior quando o rolamento estiver estacionário. O uso de niveladores de óleo é recomendado para que se tenha o nível correto de óleo conforme Catálogo Tecnolub (2010).

2.6 Mancais de bucha

Segundo Budynas e Nisbett (2011), os mancais de deslizamento, ou mancais de bucha, são elementos de máquinas sujeitos a forças de atrito providas da rotação de eixos que exercem cargas nos alojamentos dos mancais, porém não toleram desalinhamento na sua utilização.

Mancais de bucha geralmente são de forma cilíndrica e não possuem partes girantes. No interior do mancal existe uma bucha que desempenha a função de facilitar o deslizamento do eixo em si mesmo, permitindo o mínimo de atrito possível, desgastando-se conforme a necessidade.

As buchas podem ser constituídas de vários materiais como: metal, polímero, plástico engenheirado, compósitos reforçados com fibras, bronze, monometálico e bimetálico (Budynas e Nisbett 2011).

2.7 Eixos, polias e correias

A roda d'água é apoiada em um eixo central, que pode ser vertical ou horizontal dependendo do seu acionamento. Sua função é girar conforme a rotação da roda d'água, sendo responsável pela transmissão da energia criada pelo escoamento da água através da roda. Para Budynas e Nisbett (2011), o eixo é um membro rotativo usualmente de seção transversal circular, usado para transmitir potência ou movimento. No caso deste trabalho, a energia da roda d'água será utilizada para mover um gerador elétrico onde a transmissão será através de eixo

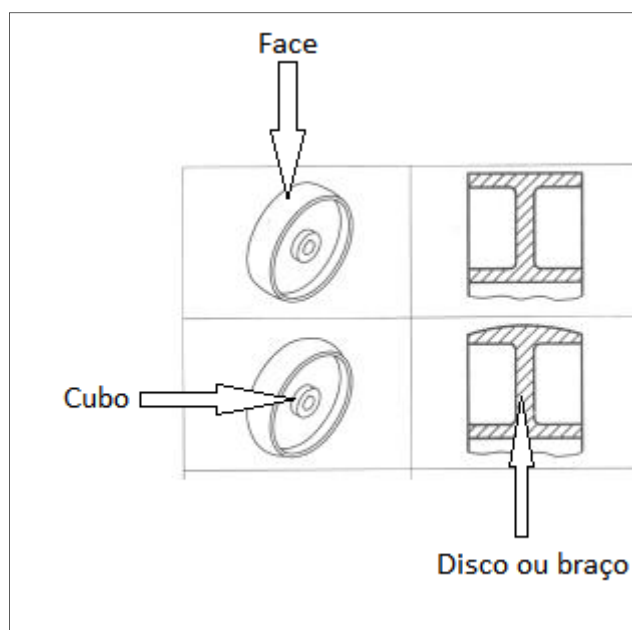
polias e correias.

As polias são peças cilíndricas, movimentadas pela rotação do eixo do motor ou pelas correias, sua função é transmitir energia cinética. Geralmente as polias são fabricadas de materiais rígidos como metal, polímero ou até mesmo madeira. Madeira é muito utilizada em polias para correias planas. As transmissões por correias e polias apresentam as seguintes vantagens:

- Possui baixo custo inicial, alto coeficiente de atrito, elevada resistência ao desgaste e funcionamento silencioso;
- São flexíveis, elásticas e adequadas para grandes distâncias entre centros.

Uma polia é constituída de uma coroa ou face, na qual se enrola a correia. A face é ligada a um cubo de roda mediante disco ou braços. (Figura 6).

Figura 6 - Partes de uma polia.



Fonte: Adaptado de Generoso (2009)

Além da polia transmitir a rotação do eixo, juntamente com seu sistema esta envolvida uma relação de transmissão (i), que esta diretamente ligada ao diâmetro externo e à rotação das polias. A relação escolhida pode diminuir a rotação aumentando o torque e vice-versa. O que determina a relação de transmissão escolhida entre as polias é a rotação final desejada para o sistema exercer determinada função. A relação de transmissão entre duas polias pode ser calculada de acordo com a Equação 4.

$$i = \frac{D}{d} = \frac{n}{N} \quad (4)$$

Onde, d e n são, respectivamente, o diâmetro externo e a rotação da polia motora; e D e N são, respectivamente, o diâmetro externo e a rotação da polia movida.

A correia é o elemento de máquina que, sendo movimentada por uma polia motriz, transmite força e velocidade à polia movida. Também pode ser utilizada para transportar mercadorias, sendo um dos sistemas mais eficiente já inventado, sendo usada em uma grande variedade de máquinas e aplicações. Segundo Budynas e Nisbett (2011), por serem elementos geralmente elásticos e com um comprimento elevado, possuem papel importante na absorção de cargas de choque e no amortecimento e isolamento dos efeitos da vibração.

De acordo com Budynas e Nisbett (2011), as modernas transmissões por correias planas, constituídas de um núcleo elástico forte revestido de elastômero, possuem vantagens distintas sobre engrenagens ou até mesmo sobre as correias trapezoidais. A eficiência da correia plana chega a 98%, produzem pouco ruído e absorvem muito melhor a vibração torcional do sistema.

Para Budynas e Nisbett (2011), existe o comprimento ideal da correia (L), calculado através dos diâmetros das polias motriz (D) e movida (d), da distância entre centros (C) e do arco de contato (θ) das polias, como mostra a Equação 5.

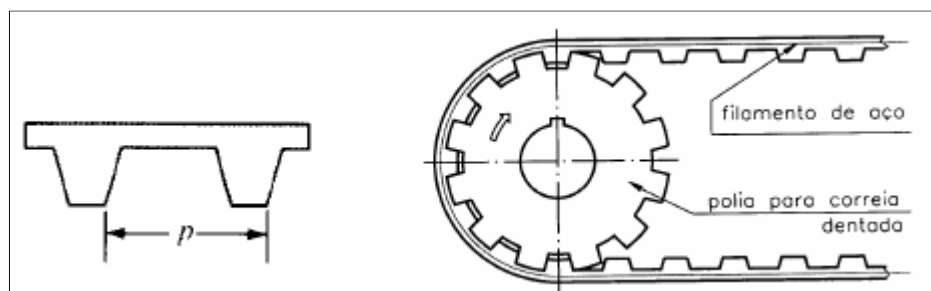
$$L = [4C^2 - (D - d)^2]^{1/2} + \frac{1}{2}(D\theta_D + d\theta_d) \quad (5)$$

Sendo, L comprimento da correia, C distancia entre eixos, D diâmetro da polia maior, d diâmetro da polia menor e θ ângulo de contato.

Correias dentadas ou sincronizadoras são correias em que a base apresenta dentes transversais à largura da correia, sendo que estes dentes servem para encaixar nos sulcos ou dentes das polias, fazendo assim um “engrenamento” do acionamento, (Figura 7). Apresentam trabalho silencioso tanto em baixa como em alta rotação, e sem a necessidade de lubrificação do acionamento ou tração inicial, realizando assim um trabalho totalmente limpo e sem contaminação. São produzidas em tecido emborrachado revestido de um tecido de náilon, contando ainda com fios

de aço em seu interior com o objetivo de suportar a carga da tração. Também, segundo Budynas e Nisbett (2011), podem operar em uma ampla gama de velocidades e possuem eficiência entre 97% a 99%.

Figura 7 - Conjunto correia dentada



Fonte: Generoso (2009).

Para dimensionar uma correia, existem muitas tabelas onde cada aplicação é levada em consideração. Conforme o Catálogo Continental Correias (2014) a espessura se indica pelo fator de serviço, o comprimento é indicado pela Equação 5 e a largura é extraída da Equação 6.

$$B = 1,1.b + 10 \quad (6)$$

Onde, B é a largura da polia e b a largura da correia.

2.8 Geradores de Energia Síncronos Trifásicos

Segundo Nascimento (2016), um gerador de energia síncrono é uma máquina elétrica rotativa capaz de transformar energia mecânica (em forma de rotação) em energia elétrica, e o princípio do seu funcionamento consiste em uma excitação de fluxo no rotor, criando um campo magnético que induz a movimentação dos elétrons nas bobinas do estator, resultando em uma corrente alternada. Entre as suas aplicações, as mais expressivas são as que usam energias renováveis, ou seja, pequenas hidrelétricas, biomassa e eólicas.

De acordo com Bim (2014), um gerador síncrono pode gerar energia transmitindo-a para a rede ou, dependendo da rotação, pode passar a consumir energia da rede. Por isso, quando ligado em uma rede, o gerador deve funcionar com uma rotação superior à sua rotação nominal garantindo que nas pequenas

oscilações a tensão gerada não seja menor do que a tensão da rede. Para que o gerador não opere de modo inverso instalam-se alguns diodos que são utilizados como dispositivos de segurança permitindo que a corrente transite em apenas um sentido. A Figura 8 mostra um gerador de energia elétrica.

Figura 8 – Alternador carcaça 160 WEG.



Fonte: <https://www.weg.net>.

3 METODOLOGIA

Este trabalho, inicialmente, considera necessária uma pesquisa bibliográfica sobre os tipos, aplicações e características das rodas d'água. A compreensão do funcionamento da roda d'água é de fundamental importância na identificação do equipamento que será utilizado na análise.

Após a identificação do sistema de trabalho, foi necessário obter os dados dimensionais e de funcionamento do mesmo, desde a roda d'água até o gerador. Para isso, com o sistema desligado, foi realizada a verificação das dimensões do conjunto (diâmetros da roda d'água, diâmetro das polias, distância entre eixos) com o auxílio de uma trena métrica. Com o conjunto em funcionamento e com o auxílio de um tacômetro a fim de obter a rotação real no gerador, utilizou-se um tacômetro digital óptico modelo MDT-2244B da marca Minipa (Precisão: $\pm (0.05\%+1D)$). A medição foi realizada no eixo do gerador e a rotação considerada foi obtida da média aritmética de cinco medições, obteve-se a rotação do eixo da roda d'água e do eixo do gerador. Dessa forma foi possível determinar, com o auxílio de equações presentes na teoria e o cruzamento dos dados obtidos, a eficiência real do conjunto de geração de energia por roda d'água.

Um ponto importante na análise do sistema foi a identificação da contribuição de cada componente para a eficiência do conjunto. Foi necessário o conhecimento de quais elementos influenciam diretamente na eficiência e quais apresentam um papel secundário no alcance do objetivo. Para isso, foi feito um *checklist* do conjunto listando todos os componentes, organizando os elementos em ordem de prioridade e avaliando as opções a serem adotadas para melhorar a eficiência do conjunto.

Para a seleção dos rolamentos foi necessário auxílio de um profissional em marcenaria para poder estimar a massa da roda d'água e da primeira polia. Determinando o peso desse conjunto, que possui a maior carga, foi possível estimar o peso dos outros elementos. Assim, foram propostas soluções mecânicas pontuais, podendo-se reduzir custos e concentrar o investimento em ações que gerem de fato retorno na eficiência do sistema.

Cada elemento de máquina apresenta um rendimento específico em seu funcionamento e isso ocorre devido às perdas causadas por efeito das irreversibilidades descritas pela Segunda Lei da Termodinâmica. Por isso, nenhum processo ou sistema pode apresentar eficiência igual a 100%. Mesmo assim,

espera-se que a eficiência do sistema de geração de energia por roda d'água proposto seja maior que a eficiência do sistema atual.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A seguir serão apresentados os resultados da análise do sistema de geração de energia por roda d'água do Museu Weg, de acordo com a sequência metodológica apresentada no item anterior.

4.1 Análise do sistema de geração de energia por roda d'água

De acordo com as pesquisas realizadas, o sistema de roda d'água do Museu WEG se classifica como uma roda d'água acionada por cima e esta classificação se dá pela forma como a água entra em contato com o sistema (Figura 9).

Figura 9 - Roda d' água acionada por cima.

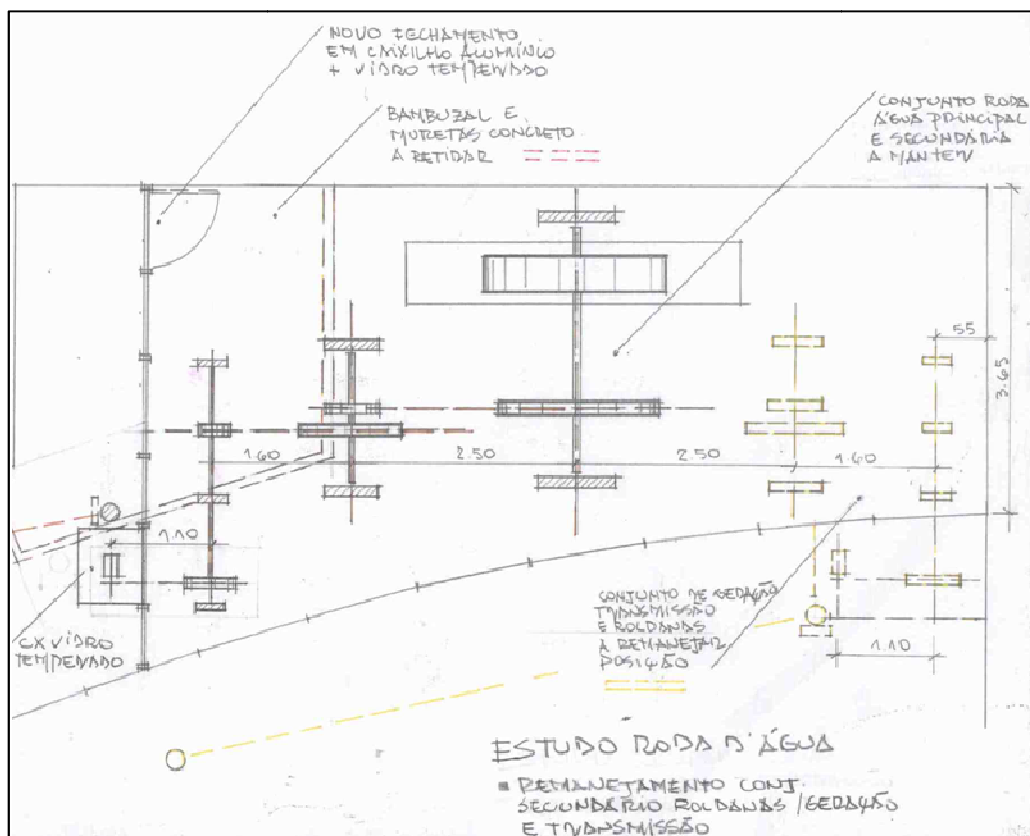


Fonte: Autor (2019).

Os componentes do sistema são construídos em madeira, exceto onde se necessita, obrigatoriamente, de componentes metálicos. A roda d'água transfere torque para o eixo que é apoiado em dois mancais de rolamento da marca FK embutidos nos suportes de madeira que sustentam a roda d'água. A transmissão de movimento ocorre através de polias de madeira ligadas por correias planas, sendo que a última polia do conjunto está ligada diretamente ao eixo do gerador síncrono. O gerador síncrono, por sua vez, é um alternador fabricado pela própria empresa

WEG. Na Figura 10 pode-se observar o rascunho do sistema de geração de energia por roda d'água esboçada pelos próprios idealizadores do sistema no Museu WEG.

Figura 10 - Esboço do sistema de geração de energia por roda d'água do Museu WEG.



Fonte: Arquivo histórico do Museu WEG.

Após a identificação do sistema de trabalho, foram obtidos os dados dimensionais e de funcionamento do mesmo, desde a roda d'água até o gerador. Para isso, com o sistema desligado, verificaram-se as dimensões do conjunto (diâmetros da roda d'água, diâmetro das polias, distância entre eixos) com o auxílio de uma trena métrica. Com o conjunto em funcionamento e o auxílio de um tacômetro, obteve-se a rotação do eixo da roda d'água e do eixo do gerador. Os dados dimensionais obtidos do sistema são apresentados a seguir.

4.1.1 Roda d'água

O diâmetro interno da roda d'água é de 3000 mm e sua largura de 360 mm, constituída de várias partes de madeira fixadas por parafusos, porcas e arruelas de classe 8.8, que se encontram deteriorados pela ação do tempo. Devido às

intempéries, foi constatada a ocorrência de algumas frestas nos canecos da roda d'água, o que acarreta o vazamento de água e a consequente perda da capacidade de geração de energia. Cada caneco da roda d'água tem capacidade de armazenar um volume aproximado de cinco litros de água. A roda d'água analisada é mostrada na Figura 11.

Figura 11 - Roda d'água do Museu WEG.



Fonte: Autor (2019).

4.1.2 Eixos

O eixo que sustenta a roda d' água e a primeira polia do conjunto, a motora, é feito de madeira maciça e tem perfil quadrado, sendo sua largura de 350 mm e seu comprimento de 3000 mm. Esse eixo apresenta suas extremidades de metal com 400 mm de comprimento e 45 mm de diâmetro, porém a forma como são construídos não garante o alinhamento do eixo, podendo prejudicar o sistema (Figura 12).

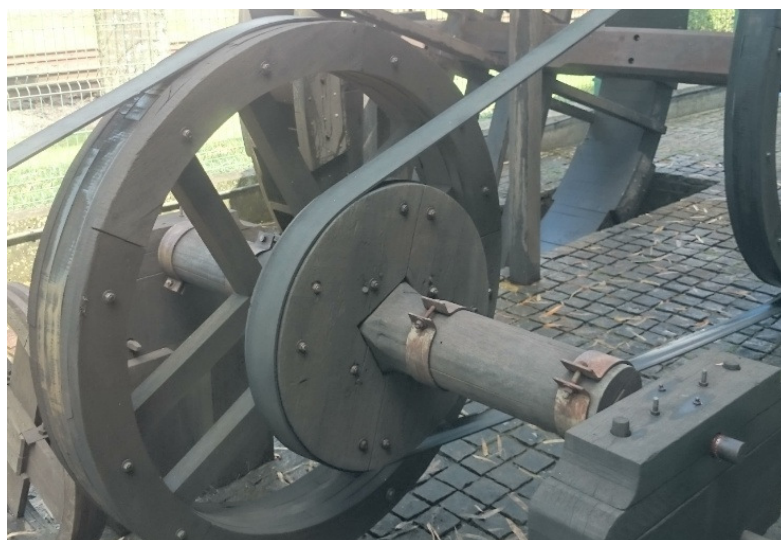
Figura 12 - Primeiro eixo do sistema.



Fonte: Autor (2019).

O segundo eixo, também de madeira, apresenta comprimento igual a 1250 mm e possui formato cilíndrico de diâmetro igual a 100 mm. Suas extremidades são de metal e apresentam as mesmas dimensões do primeiro eixo, sendo o encaixe para as polias de perfil quadrado. A Figura 13 mostra o segundo eixo com as polias.

Figura 13 - Segundo eixo do sistema.



Fonte: Autor (2019)

O terceiro eixo é todo de metal, perfil cilíndrico com diâmetro de 45 mm e comprimento de 2400 mm e liga o sistema de roda d'água ao gerador, como mostra a Figura 14.

Figura 14 - Terceiro eixo do sistema.



Fonte: Autor (2019)

O último eixo é o que sai do gerador, acomoda uma polia com diâmetro de 45 mm e largura suficiente apenas para acomodar a correia plana que transmite a rotação gerada pela parte anterior do sistema.

A distância mensurada entre o primeiro e o segundo eixo é de 2500 mm, entre o segundo e o terceiro é de 1600 mm e entre o terceiro eixo e o eixo do gerador a distância é de 1100 mm. A Figura 15 apresenta a perspectiva dos três eixos do conjunto.

Figura 15 - Eixos do conjunto



Fonte: Autor (2019).

4.1.3 Mancais

O primeiro eixo é sustentado por dois mancais de rolamento da marca FK, parafusados em dois suportes de madeira. Esses mancais são projetados para suportar forças radiais e uma pequena carga axial e sua lubrificação é feita com graxa. Devido à ação do tempo, os mancais encontram-se avariados apresentando oxidação e desgaste excessivo, o que diminui muito a eficiência do conjunto. Além disso, a descentralização do eixo no mancal indica que seus componentes internos estão danificados. É possível perceber que o eixo gira em contato com a carcaça do mancal gerando atrito. A Figura 16 evidencia os problemas apresentados.

Figura 16 - Mancal do primeiro eixo danificado.



Fonte: Autor (2019).

Uma possível causa do dano nos mancais é a presença de frestas nos canecos da roda d'água que acarreta o vazamento localizado de fluido e pode gerar um desbalanceamento no movimento de rotação. Esse desbalanceamento pode provocar vibrações no eixo e outros efeitos que são transmitidos diretamente para os mancais, causando dano aos elementos rolantes do mesmo. Além disso, o fato do eixo ser de madeira e apresentar apenas suas extremidades em metal, é uma possível causa de desalinhamento do eixo que, para rolamentos fixos de esfera, é totalmente prejudicial.

O segundo e o terceiro eixo estão acoplados diretamente em um furo passante pela madeira do suporte. Esta forma simples e de baixo custo de se utilizar a estrutura de sustentação como apoio direto do eixo de rotação é um fator relevante no desempenho do sistema, pois o atrito existente acaba por causar o desgaste prematuro da madeira, altera o nível da polia em relação ao solo e,

consequentemente, alteram as variáveis de projeto do conjunto polias/correia. A Figura 17 mostra o eixo acoplado diretamente na madeira e o evidente desgaste causado.

Figura 17 - Eixo acoplado direto na madeira causando desgaste.



Fonte: Autor (2019).

4.1.4 Polias e correias

O sistema de transmissão do movimento é composto por polias e correias planas. As polias são feitas de madeira com formato rústico e possuem uma cava na área de contato com a correia, onde está aparente o desgaste causado pelo atrito com as correias (Figura 18). Além disso, a polia fabricada com madeira sofre variação dimensional de acordo com as condições do ambiente externo, o que é prejudicial para o rendimento do sistema.

Figura 18 – Polia desgastada e correia do sistema



Fonte: Autor (2019).

A primeira polia apresenta diâmetro de 1700 mm, a segunda de 600 mm, a terceira de 1200 mm, a quarta de 300 mm, a quinta de 580 mm e o diâmetro da polia do eixo do gerador de 45 mm, sendo a largura igual a 120 mm para todas as polias. Já as correias são todas planas com largura padrão de 100 mm. As mesmas encontram-se deterioradas e com elevado desgaste devido à exposição ao tempo e ao longo período de trabalho sem as devidas manutenções.

4.1.5 Gerador

O gerador presente é do tipo síncrono fabricado pela empresa WEG. Também chamado de alternador, sua classificação se dá pelo número representativo do tamanho da carcaça, no caso 112. Ou seja, este número representa a distância entre o ponto de fixação da carcaça e o centro do eixo do gerador que é de 112 mm. O gerador é do tipo monofásico com potência de 1,5 KVA, rotação de 1800 RPM e frequência igual a 60 Hz. O gerador está sobre uma base de madeira apoiada no chão como mostra a Figura 19.

Figura 19 – Gerador acionado no final do sistema.



Fonte: Autor (2019)

A rotação entregue pelo sistema ao eixo do gerador é de 2500 RPM, ou seja, 38% maior do que a rotação nominal do gerador. Essa diferença é benéfica ao sistema, pois, por se tratar de um gerador síncrono, o trabalho com uma rotação inferior à nominal resultaria em consumo de energia pelo gerador e não a sua produção. Isso ocorre devido à tensão produzida no gerador ser menor do que a tensão da rede em que está conectado, dessa forma, o gerador passa a consumir

energia da rede como se fosse um motor, buscando igualar as tensões. Devido a essa situação o sistema deve fornecer ao gerador uma rotação superior à nominal capaz também de compensar possíveis oscilações no sistema e, assim, garantir o perfeito funcionamento do gerador.

4.1.6 Eficiência do conjunto

Com o auxílio das equações apresentadas no item de fundamentação teórica e o cruzamento dos dados obtidos, é possível determinar a eficiência real do conjunto. Para isso, deve-se primeiramente determinar as relações de transmissão existentes entre as polias do sistema de geração de energia. Através da Equação 4 é possível obter as seguintes relações de transmissão mostradas no Quadro 1.

Quadro 1 - Relações de transmissão entre as polias do conjunto.

Relações de transmissão	
i_1	12,89
i_2	4,00
i_3	2,83

Fonte: Autor (2019).

Onde, i_1 corresponde à relação de transmissão existente entre a última polia e o gerador, i_2 corresponde à relação de transmissão intermediária e i_3 corresponde à relação de transmissão entre a primeira polia e a segunda polia do conjunto.

Assim, também através da Equação 4 é possível determinar a rotação teórica de cada eixo a partir da rotação da roda d'água, que é de 20 rpm. A rotação de cada polia do conjunto é apresentada no Quadro 2 .

Quadro 2 - Rotações de cada polia do conjunto.

Rotações		
n_1	2921,48	rpm
n_2	226,67	rpm
n_3	226,67	rpm
n_4	56,67	rpm
n_5	56,67	rpm
n_6	20,00	rpm

Fonte: Autor (2019).

Onde: n_6 é a rotação da roda d'água e n_1 a rotação teórica no eixo do gerador.

Teoricamente, pode-se concluir que o sistema de transmissão empregado fornece um acréscimo na rotação, desde a roda d'água até o gerador, de aproximadamente 146 vezes a rotação inicial. Porém, considerando o sistema instalado e verificando a rotação real do gerador, percebe-se que o aumento na rotação é menor do que o constatado teoricamente. Isso se deve às perdas de energia de movimento existentes no sistema, sendo grande parte provocada pelos componentes mecânicos presentes no conjunto.

Para obter a rotação real no gerador foi utilizado o tacômetro, onde a medição foi realizada no eixo do gerador, constatando 2500 rpm.

A eficiência atual do sistema de geração de energia por roda d'água foi determinada pela aplicação das relações de transmissão, que indicaram o valor teórico, que relaciona as rotações teóricas com as reais do gerador, resultando numa eficiência de 86%, o que pode ser considerado um bom rendimento para a condição em que se encontra o sistema.

4.1.7 Contribuição dos componentes mecânicos na eficiência total do conjunto

De posse de todas as informações referentes ao sistema de geração de energia por roda d'água atual, pode-se então analisar a contribuição de cada componente do sistema para a eficiência total do conjunto. Para isso, foi realizado um *checklist* dos componentes do sistema classificando-os de acordo com o impacto para a eficiência do conjunto conforme apresentado na Tabela 2. Assim, é possível propor soluções mecânicas pontuais e concentrar o investimento em ações que gerem de fato retorno na eficiência do sistema.

Tabela 2 – *Checklist* dos pontos críticos por ordem de impacto na eficiência.

Ordem de impacto	Componentes
1	Mancais
2	Eixos.
3	Polias
4	Alinhamento.
5	Fresta nos canecos onde ocorre muita perda de água.
6	Estado de conservação
7	Gerador

Fonte: Autor (2019).

Dentre todos os elementos de máquina presentes nesse sistema de geração de energia por roda d'água, pode-se afirmar que os mancais são os mais críticos.

4.2 Soluções mecânicas propostas visando o aumento da eficiência do sistema

De acordo com o apresentado anteriormente, sugere-se possíveis soluções visando aumentar a eficiência mecânica do conjunto.

Para os mancais a serem utilizados nos eixos do sistema, os requisitos principais a serem levados em consideração na escolha dos componentes mecânicos são: compensação de possíveis desalinhamentos dos eixos, sistema de lubrificação que restrinja a contaminação por poeira ou umidade, suportar de cargas radiais e pequenas cargas axiais que possam surgir do desalinhamento do eixo, além de um sistema que garanta a transmissão entre as correias e polias.

A lubrificação dos elementos de apoio do sistema normalmente é feita utilizando óleo ou graxa. O óleo permite uma rolagem dos elementos sem muita resistência, pelo fato de um ser líquido viscoso. Em contrapartida, o risco de vazamentos e possíveis contaminações do óleo são maiores em relação à graxa. Outra possibilidade é a utilização de rolamentos blindados o que evita a contaminação por poeira e umidade.

De acordo com os requisitos apresentados, pode-se concluir que para os dois primeiros eixos os mancais de rolamento autocompensadores são os mais indicados por suportar cargas radiais e admitir o desalinhamento observado no eixo. Dentre os autocompensadores pode-se aplicar, neste caso, tanto rolamentos de esferas quanto rolamentos de rolos. A lubrificação desses mancais pode ser feita por óleo ou graxa, as duas situações atendem a aplicação, desde que as caixas de rolamentos sejam apropriadas para tal. Apesar de ser projetado para altas forças radiais e baixas rotações, o mancal de bucha também necessita de um perfeito alinhamento e balanceamento entre eixo e mancal, o que não acontece neste caso.

No terceiro eixo pode-se optar pela aplicação de um mancal de rolamento fixo de esferas, sendo que o rolamento não necessita suportar grande carga radial, mas sim uma maior rotação. O eixo é totalmente metálico o que garante a facilidade no ajuste do seu alinhamento. O sistema de lubrificação pode ser adotado a exemplo dos mancais anteriores, graxa ou óleo atendem desde que a caixa seja de acordo com a aplicação.

No primeiro e segundo eixos, ao que tudo indica as extremidades metálicas de ambos são apenas acopladas na madeira, o que gera um desalinhamento do eixo. Sendo assim, uma alternativa para eliminar o desalinhamento do eixo, de modo a preservar as características da época, seria a instalação de um eixo de metal que atravessasse por completo a madeira. Visto que, um eixo de metal bem dimensionado apresenta resistência mecânica adequada e garante as tolerâncias necessárias ao bom funcionamento do conjunto. Caso o uso de rolamentos autocompensadores solucione este problema, descarta-se esta opção.

Tendo em vista que as características da época devem ser mantidas, o sistema de transmissão permanece sendo através de polias e correias. Uma opção seria adaptar correias dentadas para transmitir a rotação, garantindo assim que não haja o escorregamento de ambas as partes e a perda da eficiência. Para isso, seria necessária a troca de todas as polias e correias, o que aumenta consideravelmente o custo, além de descaracterizar o sistema. Outra opção seria apenas revestir a área de contato das polias com as correias, por algum material com resistência ao desgaste garantindo o atrito necessário para a transmissão (borracha, polímero ou metal). Podem-se usar como exemplo, as rodas de carroça que são de madeira revestida de metal com o intuito de evitar o desgaste da madeira em relação ao solo. Sendo assim, devem-se manter as correias planas e acrescentar um revestimento nas polias. O formato da face das polias poderá ser abaulado se o objetivo for de guiar melhor as correias, ou reta se a intenção for conservar melhor a correia e conseqüentemente, aumentar sua vida útil.

4.2.1 Seleção dos componentes mecânicos visando a melhor relação custo/vida

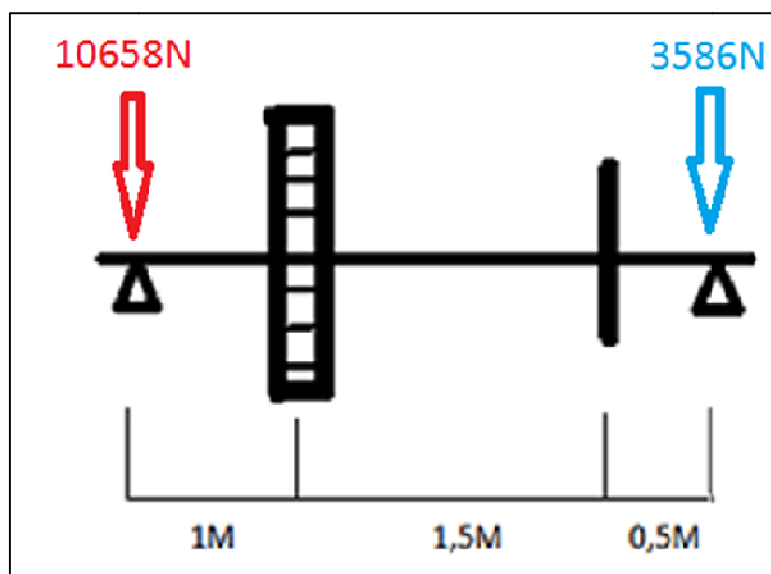
Dentre as soluções propostas, devem-se escolher os componentes que apresentam melhor relação custo/vida. Tendo em vista que um componente caro, adotado em um local que não traga um ganho significativo na eficiência, torna-se desnecessário.

Sendo assim, a opção mais adequada para os elementos de apoio do primeiro e segundo eixo são mancais de rolamento autocompensadores de esferas. Optou-se pelo rolamento autocompensador de esfera, pois este permite um maior ângulo de inclinação em relação ao rolamento autocompensador de rolos. O autocompensador de esferas pode ser utilizado para inclinações de 4 a 7 graus,

enquanto que o autocompensador de rolos permite apenas inclinações de 1 a 2,5 graus. Em relação ao custo ambos são equivalentes.

Para determinar o rolamento levou-se em consideração a massa de 1000 kg da roda d' água, juntamente com a massa da primeira polia, 300 kg, resultando, respectivamente, nas cargas radiais sobre os mancais de 10658N e 3586N. Essas forças estão representadas na Figura 20.

Figura 20 - Forças nos mancais primeiro eixo.



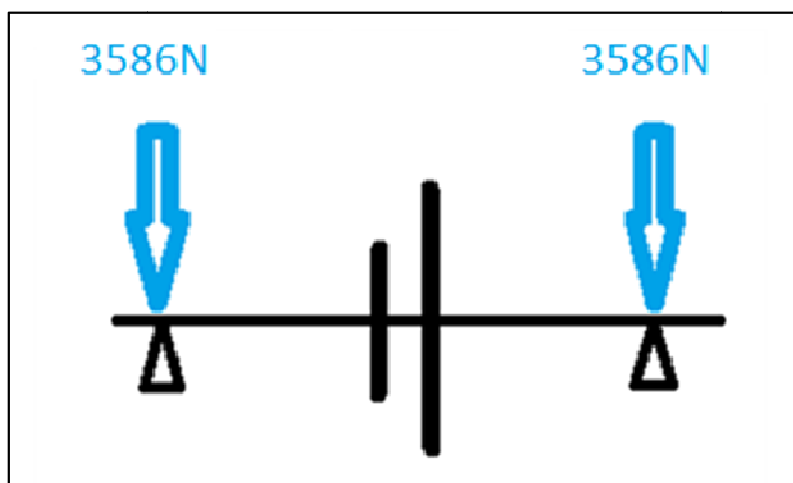
Fonte: Autor (2019).

Considerando que o diâmetro do eixo é de 45 mm e aplicando a Equação 3, foram selecionados para o primeiro eixo os rolamentos 2309 e 1209, de acordo com a força radial exercida pela roda d' água.

A vida útil mínima calculada para o rolamento mais crítico é de 13 anos. Devido o caso mais crítico atender 13 anos, todos os outros com carga inferior devem atender no mínimo a mesma vida útil.

Para o segundo eixo o rolamento selecionado foi 1209 para ambos os lados, pois, se considerou que a força suportada em cada um dos mancais é equivalente à força suportada no segundo mancal do primeiro eixo. A Figura 21 mostra o segundo eixo e a força considerada em cada mancal.

Figura 21 - Forças nos mancais segundo eixo



Fonte: Autor (2019)

Já para o terceiro eixo a melhor opção seria o uso do rolamento de esferas blindado 6309, pois o eixo não possui desalinhamento significativo, além de ser submetido a forças radiais pequenas, possuir uma velocidade alta em relação aos outros eixos e ter um custo relativamente baixo em comparação com outros modelos. O terceiro eixo a força para os cálculos também foi estimada em 3586N.

A seleção das caixas que acomodarão os rolamentos depende, principalmente, do diâmetro do eixo e do rolamento escolhido. Para isso, foi necessário consultar os catálogos de fabricantes, onde foram definidas as caixas conforme apresentado na Figura 22.

Figura 22 - Referências das caixas em relação ao rolamento.

45	1209 2209 22209	2 FRB 85/5,5 2 FRB 85/3,5 2 FRB 85/3,5	SNH 509
	1309 2309 21309 22309	2 FRB 100/9,5 2 FRB 100/4 2 FRB 100/9,5 2 FRB 100/4	SNH 511-609

Fonte: Catalogo FCM Caixas

Para o rolamento autocompensador de esferas 2309 o mancal adequado é o SNH 511-609 e para o rolamento 1209 o mancal que atende a necessidade é a SNH 509. Para o rolamento de esferas blindado 6309, pode-se de acordo com um

profissional da área, utilizar o mancal SNH 511-609, pois as dimensões do rolamento permitem o seu ajuste nesse mancal.

Considerando o sistema de transmissão polias/correia, a opção de menor custo e vida útil para o sistema é o revestimento das polias com chapas de metal, semelhantes às utilizadas nas rodas de carroça, com sulcos na face para garantir a transmissão de movimento com boa aderência da correia e melhorar sua eficiência. A superfície de contato das polias com as correias permanecerá reta para garantir a maior vida útil das correias, que serão do tipo plana com largura de 100 mm, conforme calculada pela Equação 6. A correia plana escolhida é a F HS – 100 conforme apresentada na Figura 23.

Figura 23 - Largura correias.

Perfil HS	
<i>Referência</i>	<i>Largura (mm)</i>
F HS - 10	10,0
F HS - 15	15,0
F HS - 20	20,0
F HS - 25	25,0
F HS - 30	30,0
F HS - 40	40,0
F HS - 85	85,0
F HS - 100	100,0
F HS - 120	120,0

Fonte: Catálogo continental para correia plana.

O comprimento das correias foi determinado pela Equação 5, sendo de 5000 mm para a primeira, 3000 mm para a segunda e 2000 mm para a terceira e última correia do sistema, tendo como base a distância entre centros das polias.

O modelo da correia é representado por números e letras definindo o comprimento, a largura e o tipo do cabo de tração. A sequência inicia pela letra M seguida do comprimento da correia em metros, a letra F representa o tipo de correia plana seguida de sua largura e as duas últimas letras representam o tipo do cabo de tração (Figura 24).

Figura 24 - Especificação das correias.

ESPECIFICAÇÃO																			
M30 - F - 20 - HP																			
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">A</div> <div style="text-align: center;">B</div> <div style="text-align: center;">C</div> <div style="text-align: center;">D</div> </div>																			
<p> (A) M30 = Comprimento do rolo (m) (B) F = Correia plana Conti Polyflat (C) 20 = Largura da correia 20mm (D) HP = Tipo do cabo de tração HP (high power) </p>																			
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th></th> <th>F HP</th> <th>F HF</th> <th>F HS</th> <th>F XHP</th> <th>F XHS</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Espessura</td> <td>h (mm)</td> <td>2,3</td> <td>2,1</td> <td>2,5</td> <td>3,0</td> <td>4,5</td> </tr> </tbody> </table>								F HP	F HF	F HS	F XHP	F XHS	Espessura	h (mm)	2,3	2,1	2,5	3,0	4,5
		F HP	F HF	F HS	F XHP	F XHS													
Espessura	h (mm)	2,3	2,1	2,5	3,0	4,5													

Fonte: catalogo continental correia plana

Sendo assim, para o primeiro par de polias o modelo da correia será o M5F100HS, o modelo M3F100HS será para o segundo par e para o terceiro par o modelo será o M2F100HS, onde a designação HS especifica que a correia apresenta cabo de tração com resistência elevada.

A avaliação do sistema de geração de energia por roda d'água tem o objetivo de auxiliar na percepção de pontos críticos dentro do sistema e que devem ser tratados de modo a garantir a melhor eficiência do processo. Não basta o sistema entregar uma rotação elevada ao gerador, é necessário que os elementos do sistema garantam o bom desempenho ao decorrer dos longos períodos de trabalho. Para isso é necessário um planejamento de manutenção para o sistema, a fim de garantir a lubrificação dos elementos de apoio e verificar possíveis falhas que possam prejudicar todo um sistema.

5 CONCLUSÃO

A partir da análise dos resultados obtidos neste trabalho, é possível inferir as seguintes conclusões:

Primeiramente o sistema de geração de energia por roda d'água foi submetido a um processo de reconhecimento de seus componentes e a determinação da eficiência do conjunto. Como as rotações mensuradas da roda d'água e do gerador foram, respectivamente, 20 rpm e 2500 rpm, a eficiência do conjunto resultou em 86%.

Os mancais foram identificados como os componentes de maior importância para a eficiência do conjunto. A opção foi por mancais de rolamentos autocompensadores de esferas para os eixos mistos (madeira e metal). Já para o eixo produzido exclusivamente de metal, a opção foi por um mancal de rolamento fixo de esferas. Optou-se pelos rolamentos autocompensadores de esferas 2309 e 1209 e pelo rolamento rígido de esferas 6309.

Devido à opção por rolamentos autocompensadores, possíveis mudanças nos eixos não foram consideradas, pois uma mudança na construção dos eixos mistos elevaria grandemente o custo em relação ao valor de compra dos rolamentos autocompensadores.

As dimensões do sistema de transmissão polias/correia não foram alteradas, apenas sugerido o revestimento das polias com chapas de metal apresentando sulcos na face. Considerando a distância entre eixos do sistema atual, o comprimento calculado das correias foi de 5000 mm para a primeira, 3000 mm para a segunda e 2000 mm para a terceira e última correia do sistema. Como a largura das polias não varia, o cálculo da largura das correias resultou em 100 mm. Assim as correias selecionadas foram M5F100HS, M3F100HS e M2F100HS.

O melhor aproveitamento da energia hídrica disponível poderia ser alcançado através da vedação das frestas dos canecos da roda d'água. Esta opção não foi considerada no trabalho, pois o objetivo principal estava concentrado na análise da contribuição dos componentes mecânicos para a eficiência no processo de geração de energia.

Por fim, pode-se concluir que o gerador síncrono utilizado nesse processo é adequado para a aplicação, pois a rotação fornecida pelo sistema supera a rotação nominal do gerador mantendo um saldo na geração de energia em relação à tensão

da rede elétrica.

Não foi possível quantificar o ganho da eficiência, mas uma opção para trabalhos futuros seria realizar as alterações propostas calculando a eficiência do sistema a cada alteração sugerida.

REFERÊNCIAS

- BIESEK JÚNIOR, Luís Carlos. **Detecção de desalinhamento por análise de vibração**. 2017. 87 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2017
- BIM, Edson. **Máquinas elétricas e acionamento**. 3. ed. Rio de Janeiro: Campus/Elsevier, 2014. 571 p., il. Inclui bibliografia. ISBN 9788535277135.
- BORGES NETO, Manuel Rangel; CARVALHO, Paulo Cesar Marques. **Geração de energia elétrica: fundamentos**. São Paulo: Érica, 2012. 158 p., il. ISBN 9788536504223.
- BRAGA, Benedito. **Introdução à engenharia ambiental**. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010. 318 p., il. Inclui bibliografia. ISBN 9788576050414.
- BUDYNAS, Richard G.; NISBETT, J. Keith. **Elementos de máquinas de Shigley**: projeto de engenharia mecânica. Tradução de João Batista de Aguiar, José Manoel de Aguiar. 8. ed. rev. Porto Alegre: AMGH, 2011. 1084 p., il. ISBN 9788563308207.
- FABRICA DE MANCAIS CURITIBA (Curitiba). FMC. **Caixas SNH**: Catalogo Eletrônico. Curitiba: Light Works, 2001. 29 p.
- FREITAS, Walmir et al. Análise comparativa entre geradores síncronos e geradores de indução com rotor tipo gaiola de esquilo para aplicação em geração distribuída. Revista **Controle & Automação**, Campinas, p.1-13, 01 maio 2004.
- GENEROSO, Daniel João. **Elementos de máquinas**. Araranguá: Apostila, 2009. 74p.
- GOLDEMBERG, José; LUCON, Oswaldo. **Energia e meio ambiente no Brasil**. Estudos Avançados, São Paulo, v. 1, n. 14, p.1-14, 24 nov. 2016.
- HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de física**. 9. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2012 vol 1;
- HARWOOD, John Harry. Comparação de três rotores feitos localmente com eixos em diferentes dimensões extraindo energia cinética hidráulica dos rios amazônicos. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 2, n. 11, p.167-177, 11 nov. 1979.
- HINRICHS, Roger; KLEINBACH, Merlin; REIS, Lineu Belico dos. **Energia e meio ambiente**. São Paulo: Cengage Learning, 2014. 764 p., il. ISBN 9788522116171.
- ISBECK, Hilbert James W. **Uma Nova Metodologia de Solução para Sistemas de Mancais Radiais em Carregamento Dinâmico Incluindo Atrito Sólido e Desgaste**. 2000. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica,

Universidade Federal, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000. Cap. 5.

MAGALHÃES, Aline Souza; DOMINGUES, Edson Paulo. **Aumento da eficiência energética no Brasil: uma opção para uma economia de baixo carbono**. Economia Aplicada, Belo Horizonte, v. 2, n. 11, p.274-310, 24 jun. 2015.

MOTION E CONTROL NSK (Brasil- SP). NSK Brasil (Org.). **Rolamentos: Catálogo Geral de Rolamentos**. São Paulo: NSK Brasil, 2013. 557 p

PACHECO, Fabiana. Energias Renováveis: breves conceitos. **Conjuntura e Planejamento**, Salvador, v. 1, n. 8, p.1-8, 11 out. 2016.

PINHO, Evandro Rafael. **Produção de energia elétrica sustentável a partir do fluxo de água do arroio dilúvio**. 2017. 43 f. TCC (Graduação) -Curso de Engenharia Elétrica, Curso de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS), Porto Alegre, 2017.

POÇAS, Manuel. **A roda de água**. Ranicultura: Esta na hora de dar o salto, Portugal, v. 6, n. 7, p.1-6, jun. 2013.

POWER TRANSMISSION GROUP (São Paulo). Continental Correias. **Catálogo de Produtos Correias de Transmissão Industrial: Correias**. São Paulo: Csc Service, 2004. 88 p.

SANTOS, Rômulo Matos dos. **Construção de uma bomba d'água, acionada por roda d'água, construídas com materiais alternativos**. 2011. 35 f. TCC (Graduação) - Curso de Pós Graduação, Universidade Federal, Universidade Federal de Lavras,, Paracatu, 2011.

SILVA, Débora Ariana Correa da; SANTOS, Érika Barbosa dos. **Conceitos essenciais sobre mancais de rolamento e de deslizamento**. Fatecgarca, São Paulo, v. 1, n. 10, p.1-10, 13 mar. 2012.

SOUZA, Idefonso Miguel de; SOUZA, Idefonso Miguel de. **Roda d água confeccionada em madeira para acionar bomba de água em propriedades rurais**. Soluções Para O Desenvolvimento do país, São Paulo, v. 1, n. 10, p.1-10, 06 jun. 2006.

SOUZA, Jeferson Carneiro de. **Desenvolvimento de aplicativo de análise técnica e econômica para adaptação de uma roda d'água acionada por cima para geração de energia elétrica no meio rural**. 2011. 61 f. TCC (Graduação) - Curso de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho, Guaratinguetá, 2011.

WEG (Brasil). Grupo Weg (Org.). **Alternadores**. 2019. Disponível em: <<https://www.weg.net>>. Acesso em: 21 abr. 2019.