

Organizadores
Henrique Ajuz Holzmann
Géssica Katalyne Bilcati

Engenharia mecânica:

conceitos fundamentais
e aplicações práticas

 **Atena**
Editora
Ano 2024

Organizadores
Henrique Ajuz Holzmann
Géssica Katalyne Bilcati

Engenharia mecânica:

conceitos fundamentais
e aplicações práticas

 **Atena**
Editora
Ano 2024

Editora chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Editora executiva

Natalia Oliveira

Assistente editorial

Flávia Roberta Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto gráfico

Camila Alves de Cremo

Ellen Andressa Kubisty

Luiza Alves Batista

Nataly Evilin Gayde

Thamires Camili Gayde

Imagens da capa

iStock

Edição de arte

Luiza Alves Batista

2024 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2024 Os autores

Copyright da edição © 2024 Atena

Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição-Não-Comercial-NãoDerivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. Permitido o *download* da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

Conselho Editorial

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Profª Drª Alana Maria Cerqueira de Oliveira – Instituto Federal do Acre

Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

Profª Drª Ana Paula Florêncio Aires – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná

Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia

Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará

Prof. Dr. Fabrício Moraes de Almeida – Universidade Federal de Rondônia

Profª Drª Glécilla Colombelli de Souza Nunes – Universidade Estadual de Maringá

Profª Drª Iara Margolis Ribeiro – Universidade Federal de Pernambuco

Profª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho

Prof. Dr. Juliano Bitencourt Campos – Universidade do Extremo Sul Catarinense

Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande

Profª Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá

Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora

Profª Drª Maria José de Holanda Leite – Universidade Federal de Alagoas

Prof. Dr. Miguel Adriano Inácio – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Prof. Dr. Milson dos Santos Barbosa – Universidade Tiradentes

Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte

Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba

Prof. Dr. Nilzo Ivo Ladwig – Universidade do Extremo Sul Catarinense

Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas

Profª Dr Ramiro Picoli Nippes – Universidade Estadual de Maringá

Profª Drª Regina Célia da Silva Barros Allil – Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí

Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Engenharia mecânica: conceitos fundamentais e aplicações práticas

Diagramação: Camila Alves de Cremo
Correção: Maiara Ferreira
Indexação: Amanda Kelly da Costa Veiga
Revisão: Os autores
Organizadores: Henrique Ajuz Holzmänn
 Géssica Katalyne Bilcati

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)	
E57	Engenharia mecânica: conceitos fundamentais e aplicações práticas / Organizadores Henrique Ajuz Holzmänn, Géssica Katalyne Bilcati. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2024. Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web Inclui bibliografia ISBN 978-65-258-2218-1 DOI: https://doi.org/10.22533/at.ed.181240202 1. Engenharia mecânica. I. Holzmänn, Henrique Ajuz (Organizador). II. Bilcati, Géssica Katalyne (Organizadora). III. Título. CDD 621
Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166	

Atena Editora
 Ponta Grossa – Paraná – Brasil
 Telefone: +55 (42) 3323-5493
www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br

DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.

DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access*, *desta forma* não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce*, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.

Engenharia Mecânica pode ser definida como o ramo da engenharia que aplica os princípios de física e ciência dos materiais para a concepção, análise, fabricação e manutenção de sistemas mecânicos. O aumento no interesse por essa área se dá principalmente pela escassez de matérias primas, a necessidade de novos materiais que possuam melhores características físicas e químicas e a necessidade de reaproveitamento dos resíduos em geral.

Nos dias atuais a busca pela redução de custos, aliado a qualidade final dos produtos é um marco na sobrevivência das empresas, reduzindo o tempo de execução e a utilização de materiais.

Neste livro são apresentados trabalho teóricos e práticos, relacionados a área de mecânica, dando um panorama dos assuntos em pesquisa atualmente. A caracterização dos materiais é de extrema importância, visto que afeta diretamente aos projetos e sua execução dentro de premissas técnicas e econômicas.

De abordagem objetiva, a obra se mostra de grande relevância para graduandos, alunos de pós-graduação, docentes e profissionais, apresentando temáticas e metodologias diversificadas, em situações reais. Sendo hoje que utilizar dos conhecimentos científicos de uma maneira eficaz e eficiente é um dos desafios dos novos engenheiros.

Henrique Ajuz Holzmann
Géssica Katalyne Bilcati

CAPÍTULO 1 1**UMA ANÁLISE SOBRE O DESENVOLVIMENTO DE FLUIDOS DE CORTE E MATERIAIS DE FERRAMENTAS FRENTE AO CALOR NA USINAGEM**

Bruno de Paulo Novaes
 João Pedro de Souza Nunes
 Gustavo José Corrêa Gonçalves
 Marcelo Rodrigo Munhoz
 Fernando Sabino Fonteque Ribeiro

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.1812402021>

CAPÍTULO 2 14**ANÁLISE DO DESGASTE DE INSERTOS DE METAL DURO PARA TORNEAMENTO DE AÇOS SAE1020 E SAE1045**

Thiago José Rogério Borges
 Fabiano Henrique de Amorim
 Gustavo José Corrêa Gonçalves
 Marcelo Rodrigo Munhoz
 Ricardo Breganon
 Fernando Sabino Fonteque Ribeiro

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.1812402022>

CAPÍTULO 326**INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DE PARÂMETROS QUE CARACTERIZAM O ESCOAMENTO EM CANAL ABERTO**

Hélio Augusto Goulart Diniz
 Aniel de Melo Dias
 Liliane Cruz Gomes de Souza Santos

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.1812402023>

CAPÍTULO 436**ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL RECURSO EÓLICO Y LOS PARÁMETROS ELÉCTRICOS DE UN AEROGENERADOR DE BAJA POTENCIA EN LA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA - SEDE DE AYABACAS**

Armando Antonio Salinas Del Carpio
 Pamela Milagros Condori Huancapaza
 Javier Alvaro Rivera Suaña
 Raúl Reynaldo Ito Díaz
 Cristhian Yimmy Hilasaca Zea
 Alberto Paricahua Huaynapata

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.1812402024>

CAPÍTULO 546**MODELAGEM VIRTUAL DE UM ROTOR DE TURBINA TIPO FRANCIS**

Tiago de Lima
 Géssica Katalyne Bilcati
 Henrique Ajuz Holzmänn

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.1812402025>

SOBRE OS ORGANIZADORES62

ÍNDICE REMISSIVO63

UMA ANÁLISE SOBRE O DESENVOLVIMENTO DE FLUIDOS DE CORTE E MATERIAIS DE FERRAMENTAS FRENTE AO CALOR NA USINAGEM

Data de aceite: 01/02/2024

Bruno de Paulo Novaes

Departamento de Engenharia Mecânica
– Centro Universitário das Faculdades
Integradas de Ourinhos-Unifio/FEMM

João Pedro de Souza Nunes

Departamento de Engenharia Mecânica
– Centro Universitário das Faculdades
Integradas de Ourinhos-Unifio/FEMM

Gustavo José Corrêa Gonçalves

Departamento de Engenharia Mecânica
– Centro Universitário das Faculdades
Integradas de Ourinhos-Unifio/FEMM

Marcelo Rodrigo Munhoz

Departamento de Engenharia Mecânica
– Centro Universitário das Faculdades
Integradas de Ourinhos-Unifio/FEMM

Fernando Sabino Fontequê Ribeiro

Departamento de Engenharia Mecânica
– Centro Universitário das Faculdades
Integradas de Ourinhos-Unifio/FEMM

RESUMO: A usinagem é reconhecidamente o processo de fabricação mais popular do mundo, transformando em cavacos algo em torno de 10% de toda a produção de metais e empregando dezenas de milhões de pessoas. Sabe-se que durante o processo

é gerado uma alta concentração de calor devido ao atrito e força que a ferramenta de corte realiza na peça, danificando-as e encarecendo o processo, sendo necessário a utilização de meios para refrigeração e lubrificação do trabalho. Sendo assim, este trabalho tem como objetivo aprofundar de que forma esse calor é gerado e transparecido para os componentes de trabalho, e explicar a importância dos fluidos refrigerantes e lubrificantes, bem como outras alternativas propostas para melhores condições de usinagem.

PALAVRAS-CHAVE: *Usinagem. Calor. Fluidos. Refrigeração. Lubrificação.*

AN ANALYSIS OF THE DEVELOPMENT OF CUTTING FLUIDS AND TOOL MATERIALS IN THE FACE OF HEAT IN MACHINING

ABSTRACT: Machining is recognized as the most popular manufacturing process in the world, transforming into chips something around 10% of all metal production and employing tens of millions of people. It is known that during the process a high concentration of heat is generated due to the friction and force that the cutting tool exerts on the piece, damaging them and making the process more expensive,

requiring the use of means for cooling and lubrication of the work. Therefore, this work aims to deepen how this heat is generated and transmitted to the working components, and to explain the importance of coolants and lubricants, as well as other proposed alternatives for better machining conditions.

KEYWORDS: *Machining. Heat. Fluids. Refrigeration. Lubrication.*

INTRODUÇÃO

A usinagem é a modificação da matéria prima através da remoção de cavaco, sendo utilizado para isso, uma ferramenta com aresta de corte. Esse contato da ferramenta com a matéria prima, devido a força causada, gera calor entre os dois itens, chegando a elevadas temperaturas, onde é necessário a utilização de alguns meios para refrigerar ambas as partes e facilitar o processo de fabricação.

Segundo Trent (1988), a maior parte da potência consumida na usinagem dos metais é convertida em calor próximo à aresta de cortante da ferramenta e muitos problemas técnicos e econômicos são causados direta e indiretamente por conta desse aquecimento. Esses problemas estão ligados diretamente com a ferramenta, onde pode ocorrer o desgaste mais rapidamente, diminuir a quantidade de cavaco a ser retirado, a velocidade de usinagem e deixar o processo com o custo mais elevado (MACHADO, A. et al, 2015).

Durante muito tempo foi pensado em uma forma de diminuir esse calor gerado e tentar entender como ocorre esse fluxo de calor e a distribuição de temperatura na ferramenta e na peça. Em 1978, foi apresentado pela primeira vez na Academia Real de Londres, pelo Conde Rumford (Benjamin Thompson), o registro de experiências em usinagem, realçando seu aspecto térmico (FERRARESI, 1977). Os métodos utilizados foram os do calorímetro, que consiste em medir a temperatura da água que envolve a peça em usinagem, a ferramenta e o cavaco, sendo notado que toda energia mecânica da usinagem se transforma em energia térmica (MACHADO, A. et al, 2015).

Outros métodos utilizados para análise do calor na usinagem, o tempo que a ferramenta desgasta, as alterações na peça e o local que mais dissipa calor, foram utilizados termopares e também um verniz térmico que muda de cor de acordo com a variação da temperatura (40°C a 650°C). Diversos estudiosos se empenharam para esse estudo, sendo utilizado os mesmos parâmetros para todos os testes e alterando o material a ser usinado.

Dessa forma, verifica-se que o problema relacionado ao calor da usinagem é histórico, sendo contornado por técnicas como aplicação de fluidos de corte ou o uso de materiais resistentes ao calor nas ferramentas de corte. No entanto, a alta produtividade tem sido fator importante no aumento das velocidades de corte e de avanço, fazendo que maior quantidade de calor seja gerada (RIBEIRO, 2019).

Isto posto, este trabalho tem como foco entender como é gerado o calor no processo de usinagem, quais os tipos de fluidos de corte e suas vantagens e desvantagens que eles agregam no processo de fabricação, bem como a identificação de materiais de ferramentas

de corte e sua resistência ao calor.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste, foram realizadas pesquisas no âmbito de artigos científicos, dissertações de mestrado e trabalhos de conclusão de curso (TCC), bem como em livros conceituados na área de usinagem. A princípio, foram determinadas as etapas a serem elaboradas, conforme apresentada no fluxograma da Figura 01 abaixo:



Figura 01 – Fluxograma

Todos os tópicos abaixo, serão tratados mais detalhadamente ao decorrer deste artigo, onde se poderá fazer uma associação entre eles e identificar quais os benefícios para cada tipo de operação.

Dissipação de calor: tem um papel fundamental para o desempenho da operação, a qualidade da peça usinada e a vida útil das ferramentas de corte. Estão algumas das razões pelas quais a dissipação de calor é importante na usinagem de materiais: evitar o superaquecimento, prolongar a vida útil da ferramenta, melhorar a qualidade superficial, manter tolerâncias dimensionais.

Fluidos de corte: serão apresentadas características, vantagens e desvantagens, problemas e soluções acerca de grande parte dos fluidos usados na usinagem de materiais.

Revestimentos de ferramentas: oferecem uma série de benefícios que melhoram a eficiência, a qualidade e a economia do processo. São algumas das principais razões pelas quais os revestimentos de ferramentas são importantes na usinagem: prolongamento da vida útil da ferramenta, melhoria do desempenho de corte, aumento da velocidade de corte, redução da dissipação de calor, maior versatilidade, melhoria na qualidade da superfície, redução do consumo de energia, redução de resíduos.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

É possível distinguir a temperatura que está sendo gerada na usinagem sem refrigeração pela cor e as condições de interface (aderência, escorregamento ou aresta postiça de corte) do cavaco gerado no trabalho, onde as cores podem variar no azul, roxo, vermelho, amarelo, entre outras. Pela forma, o cavaco quando está em uma temperatura mais baixa, tende a se quebrar mais facilmente pela saída de cavaco da ferramenta de corte, porém quando se está em temperaturas elevadas, ele fica mais difícil de se quebrar, no caso de um material dúctil, se transformando em um cavaco contínuo.

Na usinagem, quanto maior a velocidade de corte e a profundidade de corte, maior o calor gerado entre peça e ferramenta. Segundo Trigger e Chao (1951), assumiram que no processo de furação, cerca de 10% da energia mecânica despendida em cisalhamento fluem para a peça (MACHADO, A. et al, 2015).

O estudo da interação entre o cavaco e a ferramenta na sua superfície de saída é tratado como um problema de uma fonte móvel de calor em um contato deslizante sobre um corpo. O material deixa o plano de cisalhamento já aquecido e desliza pela superfície de saída da ferramenta. Nessas condições de contato muito boas o coeficiente de atrito pode variar entre 0,5 e 1,5, ou mais, dependendo dos materiais em contato e das condições de corte (TRIGGER E CHAO, 1951).

Segundo Trigger e Chao (1951), com base em velocidades e avanços convencionalmente usados em operações comuns de usinagem, a penetração do calor na interface cavaco/ferramenta no corpo do cavaco é extremamente rasa (MACHADO, A. et al, 2015).

Existem também outros estudos para o calor gerado na formação de cavacos, como o modelo de Loewen e Shaw. Suas hipóteses se baseiam em que todo calor gerado nas fontes primária de cisalhamento ao longo do plano de cisalhamento (1) e secundária de cisalhamento na interface cavaco/ferramenta (2) na Figura 02 é transformado em calor, sendo a energia total conservada e que as fontes de geração de calor se concentram em planos, além de que, o fluxo de calor nestas regiões é constante e uniforme e não há perda de calor para o ambiente.

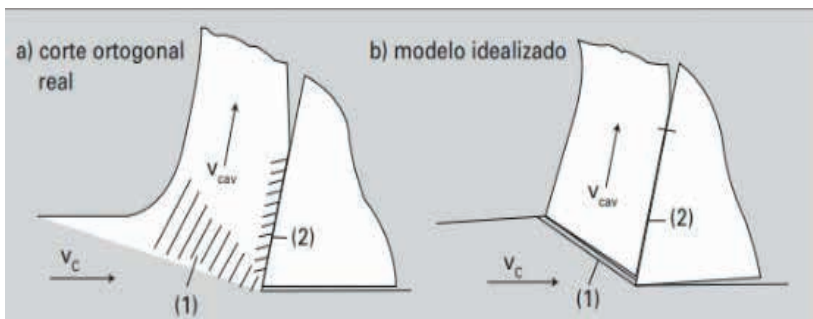


Figura 02 – Fontes de calor admitidas no Modelo de Shaw para o corte ortogonal (MACHADO, A. et al, 2015).

Esses são alguns dos métodos de estudos teóricos para estimar as temperaturas formadas na usinagem, sem a necessidade de que ocorra o processo para verificar a temperatura no cavaco, ferramenta e peça.

De acordo com Byrne (1987), alguns métodos para medir a temperatura na formação de cavacos pode ser empregada pela medição através de (MACHADO, A. et al, 2015):

- Medição por termopares inseridos;
- Medição da força termoelétrica entre a ferramenta e a peça;
- Medição por radiação de calor com sensores infravermelhos;
- Medição utilizando vernizes termossensíveis;
- Medição por propriedades metalográficas;
- Medição usando pós de sais químicos;
- Medição usando o método do filme PVD.

Tipos de Ferramentas de Corte

Sabe-se que as ferramentas de corte são de materiais com maior durabilidade e mecanicamente resistentes em relação à peça. Com isso, para cada tipo de usinagem é necessário escolher de forma correta a ferramenta de corte a se utilizar, e isso se deve para obter melhores condições de trabalho, evitando desgastes excessivos e altas temperaturas.

As principais propriedades desejáveis em um material para ferramenta de corte podem ser assim listadas (MACHADO, A. et al, 2015).

- Alta dureza;
- Tenacidade suficiente para evitar falha por fratura;
- Alta resistência ao desgaste abrasivo;
- Alta resistência à compressão;
- Alta resistência ao cisalhamento;
- Boas propriedades mecânicas e térmicas em temperaturas elevadas;
- Alta resistência ao choque térmico;
- Alta resistência ao impacto;
- Ser inerte quimicamente.

Essas propriedades não necessariamente se concentram em uma só ferramenta, elas são definidas de acordo com o material e o trabalho a ser realizado. No Quadro 01, estão algumas das ferramentas de corte e suas composições químicas:

	1	2
1. Aço-carbono · Comum · Com elementos de liga (V, Cr)		
2. Aço semirrápido (baixo W)		
3. Aço rápido (pode ser fundido ou fabricado pela metalurgia do pó) · Sem revestimento · Com revestimento		
4. Aço super-rápido (elevador teor de V)		
5. Ligas fundidas		
6. Metal duro (com ou sem revestimento) Classes: · P · M · K · N · S · H		
7. Cermets (com ou sem revestimento)		
8. Cerâmicas Com e sem revestimento · À base de Si3N4 (SIALON) · À base de Al2O3 (SIALON) · Com adições · ZrO2 (branca) · TiC (mista) · SiC (<i>whiskers</i>)		
9. Ultraduros · CBN – PCBN · PCD		
10. Diamante Natural		
1 – Aumento de dureza e resistência ao desgaste 2 – Aumento de tenacidade		

Aços-Carbono e Aços Ligados: No final do século XVIII e início do século XIX, os aços-carbono eram os principais materiais empregados como ferramentas de corte. Mais tarde, foram introduzidas por Múshet, em 1868 as baixas e médias ligas de aço que já representavam as primeiras inovações em ferramentas de corte (JEANS, 2005). Atualmente, esses aços são utilizados em usinagem com baixas velocidades de corte e em ferramentas de conformação.

Aços Rápidos: Na virada do século XIX, Taylor e White desenvolveram o primeiro aço rápido, contendo 0,67% de Carbono (C), 18,91% de Tungstênio (W), 5,47% de Cromo (Cr), 0,11% de Manganês (Mn) e 0,29% de Vanádio (V), além do tratamento térmico apropriado. Esse tipo de ferramenta aumentou a produtividade, sendo possível obter um aumento nas velocidades de corte em 10 vezes, passando de 3 a 5 m/min com as ferramentas de aço-carbono, para 30 a 35 m/min com as de aço rápido (MACHADO, A. et al, 2015).

Suas principais aplicações são em brocas, fresas inteiriças, cossinetes, brochas

e até em ferramentas de barra para aplicações em torneamento de peças de diâmetros reduzidos (MACHADO, A. et al, 2015).

Aço Rápido Revestido: Para trabalhos com elevada temperatura, tem-se usado ferramentas com revestimentos em estruturas martensíticas. Para esses casos, é utilizado o revestimento PVD (Deposição Física de Vapor), que submetem as ferramentas a ambientes em vácuo e a gases que se vaporizam e se depositam em temperaturas de até 500°C. As ferramentas revestidas por PVD garantem tempo de vida mais longo e velocidades de corte superiores às possíveis em ferramentas sem revestimento (MACHADO, A. et al, 2015).

Suas utilizações são em brocas, fresas, fresas caracol e segmentos de brochas de aço rápido revestido (MACHADO, A. et al, 2015).

Ligas Fundidas: São ferramentas à base de Cobalto (Co), contendo Tungstênio (W) e Cromo (Cr) em solução sólida, e, às vezes, alguns carbonetos. Essas ligas são mais duras que os aços rápidos e mantêm essa dureza a temperaturas mais elevadas. Com isso, as velocidades de corte empregadas podem ser em torno de 25% maiores (MACHADO, A. et al, 2015).

Metal Duro: As ferramentas de metal duro aumentaram as velocidades de corte em torno de 10 vezes mais que as de aço rápido, empregando 250 m/min a 300 m/min), além de possuírem maior dureza. Essa descoberta aconteceu durante 1920, na Alemanha, por Schröter, que produziu em laboratório o carboneto de tungstênio (WC) em pó, pela primeira vez. Essa mistura emprega também o Cobalto (Co), Níquel (Ni) ou o Ferro (Fe) (SCHROTER, 1925).

Após ingressarem no mercado, essas ferramentas foram chamadas de Widia (do alemão wie Diamond = como o diamante), por causa de suas propriedades parecidas, onde possui excelente combinação de resistência ao desgaste, mecânica e tenacidade (MACHADO, A. et al, 2015).

Há diversas classes para as ferramentas de metal duro, que são catalogadas para cada tipo de usinagem. Pode-se verificar isso na tabela abaixo no Quadro 02:

Principais classes			Classes de aplicação			
Letra de identificação	Cor de identificação	Materiais a serem usados	Metais duros		a	b
P	Azul	Aços: Todos os tipos de aços e aços fundidos, exceto inoxidáveis com estrutura austenítica	P01 P10 P20 P30 P40 P50	P05 P15 P25 P35 P45		
M	Amarelo	Aço inoxidável: Aço inoxidável austenítico e aço duplex (austenítico e ferrítico) e aço fundido	M01 M10 M20 M30 M40	M05 M15 M25 M35		
K	Vermelho	Ferro fundido: Fundido, com grafita esferoidal, fundido maleável	K01 K10 K20 K30 K40	K05 K15 K25 K35		
N	Verde	Metais não ferrosos: Alumínio e outros metais não ferrosos, materiais não metálicos	N01 N10 N20 N30	N05 N15 N25		
S	Marrom	Superligas e titânio: Ligas especiais resistentes ao calor a base de ferro, níquel e cobalto, titânio e ligas de titânio	S01 S10 S20 S30	S05 S15 S25		
H	Cinza	Materiais duros: Aços endurecidos, ferros fundidos endurecidos, ferros fundidos resfriados	H01 H10 H20 H30	H05 H15 H25		
a – Aumento da velocidade de corte, aumento da resistência ao desgaste do material da ferramenta b – Aumento do avanço, aumento da tenacidade do material da ferramenta						

Quadro 02 – Classificação dos metais duros (ISSO 513, 2004).

Metal Duro Revestido: As ferramentas de metal duro revestido são as mais empregadas nas empresas nos dias atuais, pois elas possuem um desempenho superior na usinagem de materiais ferrosos se comparado com as não revestidas e com um custo mais acessível. Essas ferramentas revestidas representam em torno de 95% do metal duro aplicado nas empresas, com tendência a crescimento contínuo (MACHADO, A. et al, 2015).

Além do revestimento em PVD, as ferramentas de metal duro podem receber também os revestimentos CVD (Deposição Química de Vapor), onde as temperaturas podem chegar a 1.000°C (MACHADO, A. et al, 2015). No Quadro 03, pode-se verificar a comparação dos revestimentos nessas ferramentas:

	CVD – Decomposição química de vapor	PVD – Decomposição física de vapor
Temperatura de revestimento	Aproximadamente 1.000 °C	Aproximadamente 500 °C
Tenacidade	Reduzida	Não é afetada
Aresta de corte	Arredondamento requerido	Pode ser quina viva
Espessura de revestimento	Até 12 µm	Até 4 µm
Camadas	Multicamadas TiC – TiN, TiN – TiCN – TiN, TiC – Al ₂ O ₃	TiN, TiCN, TiAl
Principais aplicações	Torneamento e mandrilhamento	Fresamento, roscamento e furação
Vantagens	Melhor resistência ao desgaste Melhor resistência à craterização Grande vida da ferramenta	Substitui ferramentas sem revestimento: com mesma tenacidade, mesma configuração de aresta e mesma precisão Reduz APC Melhor vida na ferramenta

Quadro 03 – Comparação de ferramentas revestidas pelos processos CVD e PVD (MACHADO, A. et al, 2015).

Cerâmica: São formadas por elementos metálicos e não metálicos, óxidos, carbonetos ou nitretos. Tem estrutura cristalina e as ligações entre os elementos são iônicas ou covalentes (MACHADO, A. et al, 2015).

Algumas propriedades das cerâmicas:

- Materiais refratários.
- Alta resistência ao desgaste.
- Materiais frágeis.
- Baixa condutividade térmica.
- Boa estabilidade química e térmica.
- Alta resistência à compressão e baixa resistência à tração.

Fluidos de corte

Os fluídos de corte, são líquidos ou gases usados na usinagem que são aplicados diretamente na área de corte para melhorar seu desempenho. Existem dois principais problemas que são possíveis resolver com esses fluídos, o primeiro é a geração de calor nas áreas de cisalhamento, o segundo é o atrito entre cavaco-ferramenta e ferramenta-peça. Além disso, também existem outros benefícios, entre eles, a remoção do cavaco, redução de temperatura com intuito de haver um manejo mais fácil da peça, reduzir forças e potências de corte, manter a estabilidade dimensional e melhorar o acabamento superficial.

Por existirem dois principais problemas, existem dois tipos de fluídos relacionados a

cada um deles e são os: refrigerantes e lubrificantes. Os refrigerantes são projetados para remover o calor gerado na área de corte, fazendo com que a vida útil da ferramenta seja aumentada. A refrigeração máxima desse tipo de fluido depende de suas propriedades térmicas, sendo a água usada como base, por ter elevado calor específico e elevada condutividade térmica. Tem melhor aproveitamento em usinagem com velocidade de corte mais alta, pois é nessa situação onde é gerado maior calor e altas temperaturas, como usinagem e fresamento. Nesses tipos de usinagem, por exemplo, é frequentemente usado o aço rápido, que sofre com falhas por temperatura, mais um fator que o torna fluido refrigerante necessário (GROOVER, M.P, 2017).

Já os lubrificantes, tem em sua composição o óleo, que tem características lubrificantes. Esse tipo de fluido é produzido para reduzir o atrito ao realizar a usinagem, entre, ferramenta-peça e cavaco-ferramenta. Na lubrificação de extrema pressão, forma-se uma camada muito fina de sal na superfície do metal aquecida por meio de reações químicas com o próprio lubrificante. A criação dessas camadas de alta pressão, separa as diferentes superfícies metálicas, e permite uma lubrificação mais eficaz que a convencional, onde é formado filmes líquidos (GROOVER, M.P, 2017).

Em 1894, Frederick Winslow Taylor observou que aplicando grande quantidade de água na região de corte, era possível aumentar a velocidade de corte em 33 %, sem prejuízo para a vida da ferramenta (RUFFINO, 1977). Com o passar dos tempos, foram criando diversos fluidos de corte com diferentes composições químicas, pensando em produtos menos nocivos ao meio ambiente e a vida humana, além de terem melhores propriedades refrigerantes e lubrificantes se comparado com de gerações passadas (MACHADO, A. et al, 2015).

Um dos problemas da utilização dos fluidos de corte é o seu descarte ou reciclagem, onde o descarte tem custo menor que a reciclagem, sendo necessário desenvolver as seguintes etapas (MACHADO, A. et al, 2015):

- Decantação para remoção de material particulado grosseiro, como cavacos;
- Flotação para remoção de particulado fino;
- Uso de hidrociclones ou centrífugas para remoção de contaminantes muito finos;
- Filtração por gravidade, pressão ou a vácuo;
- Tratamento da água (correção de dureza, deionização e destilação);
- Controle biológico.

Diferente dos refrigerantes, os fluidos lubrificantes tem melhor desempenho em usinagem de baixa velocidade. Acima de 120 m/min, há perda de eficácia, pois, pelo movimento do cavaco, o fluido não consegue entrar na interface cavaco-ferramenta. Além disso, nessas velocidades há uma geração de calor muito maior, o que faz os óleos

evaporarem antes de realizar sua função lubrificante. As principais operações de usinagem que tem melhor aproveitamento desse fluido, são: furação, torneamento e rosqueamento, nelas, a aresta postiça de corte é retardada e o torque sobre a ferramenta é menor (GROOVER, M.P, 2017).

No Quadro 04, são mostrados os problemas relacionados aos fluidos e possíveis soluções que podem ser aplicadas.

Problema	Prováveis condições e sintomas	Possíveis mudanças no fluido de corte
Calor	- Falha prematura da ferramenta devido à alta temperatura - Velocidade de corte alta demais para ferramenta - Cavaco adere à superfície de saída - Corte contínuo (por exemplo, torneamento, furação)	- Aumentar a vazão do fluido - Se for óleo de corte, reduzir o nível de viscosidade - Se for óleo de corte, tentar óleo emulsionado - Se for óleo emulsionado, aumentar proporção de água - Se for óleo emulsionado, tentar óleo sintético ou semissintético
Desgaste	- Velocidade de corte baixa - Desgaste rápido da ferramenta - O material da peça usinada é o aço de alta resistência à tração ou liga resistente ao calor - O material da peça é abrasivo (por exemplo, fundido em molde de areia)	- Se for óleo emulsionado, tentar óleo de corte - Se for óleo emulsionado, aumentar proporção de óleo - Se for fluido sintético, tentar óleo emulsionado - Tentar fluido com aditivos quimicamente ativos para lubrificação de extrema pressão
Vibração	- Vibração - Rigidez inadequada na montagem do conjunto	- Se estiver seco, tentar o uso de um fluido de corte para tratar da vibração por meio de amortecimento hidráulico - Se for fluido de corte, usar fluido com maior viscosidade

Quadro 04 – Guia de solução de problemas relacionados aos fluidos de corte (GROOVER, M.P, 2017)

Há diferentes fluidos de corte para refrigeração, onde o mais comum utilizado são fluidos de corte em estado líquido, com composições diferentes. No entanto, há fluidos no estado gasoso, sendo o mais conhecido o ar comprimido, com função de expulsar o cavaco da região de corte, mas seu uso ainda é inviável para as empresas. Também é existente fluidos de corte sólidos, como a grafita e o bissulfeto de molibdênio, que têm função principal de reduzir o coeficiente de atrito ferramenta/cavaco, porém pouco usado (DINIZ, 2014).

Em se tratando de estado líquido, encontramos fluidos do tipos óleos, emulsões e compostos, podendo ainda serem aprimorados pelo uso de aditivos. Os óleos de origem vegetal e animal foram os primeiros óleos integrais da usinagem dos metais. Sua utilização se tornou inviável devido ao alto custo e da rápida deterioração, porém são muito eficientes para reduzir o atrito, sendo comumente usados para operação de rosqueamento (MACHADO et. al, 2015). Outra opção de óleos são os minerais, que são hidrocarbonetos obtidos a partir do refino do petróleo. Ele também possui um alto custo, baixo ponto de

fulgor (risco de incêndio), ineficiência a altas velocidades de corte, baixa refrigeração, e oferece risco a saúde do trabalhador, pois há alta formação de fumos, sendo assim, acabou perdendo espaço nas indústrias (MACHADO et. al, 2015). Os óleos minerais podem ser de base parafínica, naftênica ou aromática, onde a mais usada é a parafínica (ceras), pois é facilmente encontrado e possui um baixo custo, além de ter elevada resistência à oxidação e menos prejudiciais à saúde, sendo um ótimo lubrificante (MACHADO et. al, 2015).

Os fluidos emulsionados, mais conhecidos como “óleos solúveis”, são compostos bifásicos de óleos minerais ou vegetais adicionados à água na proporção de 1:10 a 1:100. Eles são emulsificantes que reduzem a tensão superficial, sendo um dos mais utilizados nas indústrias, são bons refrigerantes e baratos, além de não ser prejudicial à saúde humana, adicionando aditivos que evitam isso, assim como para evitar a ação corrosiva da água na peça (MACHADO et. al, 2015).

As soluções são compostos monofásicos de óleos que se dissolvem completamente na água, sem a necessidade de aditivos emulsificantes. Também são chamados de fluidos sintéticos, onde possuem inibidores de corrosão, vida mais longa, boa propriedade refrigerante e lubrificante (MACHADO et. al, 2015).

Os aditivos dos fluidos de corte tem como objetivo cumprir as propriedades dos fluidos de corte, que são (MACHADO et. al, 2015):

Antiespumantes: evitam a formação de espumas que impedem a visibilidade da região de corte, reduzem a tensão interfacial do óleo. Para o controle das espumas, usam-se ceras especiais ou óleos à base de silicone.

Anticorrosivos: protegem a peça, ferramenta e máquina-ferramenta da corrosão. Para isso é utilizado nitrito de sódio, ou óleos sulfurados ou sulfonados, sendo necessário estar atento a quantidade de nitrito de sódio pois pode ser cancerígeno.

Detergentes: reduzem a deposição de lodo, lamas e borras. São compostos organometálicos que contém magnésio, bário, cálcio, ou ainda álcoois.

Surfactantes: têm função de garantir a uniformidade das emulsões.

Biocidas: substâncias ou misturas químicas que inibem o desenvolvimento de microrganismos, especialmente fungos e bactérias.

Aditivos de Extrema Pressão (EP): suportam elevadas temperaturas e pressões de corte, reduzindo o contato ferramenta/cavaco. São muito utilizados na necessidade de operações mais severas que necessitam de lubrificação adicional. O EP é composto de enxofre, fósforo ou cloro.

CONCLUSÃO

Neste artigo, pôde-se observar a importância dos fluidos de corte na usinagem. Eles desempenham um papel crucial na remoção do calor gerado durante o processo, na redução do atrito entre a ferramenta e a peça, na remoção de cavacos e na manutenção

da estabilidade dimensional. No entanto, também existem diversos desafios relacionados ao descarte e reciclagem desses fluídos, por exemplo, a necessidade de um tratamento adequado para minimizar o impacto ambiental.

Além disso, os revestimentos das ferramentas são importantes no processo de usinagem, onde devem ser empregadas diferentes tipos para cada situação de trabalho e materiais, afim de evitar desgaste, calor excessivo e melhorar as condições de trabalho, como velocidade e profundidade de corte.

Nota-se também, que o controle do calor na usinagem e o uso eficaz de fluidos de corte são elementos essenciais para garantir a eficiência, a qualidade e a sustentabilidade dos processos de usinagem. O avanço contínuo no desenvolvimento de técnicas de lubrificação contribui para melhorar a produtividade e reduzir os custos na fabricação das peças usinadas.

REFERÊNCIAS

- BYRNE G. Thermoelectric signal characteristics and average interfacial temperatures in the machining of metals under geometrically defined conditions. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, v. 27, n. 2, p. 215-224, 1987.
- DINIZ, Anselmo Eduardo. Tecnologia da usinagem dos materiais. Artliber, 2014.
- FERRARESI, Dino. Fundamentos da usinagem dos metais. Editora blucher, 2018.
- GROOVER, P. Mikell. Fundamentos da Moderna Manufatura. 5. ed. [S. l.: s. n.], 2023. v. 2.
- JEANS, W. T. Creators of the age of steels. Kessinger, 2005.
- MACHADO, Álisson Rocha et al. Teoria da usinagem dos materiais. Editora Blucher, 2015.
- RIBEIRO, Fernando Sabino Fonteqe. Avaliação de ferramentas de corte texturizadas preenchidas com nanotubos de carbono. 2019. Disponível em: < <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/183308>>. Acesso em: 16/09/2023.
- RUFFINO, R. T. Fluidos de corte. In: Fundamentos da usinagem dos metais. São Paulo: Blucher, 1977.
- SCHRÖTER, K. German Patent n. 420689. Treuhand – gasellssht für elektrishe glühlampen, depositada em 30 de março de 1923, aprovada em 30 de outubro de 1925.
- SHAW, M. C. Metal cutting principles. Oxford Scientific, 1986.
- TRENT, E. M. Metal cutting and the tribology of seizure: I seizure in metal cutting. *Wear*, v. 128, p. 29-45, 1988b.
- TRIGGER, K. J.; CHAO, B. T. An analytical evaluation of metal-cutting temperatures. *Trans. of ASME*, n. 53, p. 57-68, 1951.

ANÁLISE DO DESGASTE DE INSERTOS DE METAL DURO PARA TORNEAMENTO DE AÇOS SAE1020 E SAE1045

Data de aceite: 01/02/2024

Thiago José Rogério Borges

Departamento de Engenharia Mecânica
– Centro Universitário das Faculdades
Integradas de Ourinhos-Unifio/FEMM

Fabiano Henrique de Amorim

Departamento de Engenharia Mecânica
– Centro Universitário das Faculdades
Integradas de Ourinhos-Unifio/FEMM

Gustavo José Corrêa Gonçalves

Departamento de Engenharia Mecânica
– Centro Universitário das Faculdades
Integradas de Ourinhos-Unifio/FEMM

Marcelo Rodrigo Munhoz

Departamento de Engenharia Mecânica
– Centro Universitário das Faculdades
Integradas de Ourinhos-Unifio/FEMM

Ricardo Breganon

Departamento de Controle e Processos
Industriais – Instituto Federal do Paraná -
Jacarezinho - IFPR

Fernando Sabino Fontequê Ribeiro

Departamento de Engenharia Mecânica
– Centro Universitário das Faculdades
Integradas de Ourinhos-Unifio/FEMM

RESUMO: O progresso e o aprimoramento nas ferramentas de corte destinadas à execução de cortes nos processos de fabricação estão se tornando cada vez mais exigentes, especialmente nas máquinas operatrizes de última geração, que primam pela eficiência. A seleção criteriosa dos parâmetros e dos insertos de corte adequados não é apenas uma necessidade, mas também a busca constante por acompanhar a evolução tecnológica, visando à redução de custos e ao aumento da qualidade dos produtos finais. Este estudo analisou o desgaste de insertos de metal duro revestido no processo de torneamento de aços SAE1020 e SAE1045 em um torno CNC. Os aços foram submetidos ao processo de usinagem. Foram empregadas velocidades de corte de 200 a 300 m/min para os materiais, com avanços de 0,36 mm e profundidade de corte de 3,5 mm. A avaliação e identificação do desgaste dos insertos foram realizadas por meio de análise utilizando um microscópio tipo lupa. Verificou-se que, ao empregar tais condições de usinagem, houve predominância de desgaste de flanco e desgaste abrasivo na superfície de saída, bem como a presença de aresta postiça de corte durante a usinagem de aço SAE 1020.

No geral, o revestimento de nitreto de titânio apresentou ligeira superioridade ao óxido de alumínio.

PALAVRAS-CHAVE: Desgaste De Insertos; Metal Duro Revestido; Torneamento; Aços.

ANALYSIS OF WEAR ON CARBIDE INSERTS FOR TURNING SAE1020 AND SAE1045 STEELS

ABSTRACT: The progress and improvement in cutting tools designed for manufacturing processes are becoming increasingly demanding, especially in state-of-the-art machining equipment that prioritizes efficiency. The careful selection of parameters and appropriate cutting inserts is not only a necessity but also a constant pursuit to keep up with technological advancements, aiming for cost reduction and higher product quality. This study analyzed the wear of coated carbide inserts in the turning process of SAE1020 and SAE1045 steels on a CNC lathe. The steels underwent machining processes, with cutting speeds ranging from 200 to 300 m/min, a feed rate of 0.36 mm, and a cutting depth of 3.5 mm. The evaluation and identification of insert wear were performed through analysis using a magnifying glass-type microscope. It was observed that when using these machining conditions, there was a predominance of flank wear and abrasive wear on the exit surface, as well as the presence of a built-up edge during the machining of SAE 1020 steel. Overall, the titanium nitride coating showed slight superiority over aluminum oxide.

KEYWORDS: Insert Wear; Coated carbide; Turning; Steels.

INTRODUÇÃO

Os aços SAE 1020 e SAE 1045 desempenham papéis significativos na indústria devido às suas propriedades mecânicas distintas e aplicações versáteis. De acordo com Smith et al. (2008), o aço SAE 1020 é um aço-carbono de baixo teor, conhecido por sua excelente soldabilidade e facilidade de usinagem. Possui uma composição química que inclui aproximadamente 0,20% de carbono e 0,50% de manganês, conferindo-lhe resistência razoável, combinada com boa ductilidade. Essas características o tornam um candidato ideal para componentes que exijam conformação a frio, como engrenagens, por exemplo.

Por outro lado, o aço SAE 1045, de acordo com Callister et al. (2017), possui uma maior quantidade de carbono, em torno de 0,45%, o que contribui para sua maior resistência mecânica. É frequentemente utilizado em aplicações que requerem maior dureza e resistência ao desgaste, como hastes de pistões e eixos. A presença de maior carbono torna o SAE 1045 menos maleável do que o SAE 1020, porém, sua capacidade de tratamento térmico proporciona a oportunidade de ajustar suas propriedades de acordo com a necessidade.

No processo de usinagem, aços como o SAE 1020 e o SAE 1045 são amplamente empregados devido à sua usinabilidade. De acordo com Machado et al. (2015), a usinagem desses aços é facilitada pela baixa quantidade de elementos de liga, que reduz a formação

de difícil controle. Além disso, aços de baixo carbono, como o SAE 1020, demonstram menor tendência à formação de arestas desgastadas durante a usinagem. Para o SAE 1045, onde a dureza e a resistência ao desgaste são cruciais, são adotadas técnicas de usinagem apropriadas para minimizar o desgaste da ferramenta de corte. As Tabelas 1 e 2 apresentam a composição química dos aços SAE 1020 e 1045 respectivamente.

C	Mn	P máx.	S máx	Si
0,18 – 0,23	0,30 – 0,60	0,030	0,050	0,15 – 0,35

Tabela 1 - Composição Química do aço SAE1020.

C	Mn	P máx.	S máx	Si
0,43-0,50	0,60 – 0,90	0,030	0,050	0,15 – 0,35

Tabela 2 - Composição Química do aço SAE1045. Fonte: SACCHELLI (2023).

Fonte: SACCHELLI (2023).

A usinagem representa um dos processos cruciais na indústria mecânica. De acordo com Machado (2009), é um método que, apesar de simultaneamente complexo e simples, envolve a remoção de excesso de material na forma de cavacos. Sua complexidade reside na desafiante definição de parâmetros de corte eficientes, enquanto sua simplicidade emerge quando, após ajustar esses parâmetros, a formação de cavacos ocorre de maneira precisa, minimizando a necessidade de intervenção do operador. Dessa forma, ao atender às condições necessárias de fabricação, a produção das peças é executada de acordo com as especificações do projeto, visando obter acabamentos com menor custo e tempo.

O torneamento é uma operação de usinagem fundamental na indústria de fabricação principalmente metal mecânica e metalúrgica, permitindo a criação de componentes cilíndricos e cônicos com alta precisão dimensional e qualidade superficial (CHIAVERINI, 2008). O processo de torneamento é uma técnica de usinagem na qual uma peça gira em torno de seu eixo enquanto uma ferramenta de corte se move na direção axial para remover material. Tedesco (2007) observa que os parâmetros a serem considerados na usinagem da velocidade de corte (V_c), que é a velocidade da superfície da peça em relação à ferramenta de corte, medida em metros por minuto (m/min); a velocidade de avanço (f), que é a velocidade com que a ferramenta se move na direção axial, medida comumente em milímetros por revolução (mm/rev) e a profundidade de corte, afetam a taxa de material a ser removido e a vida do inserto.

Uma consideração crítica e muito importante no processo de torneamento é a vida das ferramentas de corte, que desempenham um papel central na eficiência e na qualidade da usinagem. A vida das ferramentas de corte é influenciada por vários fatores, incluindo a escolha do material da ferramenta, os parâmetros de usinagem e as características da peça de trabalho. Como mencionado por Ferraresi (1970), “a seleção adequada do material da ferramenta é essencial para prolongar a vida útil da ferramenta e melhorar a eficiência

da usinagem.”

Ao se tornear uma peça, o inserto no utilizado no processo está exposto a mecanismos de desgaste, esses mecanismos desempenham um papel crítico na degradação das ferramentas de corte ao longo do tempo. Existem vários mecanismos de desgaste, dos quais os principais incluem desgaste por abrasão, desgaste por adesão, desgaste por difusão e desgaste por craterização (Chiaverini, 2008). A Figura 1 apresenta os principais mecanismos de desgaste ocorridos no processo de torneamento.



Figura 1 – Fenômenos de desgaste em insertos de ferramenta de corte.

Fonte: Adaptado de SANDVIK (2017).

Isto posto, este artigo apresenta uma avaliação experimental do desgaste de ferramentas de corte de metal duro revestidas submetidas ao processo de torneamento a seco de aços SAE 1020 e 1045, sendo comparados os mecanismos de desgaste em função dos tipos de revestimentos aplicados e dos materiais de trabalho.

MATERIAIS E MÉTODOS

No presente trabalho, foi realizado uma comparação do desgaste em dois tipos de insertos de metal duro (WC-Co), o inserto WNMG080412-MP MC6025 e o inserto WNMG080412-RK MC5015, ambos do mesmo fabricante (MITSUBISHI MATERIALS), para usinagem em dois tipos de aços extremamente comuns dentro da indústria mecânica, os aços SAE1020 e SAE1045. As Figuras 2 e 3 ilustram os dois insertos respectivamente.



Figura 2 – Inserto WNMG080412-MP MC6025.

Fonte: Toolsunited (2023).

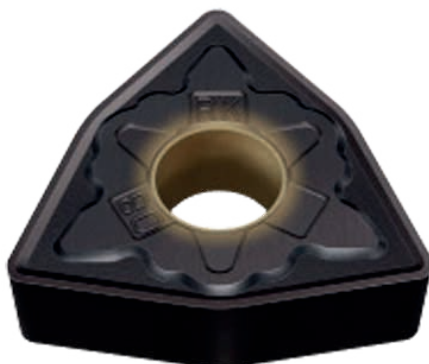


Figura 3 – Inserto WNMG080412-RK MC5015.

Fonte: Toolsunited (2023).

Os insertos WNMG080412-MP MC6025 e WNMG080412-RK MC5015 são amplamente usados em operações de torneamento, ambos os insertos apresentam um formato triangular do tipo W como já apresentado nas Figuras 2 e 3. As principais distinções entre esses insertos residem em seus revestimentos e características específicas de corte e as geometrias de quebra cavaco. O WNMG080412-MP MC6025 possui como revestimento nitreto de titânio e é conhecido por sua resistência ao desgaste versátil, já o inserto WNMG080412-RK MC5015 que possui revestimento de óxido de alumínio se destaca por sua tenacidade, tornando-o adequado para geometrias de corte de maior complexidade. A escolha entre qual inserto utilizar depende das propriedades do material da peça e das condições de corte. Selecionar a ferramenta de corte mais adequada para

uma tarefa específica de usinagem é essencial no dia-a-dia de uma indústria.

A máquina ferramenta utilizada no trabalho foi um torno CNC ROMI G550, conforme mostrado na Figura 4. Este torno possui um curso longitudinal (eixo z) de 1340 mm e um curso transversal (eixo x) de 280 mm, além de um diâmetro máximo torneável de 550 mm, sendo uma máquina ótima dentro da indústria para produção de peças em grande escala com dimensões maiores, além da alta robustez e qualidade obtida pela mesma.

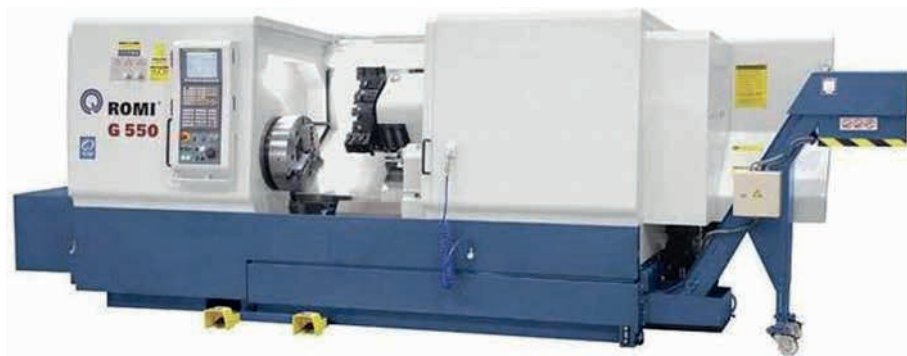


Figura 4 – Torno CNC Romi G550.

Fonte: Adaptado de Romi (2011)

Foram utilizados dois tipos de insertos, o WNMG080412-MP MC6025 e o WNMG080412-RK MC5015 como mencionados, que apresentam 6 arestas de corte, com raios das arestas medindo 1,2 mm. Os testes de torneamento foram conduzidos com um avanço de 0,36 mm/rot e uma profundidade de corte de 3,5 mm. A velocidade de corte variou entre 220 m/min e 300 m/min, para o primeiro e segundo ciclo de usinagem, respectivamente, ajustada de acordo com as exigências específicas da operação de usinagem.

As peças de trabalho adotadas nos aços citados continham um diâmetro de 9 polegadas (228,6 mm) e um comprimento de 1000 mm. Inicialmente, ocorreu o desbaste no aço SAE 1045 utilizando o inserto WNMG080412-MP MC6025. Posteriormente, foi utilizado o inserto WNMG080412-RK MC5015. Foram realizados dois passes no material com cada inserto, cada um com 930 mm de comprimento. Não foi possível usinar o tamanho total da peça (1000 mm) devido à fixação de parte do material na placa. Em seguida, após finalização dos testes no aço SAE1045, os mesmos testes foram realizados no aço SAE1020 seguindo exatamente os mesmos parâmetros do aço SAE1045. Os parâmetros da usinagem desse trabalho estão descritos na Tabela 3.

Parâmetro	Valor adotado
Velocidade de corte (V_c)	220-300 m/min
Rotação (n)	318-332 rpm
Profundidade de corte (a_p)	3,5 mm
Avanço (f)	0,36 mm/rot

Tabela 3 - Parâmetros de usinagem

Ressalta-se que a cada ciclo de usinagem as ferramentas de corte foram fotografadas através de um microscópio tipo lupa em ampliações de 10x, da marca OPTON, presente no Laboratório de Metalografia do Centro Universitário das Faculdade Integradas de Ourinhos. A utilização desse microscópio desempenha um papel fundamental na análise e visualização do desgaste de insertos de metal duro, tornando-se uma ferramenta essencial para engenheiros e técnicos de usinagem. Este dispositivo, conhecido por sua capacidade de ampliação, oferece vantagens significativas na inspeção detalhada das arestas de corte dos insertos de metal duro, podendo identificar e avaliar com precisão diferentes tipos de desgaste, como desgaste por abrasão, lascamento, formação de cratera e trincas, entre outros. Além disso, essa análise ajuda a determinar o momento adequado para substituir os insertos em fim de vida, otimizando assim a eficiência do processo de usinagem. Além disso, essa análise facilita a documentação visual do desgaste, permitindo que os operadores registrem imagens para referência futura e análise comparativa. Essa documentação pode ser valiosa para o monitoramento da vida das ferramentas de corte e para o desenvolvimento de estratégias de manutenção preventiva.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após uma inspeção detalhada realizada com o auxílio do microscópio, conduziu-se uma análise qualitativa das falhas observadas nas arestas de corte dos insertos em estudo. As falhas identificadas originaram-se do processo de torneamento, que resultou no desgaste das ferramentas de corte. Entre os tipos de desgaste observados, incluem-se o desgaste de flanco, formação de aresta postiça e o desgaste abrasivo. É importante ressaltar que também poderiam ocorrer outros tipos de desgastes com maiores volumes de material removido ou a adoção de outros parâmetros de usinagem, como a quebra, lascamento, trincas e desgaste de cratera. Ressalta-se que a quebra e lascamento podem resultar na perda significativa de material do inserto de corte de forma instantânea, enquanto a formação de trincas causa a abertura de fendas no corpo do inserto de corte (MACHADO, et al., 2009).

No inserto com revestimento de nitreto de titânio, ao usinar o aço SAE1045, observou-se que houve desgaste de flanco, sendo esse desgaste caracterizado pela abrasão do flanco com a peça de trabalho, onde partículas abrasivas presentes no material

da peça erodem gradualmente o revestimento de TiN na superfície do inserto. Além disso, elevadas forças de corte devido a parâmetros de usinagem como velocidade de corte, profundidade de corte e avanço, podem submeter o inserto a pressões excessivas, levando a maiores taxas de desgaste de flanco. Também as altas temperaturas geradas durante a usinagem do aço SAE 1045 podem enfraquecer o revestimento, especialmente em altas velocidades de corte.

Além disso, verifica-se que o escoamento do cavaco na superfície de saída da ferramenta de corte promoveu o desgaste abrasivo. Não havendo evidências da presença de aresta postiça de corte nesta aplicação, determina-se que a abrasão do cavaco em altas temperaturas removeu parcialmente a camada do revestimento, evidenciando (na cor cinza) o substrato base de metal duro. A continuidade deste mecanismo de desgaste culminará em um desgaste de cratera, caso não ocorra um desgaste catastrófico antes.

A Figura 5 apresenta o resultado da usinagem do inserto com revestimento de nitreto de titânio no aço SAE 1045.



Figura 5 – Desgaste no inserto com revestimento de nitreto de titânio no torneamento do aço SAE1045

No inserto com revestimento de óxido de alumínio, ao usinar o aço SAE1045, foram verificados os mesmos mecanismos de desgaste. Sendo adotados os mesmos parâmetros de corte, verifica-se que o revestimento de óxido de alumínio apresentou maior desgaste de flanco se comparado a ferramenta anterior. Quanto ao desgaste na superfície de saída da ferramenta de corte, observa-se uma nítida região de desgaste próxima a aresta de corte, onde é possível notar o substrato da ferramenta de corte revelado pelo desgaste abrasivo. Tratando-se de uma geometria de corte simples e sem a presença de corte interrompido, a maior tenacidade do óxido de alumínio não superou a maior resistência térmica e abrasiva do nitreto de titânio. A Figura 6 ilustra o desgaste por flanco no inserto de óxido de alumínio no torneamento do aço SAE1045.



Figura 6 – Desgaste no inserto com revestimento de óxido de alumínio no torneamento do aço SAE1045

Ao usar o aço SAE 1020 com o inserto revestido por nitreto de titânio, observou-se mecanismos de desgaste semelhantes ao observados anteriormente, mas em menor magnitude. Embora o aço SAE 1020 seja relativamente menos resistente ao SAE 1045, ele ainda pode gerar desgaste para as ferramentas de corte, especialmente em altas taxas de remoção de material ou em condições propícias para a formação de arestas postigas. A abrasividade do material pode levar ao desgaste prematuro do revestimento de nitreto de titânio nas faces laterais do inserto.

Apesar de ser visível a área de contato na aresta de corte, na região do flanco, ainda há maior preservação do revestimento, sendo que há menor destaque do substrato na aresta de corte. Na superfície de saída, também verifica-se menor taxa de desgaste abrasivo, se comparado a mesma ferramenta na usinagem de aço SAE 1045. Tal observações devem-se a menor resistência do presente aço, o que reduz a temperatura de usinagem nas regiões primária (plano de cisalhamento), secundária (região de escorregamento na superfície de saída) e terciária (região de contato com o flanco da ferramenta). Apesar de o mesmo volume de material removido, o revestimento de nitreto de titânio apresentou melhor resistência a estas temperaturas de usinagem. A Figura 7 ilustra o desgaste no inserto com revestimento de nitreto de titânio no torneamento do aço SAE1020.

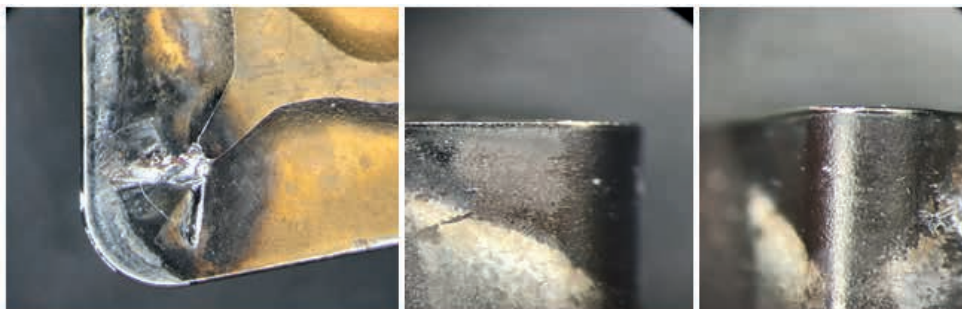


Figura 7 – Desgaste no inserto de com revestimento de nitreto de titânio no torneamento do aço SAE1020.

Por fim, com o uso do inserto com revestimento de óxido de alumínio durante a usinagem do aço SAE1020 observou-se que além dos mecanismos anteriores, houve a presença de aresta postiça de corte. O desgaste por aresta postiça de corte durante a usinagem de aço SAE1020 e aços carbonos é um fenômeno comum e pode ser atribuído a várias causas inter-relacionadas, principalmente em ferramentas de corte sem revestimento. Embora o aço SAE 1020 apresente fácil usinabilidade em comparação com outros materiais metálicos, ele pode conter partículas abrasivas e inclusões que desafiam a integridade das ferramentas de corte. Essas partículas abrasivas agem como agentes de desgaste, erodindo gradualmente a aresta de corte do inserto revestido (SMITH, 2020). Diferentemente da difusão, que ocorre em escala atômica, a adesão é visível e caracteriza-se por adesão mecânica do material de trabalho na ferramenta de corte. A subsequente adesão e escorregamento dessas partículas deteriora o revestimento, que permite a exposição do metal duro base. Nesta região agredida, ocorrem a adesão por compressão mecânica de maiores dimensões, determinadas como aresta postiça de corte. A constante formação de escorregamento dessas partículas (*attrition*) leva consigo partes da ferramenta de corrobora para um desgaste de cratera severo (DINIZ, 1999). A Figura 8 ilustra o desgaste por aresta postiça de corte no inserto de óxido de alumínio no torneamento do aço SAE1020.



Figura 8 – Desgaste no inserto com revestimento de óxido de alumínio no torneamento do aço SAE1020.

CONCLUSÃO

Neste estudo, foram investigados os efeitos do desgaste em insertos de metal duro revestidos com nitreto de titânio e óxido de alumínio durante o processo de torneamento de aços SAE1020 e SAE1045 em um torno CNC. Os resultados revelaram conclusões significativas. Observou-se que, nas condições de usinagem utilizadas, o desgaste por flanco dos insertos foi predominante, com um dos insertos demonstrando um desgaste acentuado na aresta postiça de corte.

Durante a análise de desempenho do revestimento de nitreto de titânio observou-se que o nos insertos com revestimento de nitreto de titânio os testes realizados apresentaram

aspectos como desgaste de flanco e desgaste abrasivo, sendo a camada do revestimento de TiN parcialmente removida devido as altas temperaturas geradas pelas forças aplicadas durante os teste, mesmo sabendo que em relação a este revestimento o mesmo é altamente resistente a desgastes por fricção no qual geram elevadas temperaturas.

Já nas análises com o revestimento oxido de alumínio pode-se notar que em ambos os testes o revestimento apresentou uma eficiência térmica e abrasiva menor do que a do nitreto de titânio, demonstrando também a aparição de arestas postiças de corte sendo gerada pela remoção gradual do revestimento gerando assim, um contato maior com o metal duro na peça teste. Podemos notar ainda que em ambos os testes realizados, tanto no de nitreto de titânio quanto no de oxido de alumínio, os resultados apresentados foram distintos com relação ao material no qual foi feito os testes, em ambos os desgastes no SAE1045 foram maiores do que no SAE1020. Contudo nos testes no SAE1020 ambos os revestimentos apresentaram a formação de aresta tangente de corte.

Este estudo é de extrema relevância e destaca seu impacto na busca contínua pela excelência na usinagem de materiais, num contexto em que a eficiência e a qualidade são elementos cruciais para o sucesso da indústria. Como futuros trabalhos, sugere-se observar a curva de vida da ferramenta e avaliação das condições de acabamento superficial da peça em função da vida das ferramentas de corte.

REFERÊNCIAS

- ARRUDA, José Dimas et al. **Análise de desgaste em insertos de metal duro revestido para torneamento do aço SAE4140**. In: XVII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica e Industrial, 2017.
- CALLISTER Jr., William D. et al. **Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução**. 10ª edição. Wiley, 2017.
- CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 599p, 7 ed. São Paulo, 2008.
- Diniz A. E.; Marcondes F. C.; Coppini N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. MM Editora, São Paulo, Brasil 1999.
- FERRARESI, Dino. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Editora Blucher, 1970.
- Machado A. R.; Abrão A. M.; Coelho R. T.; Silva M. B. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 2ª Edição Edgard Blucher Ltda, São Paulo, Brasil 2009.
- Sacchelli. Disponível em: **sacchelli.com.br**. Acesso em: 07 set. 2023.
- SANDVIK, Desgaste de Ferramentas. Disponível em: **https://www.sandvik.coromant.com/ptpt/knowledge/general_turning/troubleshooting/tool-wear/pages/default.aspx**. Acesso em: 07 set. 2023.

SMITH, William F.; HASHEMI, Javad. **Fundamentos de Engenharia e Ciência dos Materiais**. 5ª edição.

ROMI. Centros de Torneamento Romi G. Disponível em: romi.com/produtos/centros-de-torneamento-romi-g/. Acesso em: 07 set. 2023.

TEDESCO, M.E. **Variação Dimensional e Microestrutural do Aço AISI 4140 em Peças Usinadas por Torneamento**. Dissertação de Mestrado, 69p, Universidade de Caxias do Sul, 2007.

TOOLS UNITED. Disponível em: toolsunited.com. Acesso em: 07 set. 2023.

INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DE PARÂMETROS QUE CARACTERIZAM O ESCOAMENTO EM CANAL ABERTO

Data de aceite: 01/02/2024

Hélio Augusto Goulart Diniz

Docente e Bolsista do Programa de
Pesquisa Produtividade do Centro
Universitário Estácio de Belo Horizonte
<http://lattes.cnpq.br/5689299775816152>

Aniel de Melo Dias

Docente do Centro Universitário Estácio
de Belo Horizonte
<http://lattes.cnpq.br/7872565673695086>

Liliane Cruz Gomes de Souza Santos

Docente do Centro Universitário Estácio
de Belo Horizonte
<http://lattes.cnpq.br/4130177031958155>

RESUMO: Escoamentos em canais abertos são caracterizados por apresentar uma superfície livre submetida à pressão atmosférica, tendo um grande número de aplicações práticas na engenharia. A caracterização do escoamento em um canal depende de diversos fatores, a citar: fluido operado, área de escoamento, vazão, profundidade do escoamento, declividade de fundo e rugosidade do material que compõe o canal. Este trabalho baseia-se no estudo experimental de uma seção de testes de canal hidráulico aberto de seção transversal retangular operada com água como fluido

de trabalho. Os parâmetros supracitados são analisados de forma extensiva a partir da realização de testes experimentais. De forma geral, observou-se que o escoamento foi praticamente turbulento e supercrítico durante o período de ensaio. A camada de água diminuiu à medida que a declividade do canal aumentava. O coeficiente médio de Manning e de Chézy foram, respectivamente, 0,00784 e 59,1.

PALAVRAS-CHAVE: Canal aberto, estudo experimental, escoamento de água, coeficiente de Manning, coeficiente de Chézy.

ABSTRACT: Flows in open channels are characterized by the presence of a free surface subjected to atmospheric pressure, with numerous practical applications in engineering. The characterization of flow in a channel depends on various factors, including the operated fluid, flow area, discharge, flow depth, bed slope, and material roughness composing the channel. This study is based on the experimental investigation of an open rectangular cross-section hydraulic channel test section operated with water as the working fluid. The aforementioned parameters are extensively analyzed through the conduct

of experimental tests. In general, it was observed that the flow was predominantly turbulent and supercritical during the testing period. The water layer decreased as the channel slope increased. The average Manning and Chézy coefficients were 0.00784 and 59.1, respectively. **KEYWORDS:** Open channel, experimental study, water flow, Manning coefficient, Chézy coefficient.

1 | INTRODUÇÃO

Canais de água são projetados para proporcionar um escoamento com características bem conhecidas e controladas no interior da seção de testes. Uma vez construído, o aparato deste tipo deve ser criteriosamente avaliado, mediante a realização de testes para que as características do escoamento sejam investigadas (Mega, 2009).

Escoamentos em canais abertos são caracterizados por apresentar uma superfície livre submetida à pressão atmosférica, tendo um grande número de aplicações práticas na engenharia (Fox, McDonald e Pritchard, 2010). Sua complexidade reside na ampla combinação de fatores que definem o canal, uma vez que a superfície livre pode variar no espaço e no tempo, e, como consequência, a profundidade do escoamento, a vazão, a declividade de fundo e a do espelho líquido são grandezas interdependentes (Porto, 2006).

Este trabalho baseia-se no estudo experimental de uma seção de testes de canal hidráulico aberto de seção transversal retangular operada com água como fluido de trabalho. O escoamento foi analisado quanto ao seu tipo (subcrítico ou supercrítico), determinando-se o número de Froude (Fr) para diversos pontos. Além disso, analisou-se o tipo de regime do escoamento (turbulento ou laminar), determinando-se o número de Reynolds (Re) para os mesmos pontos coletados.

2 | METODOLOGIA

Apresentam-se a seguir a descrição da bancada de ensaios, os procedimentos experimentais e a modelagem matemática para a avaliação dos principais parâmetros envolvidos no escoamento de água pelo canal aberto.

2.1 Descrição da bancada de ensaios

A bancada de testes consiste em um modelo físico de canal aberto construído em acrílico que possui um mecanismo para elevação da declividade do canal. A Figura 1 apresenta a bancada de ensaios.

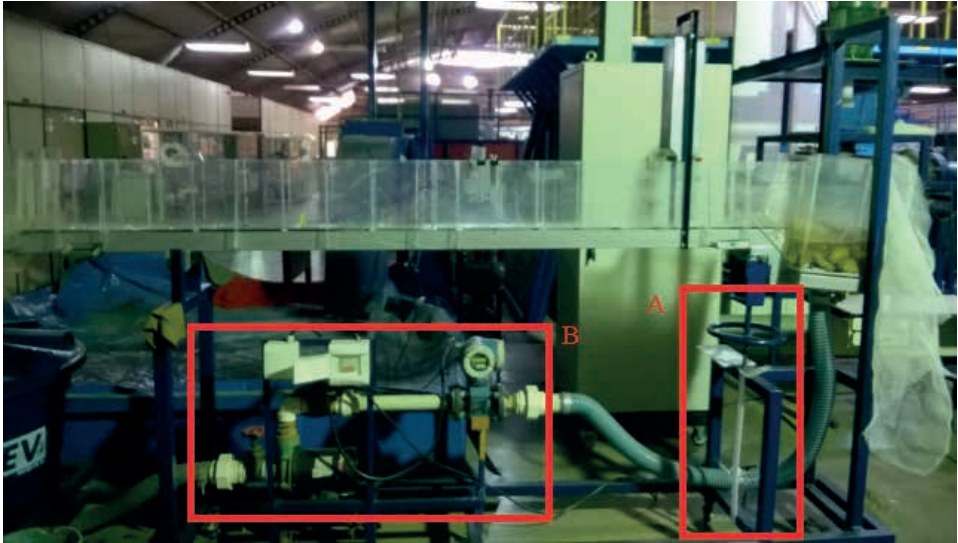


Figura 1. Bancada de ensaios de escoamento em canal aberto. (A): Mecanismo para mudança de declividade do canal. (B): Medidor de vazão volumétrica da água.

Um suporte graduado de uma das extremidades de sustentação do canal permite realizar a variação controlada da declividade do canal (Figura 1 - A). Para cada alteração de declividade é possível determinar a altura da camada de água com uma régua graduada. A vazão de água fornecida pelo conjunto motobomba pode ser fixada e determinada por um medidor de vazão (Figura 1 - B).

2.2 Procedimentos experimentais e modelagem matemática

Os testes consistiram-se em medir a altura da camada de água para 10 declividades diferentes, mantendo-se a vazão de água constante. Com os dados coletados é possível determinar a velocidade média de escoamento da água, o número de Reynolds e número de Froude. O e são utilizados geralmente como parâmetros adimensionais de problemas físicos relacionados à condutos forçados e abertos, respectivamente (Baptista et al., 2013).

A velocidade média de escoamento pode ser determinada pela Eq.(1), o número de Reynolds pela Eq.(2) e o número de Froude pela Eq.(3) (Çengel, 2007). As equações levam em consideração que o canal tem seção retangular constante.

$$V = \frac{Q}{By} \quad (1)$$

$$Re = \frac{\rho V L_{caract}}{\mu} \quad (2)$$

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot y}} \quad (3)$$

Em que ρ é a densidade do fluido (997,0 kg/m³ a 25 °C), V é dado em m/s, L_{caract} é o comprimento característico do canal (m), μ é a viscosidade dinâmica da água (0,00103 Pa.s a 25 °C), g é a aceleração da gravidade (9,81 m/s²), B é a largura do canal (0,135 m), Q é a vazão de água (0,00085 m³/s) e y é a altura da camada de água. O L_{caract} é dado pela Eq.(4).

$$L_{\text{caract}} = 4R_h = 4\left(\frac{By}{2y+B}\right) \quad (4)$$

O L_{caract} representa 4 vezes o raio hidráulico R_h do canal, que por sua vez é a relação entre a área de seção de escoamento pelo perímetro molhado. É possível escrever uma relação da altura da camada crítica para um canal com a geometria definida. Isto é, a altura de lâmina d'água na qual o regime de escoamento é crítico y_{crit} e está em iminente mudança ($Fr = 1$). A Eq. (5) apresenta esta relação.

$$y_{\text{crit}} = \left(\frac{Q}{\sqrt{g}B}\right)^{2/3} \quad (5)$$

Analisando-se as forças atuantes sobre um volume de controle de água escoando pelo canal, percebe-se que há um equilíbrio entre a força superficial (arrasto), contrária ao movimento de escoamento do fluido e a força gravitacional, a favor do escoamento. Sendo assim, é possível chegar nas Eq.(6) e Eq.(7) que representam, respectivamente, o coeficiente de Chézy C e o coeficiente de Manning n , isto é, são adimensionais correlatos ao efeito de atrito presente entre o fluido e as paredes do canal.

$$C = \frac{V}{R_h^{1/2} I^{1/2}} \quad (6)$$

$$n = \frac{R_h^{2/3}}{C} \quad (7)$$

Em que I é a inclinação do canal (m/m) para pequenos ângulos, dada pela Eq.(8). A velocidade do escoamento pode ser escrita conforme a Eq. (9).

$$I = \frac{\Delta z}{L} \quad (8)$$

$$V = \frac{1}{n} R_h^{2/3} I^{1/2} \quad (9)$$

Em que Δz (m) é a declividade imposta manualmente via mecanismo de inclinação do canal e L é o comprimento total do canal (2,22 m).

A energia específica do escoamento E é determinada em função da energia piezométrica y (m), chamada de E_1 e da energia cinética ($V^2/2g$), chamada de E_2 conforme a Eq. (10).

$$E = E_1 + E_2 = y + \frac{V^2}{2g}$$

(10)

3 | RESULTADOS

A Tabela 1 reúne os dados experimentais coletados e os parâmetros calculados para análise do tipo de regime de escoamento. A Figura 2 apresenta a relação entre os dois adimensionais relativos à caracterização do escoamento.

Δz (m)	y (m)	Velocidade (m/s)	Re	Regime	Fr	Regime
0	0,017	0,370	19998	Turbulento	0,907	Subcrítico
0,005	0,015	0,420	20483	Turbulento	1,094	Supercrítico
0,01	0,012	0,525	21256	Turbulento	1,529	Supercrítico
0,02	0,0115	0,548	21390	Turbulento	1,630	Supercrítico
0,03	0,01	0,630	21804	Turbulento	2,010	Supercrítico
0,04	0,0095	0,663	21946	Turbulento	2,171	Supercrítico
0,05	0,009	0,700	22089	Turbulento	2,354	Supercrítico
0,065	0,0085	0,741	22235	Turbulento	2,565	Supercrítico
0,08	0,008	0,787	22382	Turbulento	2,809	Supercrítico
0,1	0,007	0,899	22682	Turbulento	3,432	Supercrítico

Tabela 1. Dados coletados e parâmetros calculados para análise do escoamento.

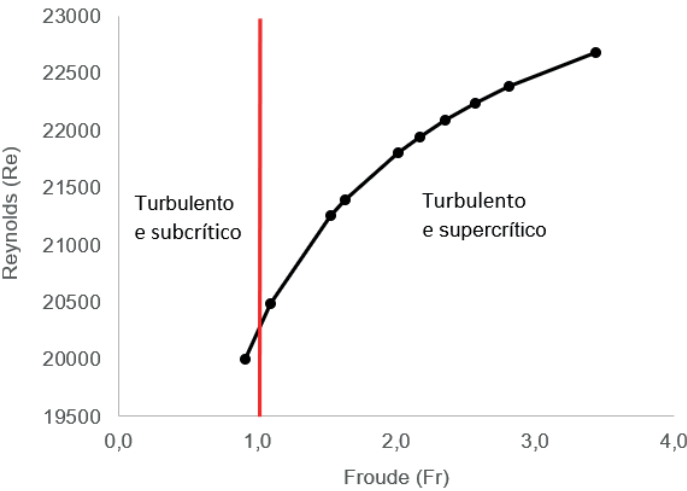


Figura 2. Reynolds x Froude

É possível observar que conforme ocorre o aumento da declividade, há uma redução na altura da camada do fluido, em decorrência do aumento da velocidade, visto que a vazão permanece constante. Para análises em canais abertos, o adimensional de Fr é mais expressivo, portanto, nota-se que para a vazão adotada e a partir de diferença de cotas superiores à 0,017 m o regime tende a ser supercrítico, caracterizado pelo Fr superior a 1. Para valores de Fr inferiores a 1, o escoamento é subcrítico. De forma geral, o escoamento é supercrítico para quase todos os pontos observados.

Com relação ao número de Reynolds, a literatura (Potter, 2004) descreve que para valores superiores a 4000, o escoamento pode ser considerado turbulento. Abaixo de 2300 o escoamento é laminar e entre estes dois valores, o regime é de transição. Observa-se valores acima de 20000, logo o escoamento é turbulento por todos os pontos analisados.

A Tabela 2 reúne os demais parâmetros determinados. A Figura 3 apresenta o comportamento das parcelas da energia do escoamento (piezométrica e cinética).

Δz (mm)	γ (mm)	Velocidade (m/s)	Re	Fr	E_1 (mm)	E_2 (mm)	E (mm)	n	C
0	17,0	0,370	19998	0,907	17,0	7,0	24,0	-	-
5	15,0	0,420	20483	1,094	15,0	9,0	24,0	0,00602	79,8
10	12,0	0,525	21256	1,529	12,0	14,0	26,0	0,00601	77,5
20	11,5	0,548	21390	1,630	11,5	15,3	26,8	0,00795	58,2
30	10,0	0,630	21804	2,010	10,0	20,2	30,2	0,00782	58,0
40	9,5	0,663	21946	2,171	9,5	22,4	31,9	0,00832	54,1
50	9,0	0,700	22089	2,354	9,0	24,9	33,9	0,00854	52,3
65	8,5	0,741	22235	2,565	8,5	28,0	36,5	0,00889	49,8
80	8,0	0,787	22382	2,809	8,0	31,6	39,6	0,00895	49,0
100	7,0	0,899	22682	3,432	7,0	41,2	48,2	0,00808	53,2

Tabela 2. Parâmetros medidos e calculados.

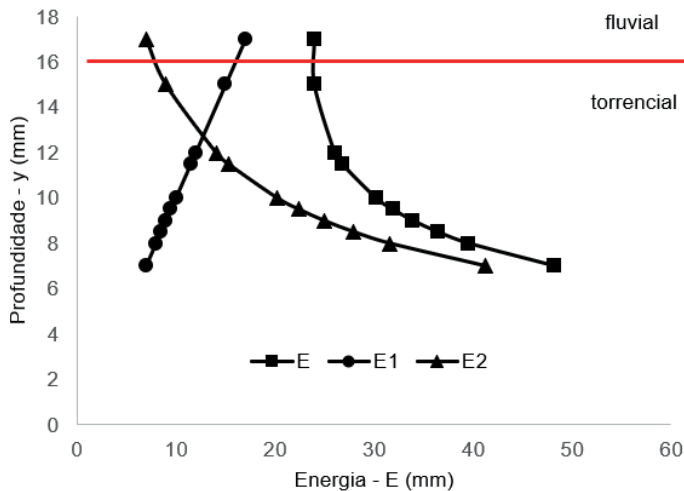


Figura 3. Parcelas de energia do escoamento.

As curvas da Figura 3 representam a energia piezométrica e específica em função da altura da camada do líquido. Nota-se que o ponto no qual ocorre uma mudança na curvatura da função de energia total (E) é denominado de ponto crítico e representa a situação de operação na qual o coeficiente Fr corresponde a 1, demarcando a transição do regime subcrítico para o supercrítico. Utilizando a Eq. (5), chega-se ao mesmo valor correspondente ao da Figura 3, isto é, 1,6 cm. Além disso, observa-se que a medida que a camada de fluido se reduz, a energia piezométrica diminui e a energia cinética aumenta, devido ao ganho de velocidade de escoamento. De forma geral, é neste ponto de mudança de curvatura que ocorre a situação de menor energia específica.

A Figura 4 apresenta a curva de declividade do canal I em função da camada y de água. Também apresenta Fr em função de y .

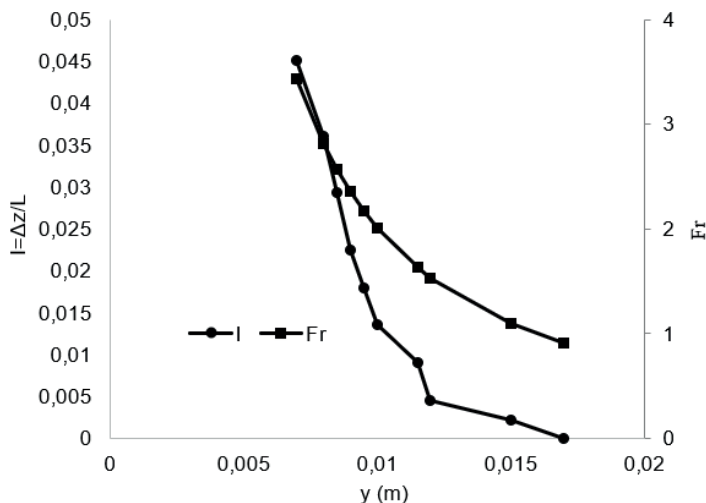


Figura 4. I e Fr em função de y.

Pelas curvas de tendência apresentadas na Figura 4, observa-se a tendência de valores muito altos para Fr e I à medida que a camada de água diminui. Por este comportamento, infere-se que há uma declividade crítica na qual acima dela a camada de água praticamente não se altera. Concomitantemente, Fr assume valores altos, caracterizando o escoamento como torrencial.

A Figura 5 apresenta os coeficientes de Chézy e de Manning para o canal em análise. Como o ensaio consistiu em analisar as variáveis para uma única vazão, as oscilações desses coeficientes ficaram na vertical do gráfico. Os valores obtidos apresentam uma variação expressiva em relação ao demais, podendo ser justificada por erros de paralaxe (movimento da água em relação à régua no instante de medição) e na imprecisão no posicionamento da régua de medição da profundidade da camada de fluido. A média do coeficiente de Manning obtido experimentalmente para o canal em acrílico equivale a 0,00784 e para o coeficiente de Chézy equivale a 59,1.

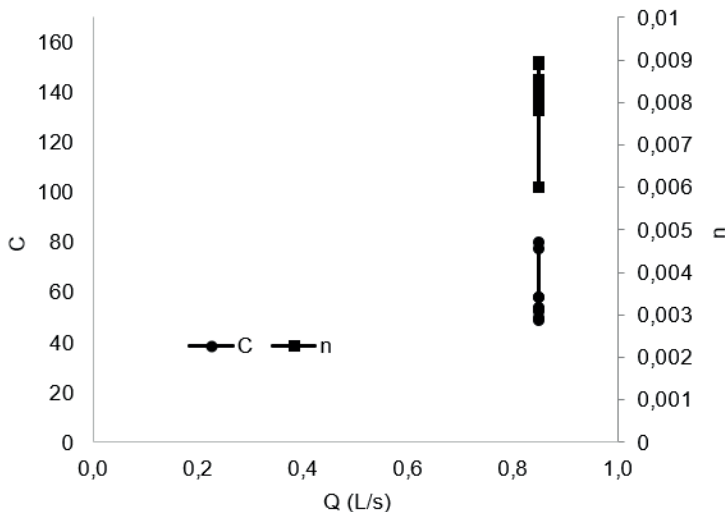


Figura 5. Coeficientes correlatos à rugosidade da parede do canal.

A Figura 6 apresenta a velocidade em função do Reynolds hidráulico e declividade do canal. Percebe-se que a velocidade aumenta à medida em que ocorre o aumento do Reynolds e da declividade.

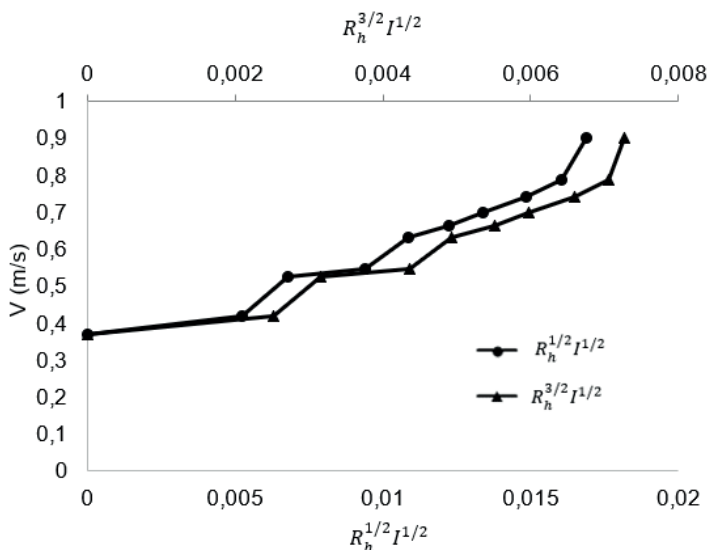


Figura 6. Velocidade em função do número de Reynolds hidráulico e declividade.

4 | CONCLUSÕES

A observação do regime de escoamento de um canal aberto é imprescindível para prever e conhecer o comportamento do sistema analisado, podendo garantir, por exemplo,

segurança para as populações e instalações nas proximidades desses sistemas, ao projetar elementos de dissipação de energia quando se nota regime de escoamento supercrítico.

A análise do número adimensional de Froude auxilia na determinação do regime de escoamento durante a execução de modelos físicos em escala. Na elaboração de modelos físicos, o efeito em decorrência da rugosidade das superfícies do modelo físico e do protótipo deve ser correlacionado, portanto, a análise do coeficiente de Manning é imprescindível.

De forma geral, observou-se que o escoamento foi praticamente turbulento e supercrítico durante todo o período de ensaio para a vazão fixada. A camada de água diminuiu à medida que a declividade do canal aumentava. O coeficiente médio de Manning e de Chézy foram, respectivamente, 0,00784 e 59,1.

REFERÊNCIAS

Çengel, Y.A. **Mecânica dos Fluidos, Fundamentos e Aplicações**, 1º edição, McGrawHill, São Paulo, 2007.

Baptista, M.B.; Coelho, M.M.L.P.; Cirilo, J.A.; Marcarenhas, F.C.B. **Hidráulica Aplicada**, 2º edição, ABRH, Porto Alegre, 2003.

Fox, R.W.; McDonald, A.T.; Pritchard, P.J. **Introduction to fluid mechanics**, 5th edition, John Wiley & Sons, New York, 2010.

Mega, E.A.F. **Estudo experimental do escoamento em cavidades abertas utilizando um canal de superfície livre**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, 2009.

Porto, R.M. **Hidráulica Básica**, 4ª ed. São Carlos: EESC/USP, 2006.

Potter, M.C.; Wiggert, D.C.; Hondzo, M.; Shih, T.I.P. **Mecânica dos Fluidos**, Pioneira Thomson Learning, São Paulo, 2004.

ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL RECURSO EÓLICO Y LOS PARÁMETROS ELÉCTRICOS DE UN AEROGENERADOR DE BAJA POTENCIA EN LA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE JULIACA - SEDE DE AYABACAS

Data de aceite: 01/02/2024

Armando Antonio Salinas Del Carpio

Universidad Nacional de Juliaca,
Juliaca, Perú
<https://orcid.org/0000-0002-1032-0388>

Pamela Milagros Condori Huancapaza

Universidad Nacional de Juliaca,
Juliaca, Perú
<https://orcid.org/0009-0006-6193-0844>

Javier Alvaro Rivera Suaña

Universidad Nacional de Juliaca,
Juliaca, Perú
<https://orcid.org/0000-0002-8943-7414>

Raúl Reynaldo Ito Díaz

Universidad Nacional de Juliaca,
Juliaca, Perú
<https://orcid.org/0000-0003-3370-5990>

Cristhian Yimmy Hilasaca Zea

Universidad Nacional de Juliaca,
Juliaca, Perú
<https://orcid.org/0000-0003-4568-2116>

Alberto Paricahua Huaynapata

Universidad Nacional de Juliaca,
Juliaca, Perú
<https://orcid.org/0000-0001-6315-3600>

RESUMEN: La ciudad de Juliaca es conocida como la ciudad de los vientos, pero hasta el momento aún no se han realizado investigaciones que demuestren cual es el verdadero potencial eólico que existe en la zona. Para cumplir ese objetivo se utilizó un aerogenerador de eje horizontal de 300 Watts con la finalidad de obtener parámetros de generación de energía eléctrica y calcular el rendimiento, factor de planta y las condiciones de velocidad del viento de la zona de Santa María de Ayabacas. Se utilizó un aerogenerador de eje vertical de 300 Watts el cual fue instalado en el techo de la Escuela Profesional de Ingeniería en Energías Renovables ubicado en la Sede de Ayabacas a una altura de 10 metros de altura y a través de un datalogger se almacenó los datos en una tarjeta Micro SD durante el tiempo establecido según la programación previamente configurado. Una vez terminado de almacenar los datos, estos datos son descargados a una PC para luego ser analizados mediante un software estadístico el cual nos ha permitido evaluar el rendimiento del aerogenerador de eje vertical, calcular el factor de planta y determinar la velocidad del viento para las condiciones reales del lugar.

PALABRAS CLAVE: Aerogenerador de eje

horizontal, datalogger, factor de planta, potencial eólico, rendimiento de aerogeneradores, velocidad del viento.

ANALYSIS AND EVALUATION OF THE WIND RESOURCE AND THE ELECTRICAL PARAMETERS OF A LOW POWER WIND TURBINE IN THE PROFESSIONAL SCHOOL OF ENGINEERING IN RENEWABLE ENERGIES OF THE NATIONAL UNIVERSITY OF JULIACA - SEDE DE AYABACAS

ABSTRACT: The city of Juliaca is known as the city of the winds, but to date no research has been carried out to demonstrate the true wind potential that exists in the area. To meet this objective, a 300 Watt horizontal axis wind turbine was used in order to obtain electrical energy generation parameters and calculate the performance, plant factor and wind speed conditions of the Santa María de Ayabacas area. A 300 Watt vertical axis wind turbine was used which was installed on the roof of the Professional School of Renewable Energy Engineering located at the Ayabacas Headquarters at a height of 10 meters high and through a datalogger the data was stored in a Micro SD card for the established time according to the previously configured schedule. Once the data has been stored, these data are downloaded to a PC and then analyzed using statistical software which has allowed us to evaluate the performance of the vertical axis wind turbine, calculate the plant factor and determine the wind speed for the real conditions of the place.

KEYWORDS: Horizontal axis wind turbine, datalogger, plant factor, wind potential, wind turbine performance, wind speed.

1 | INTRODUCCIÓN

Juliaca, conocida como la ciudad de los vientos, tiene gran recurso eólico, pero aún no se ha determinado cual es el potencial eólico que se puede aprovechar para la generación de energía eléctrica.

Para poder calcular el potencial eólico en la zona de Santa María de Ayabacas en Juliaca, Perú, se va a utilizar un sistema eólico que está compuesto principalmente por un aerogenerador de eje horizontal de 300 watts y un datalogger que va a obtener la mayor cantidad de parámetros de generación de energía eléctrica durante un tiempo establecido y almacenar datos de los parámetros de generación de energía eléctrica para poder realizar cálculos matemáticos y estadísticos y así concretar numéricamente los valores de rendimiento, factor de planta y velocidad del viento.

Es muy importante poder comprender el potencial eólico de la zona para la posible aplicación en proyectos futuros para la elaboración de proyectos de generación de energía eléctrica en la zona, tanto para los futuros ingenieros en energías renovables así como ingenieros desarrolladores de proyectos interesados en la energía eólica.

Existen varios trabajos de investigación referidos a la evaluación del recurso eólico, pero utilizan parámetros obtenidos por estaciones meteorológicas ya sean propias, o de las estaciones meteorológicas del SENAHMI y en último de los casos de mapas satelitales

como la página web de la NASA.

Buenaños (2015), realiza un estudio en donde indica el estudio de los parámetros eólicos, recolectados en cuatro años de una estación meteorológica en la Universidad Pontificia Bolivariana, al ver que realizar la simulación en el software RETScreen no resultaba suficiente, evaluó el comportamiento del aerogenerador Aeolos-H 5kW para poder analizar la viabilidad de un proyecto a gran escala en Medellín, Colombia. Analizando a detalle los datos obtenidos con la ayuda de un software computacional y Matlab, usando cuatro métodos diferentes para hallar de los parámetros de Weibull, así como también determino las curvas P-V, la rosa de viento y demás análisis necesarios para la ejecución del proyecto. Por lo que se concluyó que los datos recolectados no son suficientes para el estudio, para hallar la distribución Weibull se utilizó el método de mínimos cuadrados, en aspectos técnico y económico dos de las turbinas presentaron mejor desempeño en la relación costo versus producción de energía.

Vidal (2014), el cual tuvo como propósito cuantificar la energía contenida en el viento de la Universidad Tecnológica de Ciudad Juárez, Chihuahua, México, realizando su medición y evaluación para asegurar la optimización de la producción eléctrica cuando se decida instalar aerogeneradores eólicos tipo savonius. Los resultados del estudio describen un viento de baja velocidad con promedio de 2.26 m/s, con un potencial energético de 6W/m² con dirección predominante al oeste sur oeste (WSW) y al sur oeste (SW).

Franco (2022), quien estudio el potencial eólico de una estación meteorológica Vantage Pro 2, obteniendo velocidad y dirección del viento registrados por un Raspberry Pi 3, donde hizo un estudio de 8 meses, desde agosto del 2021 a marzo del 2022, con 3064 datos para cada variable para determinar que la velocidad del viento en la ciudad del Cusco es de 0.7957 m/s y resultando con un potencial eólico de 1.7057 w/m². El autor concluyo que existe una correlación positiva entre la velocidad del viento y el potencial eólico de la UNSAAC Cusco.

Estrada (2015), quien analizo el comportamiento del recurso eólico para generar energía con aerogeneradores de eje horizontal, en donde el objetivo fue estudiar la velocidad y dirección del viento a una altura de 58 m, los datos se obtuvieron del Laboratorio de Física de la Universidad de Piura. Utilizando el software WASP para el análisis matemático de los datos. Se obtuvo un gran aporte sobre el comportamiento dinámico de la velocidad, altura y rosa de vientos para la Región Piura.

Según Yancachajlla, Taipei, & Gallegos (2019), quienes estimaron el potencial de la energía eólica en la ciudad de Juliaca. Obteniéndose datos de la estación meteorológica Vantage pro, ubicada en el campus de la Universidad Nacional de Juliaca Sede la Capilla. Se obtuvieron los resultados en términos de parámetros establecidos, como son Weibull k con 1.4526, un valor que indica que la distribución no es asimétrica, un factor de escala c con un valor cercano a la media. La estimación del potencial eólico en Juliaca fue de 16.912W/m², la velocidad promedio de 2.27515 m/s, concluyéndose que la velocidad

no es constante y la dirección del viento varia para el uso del aerogenerador Black 300 que requiere una velocidad mínima de arranque de 1.8 m/s.

En el 2015 se presentó un proyecto encargado el recurso eólico y solar en la ciudad de Juliaca, analizando datos proporcionados por la estación meteorológica del SENAMHI Puno y la base de datos de la NASA disponible en la red. Para la estimación del potencial eólico se usó el método de distribución de Weibull y para la radiación solar el método de Liu-Jordan. Obteniéndose como resultado una velocidad mensual del viento entre 2 y 3 m/s para una altura de 10 m del suelo, la máxima velocidad del viento es de 6.56 m/s con una dirección predominante al oeste (Quiñonez, 2015).

En el 2018, con el objetivo de conocer la viabilidad técnica de la construcción de un miniparque eólico en la ciudad de Puno, se realizó la evaluación del recurso eólico mediante hojas de cálculo de Excel, Google Earth pro para conocer la información del terreno y datos del viento, también obtuvo información relevante del Atlas Eólico del Peru y del SENAMHI.

Se dispuso la información de la velocidad promedio y máximo, direcciones del viento promedio y máxima. Obteniendo como resultado una densidad para la zona de 0.78 m/s, velocidad promedio anual de 8.58m/s y una energía anual extraíble de 1.64 MWH (Jimenes, 2018).

2 | MATERIALES Y MÉTODOS

EQUIPOS Y MATERIALES

Los equipos a usar son un sistema eólico compuesto por el aerogenerador (Tabla 1), convertidor (Tabla 2), regulador de carga (Tabla 3), batería de almacenamiento (Tabla 4), inversor (Tabla 5).

Marca	Delta Volt
Modelo	Black 300
Hélice	3 hojas
Material	Carbón - Nylon
Diámetro del rotor	1.22 metros
Generador	Permanente, Direct Drive
Voltaje	24V DC (12V, 48V)
Rendimiento a 9.36 m/s	300 W
Velocidad mínima para cargar	1.8 m/s
Peso del Generador	15 kg

Tabla 1 Datos técnicos del aerogenerador

Modelo	FW03-12
Voltaje nominal de la batería	12 V
Potencia nominal del generador de viento	300W
Voltaje de arranque de freno	15V
Voltaje de recuperación de freno	13.5 V
Corriente de reposo	15 mA
Nivel de protección	IP67

Tabla 2 Datos técnicos del convertor de carga para el aerogenerador

Marca	Phocos
Modelo	CML05
Máxima corriente de módulos	5A
Máxima corriente de consumo	5A
Voltaje nominal del sistema	12V
Autoconsumo	Menor a 4mA
Nivel de protección	IP22

Tabla 3 Datos técnicos del regulador de carga

Potencia	300W
Tipo de onda	Onda sinusoidal modificada
Voltaje de entrada	12V
Voltaje de salida	220V

Tabla 4 Datos técnicos del inversor

En la Figura 5 se detalla a través de un diagrama de flujo la secuencia de conexión entre los equipos

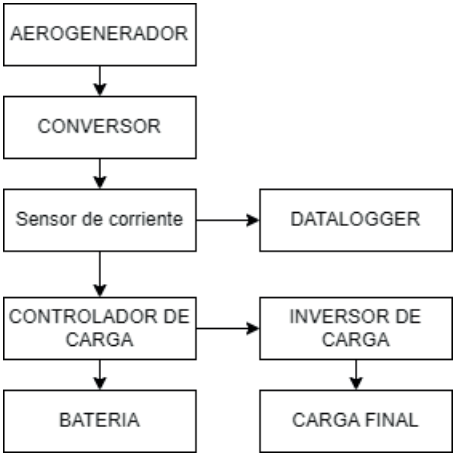


Figura 5 - Implementación del datalogger en el sistema eólico.

METODOLOGIA

El Sistema eólico se encuentra instalado en el techo de la Escuela Profesional de Ingeniería en Energías Renovables ubicado en la Sede Ayabacas (15°24'34.51"S 70° 5'26.28"O) en la parte norte de la ciudad de Juliaca a una altura de 3837 m.s.n.m.

Para poder calcular el potencial eólico en la zona de Santa María de Ayabacas en Juliaca, Perú, se va a utilizar un sistema eólico que está compuesto principalmente por un aerogenerador de eje vertical de 300 watts, un regulador de carga, una batería de gel, un inversor y un datalogger que va a permitir registrar y almacenar a cada segundo durante las 24 horas del día datos de generación tales como voltaje, corriente y potencia eléctrica

La metodología abordada en esta investigación es del tipo analítico ya que se van a obtener datos técnicos de la generación de energía eléctrica por parte del aerogenerador de eje vertical los cuales nos va a permitir evaluar e interpretar los parámetros de rendimiento, factor de planta y velocidad del viento durante un periodo de tiempo establecido.

Una vez obtenido los datos de generación son procesados en softwares estadísticos los cuales nos va a permitir calcular parámetros de rendimiento, factor de planta y sobre todo la velocidad del viento.

Como se observa en la Figura 5, se instalará un sensor de corriente que se conecta en serie directamente en el tramo comprendido entre los cables del conversor y el controlador de carga.

El sensor de corriente tiene una conexión directa con el datalogger, donde a través del módulo de la tarjeta micro SD, donde almacena los datos de corriente, voltaje y potencia.

La programación del datalogger está configurada para registrar y almacenar datos cada segundo del día durante los 365 días del año.

La descarga de datos es realizada todos los días a las 8:00 am con la finalidad de que la tarjeta micro SD no se llene de datos. Durante este periodo de tiempo es posible que se pierdan datos en el transcurso de la operación, para evitar ese riesgo se realiza el intercambio de la tarjeta por otra tarjeta libre

El rendimiento de un aerogenerador de baja potencia se puede calcular utilizando la siguiente ecuación:

$$Rend. = \left(\frac{Potencia\ generada}{Potencia\ diseño} \right) * 100 \quad (1)$$

Donde la potencia generada es la cantidad de energía eléctrica que produce el aerogenerador, medida en vatios (W) o kilovatios (kW) y la potencia disponible es la cantidad de energía cinética del viento que incide sobre el aerogenerador, medida en vatios (W) o kilovatios (kW).

La ecuación para calcular el factor de planta de un aerogenerador de baja potencia es la siguiente:

$$FP = \left(\frac{\text{Energia generada}}{\text{Potencia nominal} * \text{horas totales}} \right) * 100 \quad (2)$$

Donde la energía generada es la sumatoria de la potencia generada por el aerogenerador en el transcurso del día, medida en watios-hora (Wh) y la potencia nominal es la capacidad de generación máxima del aerogenerador, medida en watios (W) multiplicado por las horas del día.

Para calcular el potencial eólico del viento se utiliza la siguiente ecuación:

$$P = C_p * \frac{1}{2} * \rho * A * C_b * V^3 \quad (3)$$

Donde: el C_p que es el coeficiente de potencia que se encuentra en función de las dimensiones del aerogenerador, ρ que es la densidad del aire, A que es el área de barrido del aerogenerador, C_b (adimensional) que es el coeficiente de Betz y V (m/s) la velocidad del viento.

3 | RESULTADOS

Los datos descargados del datalogger corresponden del día 26 de mayo desde las 13:00:40 hasta el día 12 de junio a las 00:00:00, configurados para cada segundo del día, por lo que se necesita realizar un cálculo promedio para cada hora, como se muestra en la Figura 8.

Con la ecuación (3), se calcula la velocidad del viento tomando en cuenta los siguientes valores:

P : (Watts), C_p : 0.44 (adimensional), ρ : 0.8070 (kg/m³), A : 1.16 (m²), C_b : 0.5925 (adimensional) y V (m/s). Los resultados del viento se muestran en la tabla 6.

Con la ecuación (1), se calcula el rendimiento del aerogenerador en función de su diseño que es de 300 Watts. Los resultados del viento se muestra em la tabla 7

Con la ecuación (2) se calcula el factor de planta diario en función de las horas del día.

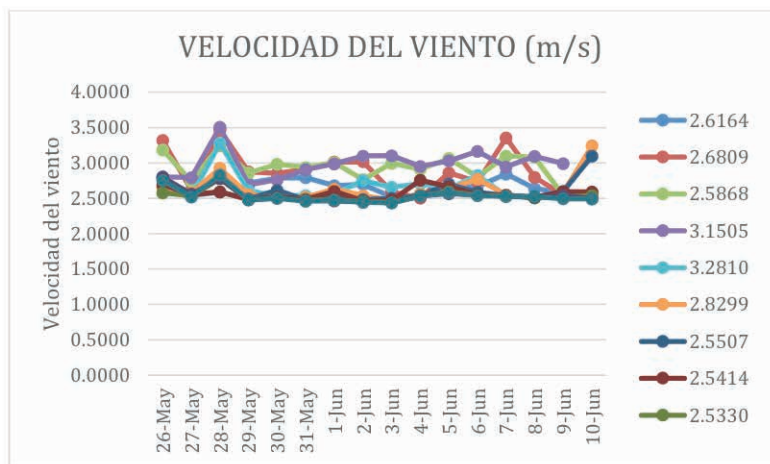


Figura 6 - Resultados de la velocidad del viento

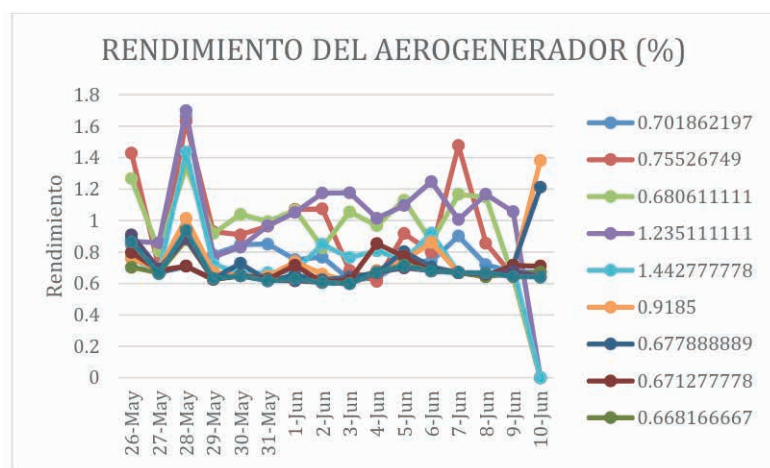


Figura 7 - Resultados del rendimiento del aerogenerador

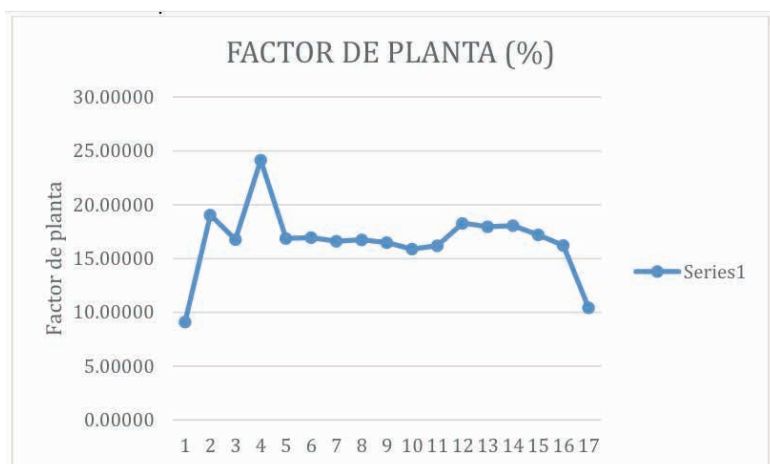


Figura 8 - Resultados del factor de planta

4 | CONCLUSIONES

Con los resultados obtenidos podemos llegar a las siguientes conclusiones:

La velocidad del viento registrada durante los 17 días que duro el registro de datos en el datalogger, nos muestra que la velocidad del viento es muy baja, por lo que se recomienda hacer una evaluación más extensa, 1 año, para poder obtener resultados a largo plazo que nos permita identificar con mayor amplitud la variación de la frecuencia de viento en el transcurso del año evaluando las condiciones en las diferentes estaciones del año.

Producto de la baja velocidad registrada, los niveles de producción también son muy bajos con respecto a los valores indicados por el fabricante lo que ocasiona el bajo rendimiento del aerogenerador.

El factor de planta en condiciones normales no supera más del 25 % lo que nos quiere indicar que se requiere de una mayor velocidad del viento para que se pueda incrementar dicho valor.

En la zona de Santa María de Ayabacas, ubicada en la zona norte de la ciudad de Juliaca, durante el periodo de registro la velocidad del viento no cumple con la velocidad mínima para la instalación de un parque eólico. Con un registro de datos a largo plazo, talvez podemos concluir que si es factible la instalación de parque eólico en la zona.

REFERENCIAS

Abdessamie, H. (2021). Diseño de cargador de baterías fotovoltaicas y eólico para 396 aplicaciones de IOT . Cartagena.

Bath, A. (2023). Global Wind Energy Council. Obtenido de <https://gwec.net/globalwindreport2023/>

Buenaños, J. (2015). Revision de las especificaciones técnicas y elaboración del protocolo de medida y monitoreo de un sistema de generación eólica de baja velocidad. . Medellín.

Estrada, C. (2015). Estudio del comportamiento del recurso eólico para caracterizar la generación de energía con generadores eólicos de eje horizontal en la ciudad de Piura. Lima.

Franco, R. (2022). Diseño e implementación del sistema de adquisición de datos de un aerogenerador con cargas para el estudio de potencial eólico en la UNSAAC. Cusco.

García, A. (2022). Estudio del recurso eólico, cálculo de estelas e implantación preliminar de un parque eólico en Aciberos (Zamora). Obtenido de https://oa.upm.es/72091/3/TFM_Alvaro_Garcia_Bermudez_de_Castro.pdf

Hernández, R. (2014). Metodología de la investigación . Mc Graw-Hill. 22

Islam, S., Nayar, C., & Hasan, M. (2018). Power Electronics for Renewable Energy Sources. Butterworth Heinemann.

Jimenes, R. (2018). Estudio de viabilidad tecnica de un mini parque eolico de 9kW conectado a la red electrica Puno, en el sector de ventilla Alto Puno-Departamento de Puno. Puno.

MINEM. (2010). DECRETO LEGISLATIVO DE PROMOCIÓN DE LA INVERSIÓN PARA LA GENERACION DE ELECTRICIDAD CON EL USO DE ENERGIAS RENOVABLES. Lima: El Peruano.

MINEM. (2016). Atlas eolico del Peru. Lima: Vortex.

Quiñonez, J. (2015). Evaluacion de los recursos eolico y solar en la ciuda de Juliaca de la region Puno. Puno.

Tapia, J. (2020). Distribucion de Weibull para determinar el potencial eolico . Arequipa.

UNED. (2015). Orientacion por medio de la rosa de los vientos . Colombia.

Valdiviezo, P. (2014). Diseño de un sistema fotovoltaico para el suministro de energia electrica a 15 computadoras portatiles en la PUCP. Lima.

Vasquez, A., Tamayo, J., & Vilches, C. (2017). La industria de la energía renovable en el Perú: 10 años de contribuciones a la mitigación del cambio climático. Obtenido de OSINERGMIN: https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/Institucional/Estudios_Economicos/Libros/Osinergmin-Energia-Renovable-Peru-10anios.pdf

Vidal, R. (2014). Evaluacion del recurso eolico en la universidad tecnologica de ciudad Juarez. Obtenido de <https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/684/1/Tesis%20Rafael%20Vidal%20Herrera.pdf> 23

Warchomicka, N., Palese, C., Pedro, G., Mattio, H., & Lassig, J. (2005). Evaluacion del recurso eolico del departamento confluencia de la provincia del Neuquen. ASADES, 39-44.

Yancachajlla , U., Taípe, C., & Gallegos, J. (2019). Estimacion del Potencial Energetico Eolico para la Ciudad de Juliaca, Peru. Ñawparisun, 15.

MODELAGEM VIRTUAL DE UM ROTOR DE TURBINA TIPO FRANCIS

Data de aceite: 01/02/2024

Tiago de Lima

Universidade Tecnológica Federal do
Paraná – Campus Guarapuava

Géssica Katalyne Bilcati

Universidade Tecnológica Federal do
Paraná – Campus Guarapuava

Henrique Ajuz Holzmann

Universidade Tecnológica Federal do
Paraná – Campus Guarapuava

RESUMO: O presente estudo tem como objetivo demonstrar a viabilidade e as vantagens inerentes à implementação de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs), aproveitando a vasta quantidade de rios existentes no Brasil, propícios a esse tipo de empreendimento. Ademais, aborda a imperatividade de novas abordagens na geração de energia diante do atual contexto energético brasileiro. Com o intuito de projetar e simular um rotor destinado a Turbinas Francis operantes em PCHs, foram desenvolvidos roteiros de códigos em linguagem Python para efetuar os cálculos das dimensões do rotor de turbinas do tipo Francis. A partir desses dados, a geometria foi modelada em um *Software* CAD e

a simulação foi conduzida no *Software* Solidworks para analisar as variáveis de pressão e velocidade do fluido em contato com o rotor da turbina Francis. A simulação evidenciou que a velocidade do fluido em contato com o rotor estudado atinge 6,2 m/s, com uma pressão de 109,5 kPa. Como critério de avaliação, foi realizada uma comparação entre os resultados obtidos na simulação da turbina Francis desenvolvida neste trabalho e os de uma simulação correspondente a uma turbina com parâmetros de entrada equivalentes, porém originada de decisões e *Software* distintos. A referida comparação indicou que o projeto elaborado no presente estudo apresenta viabilidade de utilização, favorecendo a rapidez para dimensionamento do rotor.

PALAVRAS-CHAVE: Dimensionamento, Turbina Francis. Pequena Central Hidroelétrica.

VIRTUAL MODELING OF A FRANCIS TURBINE ROTOR

ABSTRACT: The present study aims to demonstrate the feasibility and advantages inherent to the implementation of Small Hydroelectric Power Plants (SHPs), taking advantage of the vast amount of existing

rivers in Brazil, conducive to this type of enterprise. In addition, it addresses the imperativeness of new approaches in energy generation in the face of the current Brazilian energy context. In order to design and simulate a rotor for Francis turbines operating in SHPs, code scripts were developed in Python language to calculate the rotor dimensions of Francis turbines. From this data, the geometry was modeled in a CAD software and the simulation was conducted in Solidworks Software to analyze the pressure and velocity variables of the fluid in contact with the Francis turbine rotor. The simulation showed that the velocity of the fluid in contact with the studied rotor reaches 6.2 m/s, with a pressure of 109.5 kPa. As an evaluation criterion, a comparison was made between the results obtained in the simulation of the Francis turbine developed in this work and those of a simulation corresponding to a turbine with equivalent input parameters, but originated from different decisions and software. This comparison indicated that the project elaborated in the present study is feasible to use, favoring the speed of rotor design.

KEYWORDS: Design, Francis Turbine. Small Hydroelectric Power Plant.

INTRODUÇÃO

No território brasileiro existe uma elevada quantidade de recursos hídricos, contribuindo para que a energia gerada pelas centrais hidrelétricas constitua a maior parte da energia elétrica gerada na matriz energética brasileira. O Atlas de Energia Elétrica do Brasil, divulgado pela ANEEL (2008) estipulou que o Brasil possui um potencial hidráulico para gerar algo em torno de 260GW.

A Tabela 1 mostra que a matriz energética brasileira é constituída por um total de 4.681 empreendimentos que totalizam 151.596.237KW de potência instalada, das quais segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), 1262 dos empreendimentos em operação utilizam energia hidráulica na geração de energia elétrica, o qual resulta em 61% do potencial elétrico brasileiro.

Tipo	Quantidade	Potência Outorgada (KW)	Potência Fiscalizada (KW)	%
CGH	607	522.839	523.510	0,35
EOL	424	10.393.738	10.393.742	6,86
PCH	436	4.963.487	4.952.203	3,27
UFV	44	27.761	23.761	0,02
UHE	219	101.138.278	92.605.229	61,09
UTE	2.949	42.833.841	41.107.792	27,12
UTN	2	1.990.00	1.990.00	1,31
Total	4.681	161.869.944	151.596.237	100

Tabela 1 - Empreendimentos em Operação no Brasil

Fonte: ANEEL (2008).

A ANEEL através da Resolução Normativa N° 673, de 4 de agosto de 2015 define as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) como aqueles empreendimento destinados a

produção independente de energia elétrica, cuja potência esteja entre 3.000 KW e 30.000 KW. A ANEEL (2008) estima que após a publicação da Resolução Normativa N° 673, 176 novas PCH's devem agregar 2.064,72 MW ao sistema energético brasileiro à um custo de R\$16,5 bilhões.

Conforme denominação da ANEEL (2002) as hidrelétricas são sistemas que realizam o aproveitamento da energia das águas dos rios, convertendo-as em energia elétrica. Esta transformação ocorre em 3 etapas, sendo a primeira através da conversão da energia potencial da água do reservatório em energia cinética, em seguida esta energia da movimentação do fluido se transforma em energia mecânica ao girar as pás da turbina, a qual está acoplada em um gerador e pôr fim a conversão em energia elétrica. A Figura 1 apresenta os três principais tipos de turbinas utilizadas no Brasil, sendo as mesmas:

- Turbinas Pelton: altas quedas e baixas vazões;
- Turbinas Kaplan: baixas quedas com grandes volumes de água;
- Turbinas Francis: alturas de quedas médias.

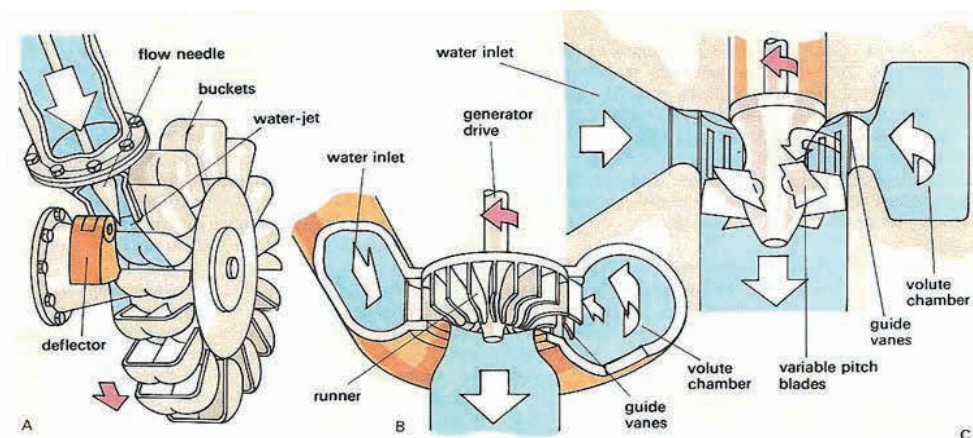


Figura 1- Turbinas Pelton (A), Francis (B) e Kaplan (C)

Fonte: River Engineering & Restoration at OSU (2006).

Visto a grande variedade de tipos de turbinas, saber selecionar e projetar seus componentes de forma otimizada e eficiente se torna um diferencial para a competitividade e viabilidade de uma PCH.

O projeto dessas turbinas é de extrema importância para sua efetividade e Souza (2011) descreve as seguintes etapas para o desenvolvimento de Turbina Francis:

- Dimensionamento preliminar: estabelece os limites físicos do escoamento;
- Dimensionamento básico: elaboração dos esboços em corte e escala das Turbinas Francis;

- Projeto e fabricação do protótipo: apresentação dos elementos que permitem elaborar o projeto e realizar a fabricação do modelo de turbina Francis;
- Testes e projeto para fabricação;
- Fabricação: realização física das etapas anteriores.

Para o dimensionamento do rotor para uma Turbina Francis, é necessário conhecimento prévio sobre as condições de operação da turbina, como a altura de queda da água e sua vazão ao chegar na turbina. Com esses dados de entrada, é possível determinar as dimensões dos componentes de uma Turbina Francis através do roteiro de equações proposto a seguir.

O primeiro passo para a realização dos cálculos é determinar o tipo da Turbina Francis, esse processo é realizado através da velocidade de rotação específica, n_{qA} , a qual segue o seguinte padrão mostrado na Tabela 2.

n_{qA}	Tipo de Turbina
60 a 119	Turbina Francis Lenta
120 a 219	Turbina Francis Normal
220 a 350	Turbina Francis Rápida

Tabela 2 - Seleção de Turbina Francis

Fonte: Autoria Própria (2018).

A velocidade de rotação específica é dada por:

$$n_{qA} = 10^3 * \frac{n}{60} * \frac{Q^{0.5}}{Y^{0.75}} \quad (1)$$

Onde:

n_{qA} = adimensional;

n = rotação do rotor (rpm);

Q = vazão de projeto (m^3/s);

Y = salto energético específico (J/kg).

$$Y = G * H \quad (2)$$

Onde:

g = gravidade ($9.81m/s^2$);

H = altura da barragem (m).

Na sequência são realizados os cálculos dos diâmetros do rotor, onde é necessário calcular uma nova velocidade de rotação específica que seja medido em rpm.

$$n_{qAr1} = 3 * n * \left(\frac{Q_r^{0.5}}{H^{0.75}} \right) \quad (3)$$

Onde:

Q_r = vazão regular (m^3/s).

$$Q_r = 0.731 * (1 + 0.01 * (n_{qAr1}^{0.5}) * Q_{r1} \quad (4)$$

Onde:

Q_{r1} = vazão considerando rendimento volumétrico (m³/s).

$$Q_{r1} = nv * Q \quad (5)$$

Onde:

nv = rendimento volumétrico.

O diâmetro externo da aresta de saída e a largura do distribuidor são dados pelas relações:

$$D_{5e} = 24,786 * \frac{H^{0,5}}{n} + 0,685 * \frac{Q_r^{0,5}}{H^{0,25}} \quad (6)$$

$$b_o = (0,168 * 10^{-2} * n_{qAr} - 0,018 * 10^{-4} * n_{qAr}^2) * D_{5e} \quad (7)$$

O diâmetro externo da cora interna é dado conforme a rotação específica.

Para $60 \leq n_{qAr} \leq 100$ tem se:

$$D_{3i} = (2,32 - 0,975 * 10^{-2} * n_{qAr}) * D_{5e} \quad (8)$$

Para $100 \leq n_{qAr} \leq 350$ tem se:

$$D_{3i} = \left(0,7 + \frac{0,16}{2,11 * 10^{-3} * n_{qAr} + 0,08} \right) * D_{5e} \quad (9)$$

Já o diâmetro externo da cinta externa é dado conforme a rotação específica.

Para $60 \leq n_{qAr} \leq 100$ tem se:

$$D_{3e} = (2,32 - 0,975 * 10^{-2} * n_{qAr}) * D_{5e} \quad (10)$$

Para $100 \leq n_{qAr} \leq 350$ tem se:

$$D_{3e} = (1,255 - 0,633 * 10^{-2} * n_{qAr}) * D_{5e} \quad (11)$$

O diâmetro interno da aresta de entrada é dado por:

Para $60 \leq n_{qAr} \leq 100$ tem se:

$$D_{4i} = (2,32 - 0,975 * 10^{-2} * n_{qAr}) * D_{5e} \quad (12)$$

Para $100 \leq n_{qAr} \leq 350$ tem se:

$$D_{4i} = (0,5 + 84,5 * n_{qAr}^{-1}) * D_{5e} \quad (13)$$

O diâmetro externo da aresta de entrada é dado por:

Para $60 \leq n_{qAr} \leq 100$ tem se:

$$D_{4e} = (2,32 - 0,975 * 10^{-2} n_{qAr}) * D_{5e} \quad (14)$$

Para $100 \leq n_{qAr} \leq 250$ tem se:

$$D_{4e} = (0,165 * 10^{-4} * n_{qAr}^2 - 0,835 * 10^{-2} * n_{qAr} + 2,017) * D_{5e} \quad (15)$$

Para $250 \leq n_{qAr} \leq 350$ tem se:

$$D_{4e} = (1,025 - 0,03 * 10^{-2} n_{qAr}) * D_{5e} \quad (16)$$

Para aresta de saída o diâmetro interno é dado por:

$$D_{5i} = (0,86 - 2,18 * 10^{-3} n_{qAr}) * D_{5e} \quad (17)$$

Na sequência calcula-se Interseção da Superfície Média da Pá com a Cinta Externa e a Coroa

Coroa interna:

Para $50 \leq n_{qAr} \leq 210$ tem se:

$$L_{4i} = (3,785 * 10^{-6} * n_{qAr}^2 - 1,673 * 10^{-3} * n_{qAr} + 0,436) D_{4e} \quad (18)$$

Para $210 \leq n_{qAr} \leq 350$ tem se:

$$L_{4i} = (2,353 * 10^{-6} * n_{qAr}^2 - 8,667 * 10^{-3} * n_{qAr} + 0,328) * D_{4e} \quad (19)$$

Cinta externa:

Para $50 \leq n_{qAr} \leq 210$ tem se:

$$L_{4e} = (3,713 * 10^{-6} * n_{qAr}^2 - 1,907 * 10^{-3} * n_{qAr} + 0,328) * D_{4e} \quad (20)$$

Para $210 \leq n_{qAr} \leq 350$ tem se:

$$L_{4e} = (2,222 * 10^{-4} * n_{qAr} + 0,0833) * D_{4e} \quad (21)$$

Por fim calcula-se a curva da Cinta Externa e da Coroa Interna.

$$Yi = 1,54 * D_{3i} * \sqrt{\frac{X}{Li} * (1 - \frac{X}{Li})^3} \quad (22)$$

$$Ye = 3,08 * \left(\frac{0,162 * (D_{3e} - D_{5e})}{\sqrt{\frac{L_{5e}}{Le} * (1 - \frac{L_{5e}}{Le})^3}} \right) * \sqrt{\frac{X}{Le} * (1 - \frac{X}{Le})^3} \quad (23)$$

Onde:

Yi = equação da curva da Coroa Interna e, Ye a curva para a Cinta Externa.

Apartir do sequencial de equações deve-se desenvolver a modelagem computacional,

à qual consiste na utilização de conjuntos de métodos e formulações para a resolução de problemas complexos, o qual envolve um grande número de variáveis, com destaque para o desenvolvimento dos métodos numéricos e de modelos matemáticos (SOUZA, 2011).

Esta se torna uma alternativa economicamente atraente no desenvolvimento de seus equipamentos, utilizando *Softwares* que simulem o processo realizado pelo equipamento, sendo possível prever o seu comportamento, e realizar modificações de projeto antes de sua produção, otimizando do rendimento energético.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para realização do presente trabalho buscou-se realizar inicialmente os cálculos para obtenção das dimensões dos elementos constituintes do conjunto da turbina do tipo Francis. Nesta etapa foi desenvolvido dois códigos em *Software* Python, os mesmos são baseados no roteiro de cálculo descrito por Souza (2011).

O primeiro código gera uma equação para a curva da Coroa Interna e para a curva da Cinta Externa projetadas no plano xy, essas equações serão utilizadas no *software* CAD, a fim de realizar o modelamento pás da turbina. Este código proposto corrige diretamente os valores em função do ângulo de entrada da turbina.

O segundo código foi utilizado a fim de calcular o ângulo de projeção horizontal para as linhas de correntes, estes ângulos servem para determinar a curvatura da pá da turbina, visto que a mesma segue um padrão em forma de curva côncava não linear.

Na sequência passou-se a etapa de definição das variáveis de entrada do sistema, sendo as mesmas definidas a partir de dados presentes no sistema hidroelétrico, sendo as mesmas: vazão no rotor, vazão mínima no rotor, altura da barragem, altura máxima da barragem, rotação do rotor, rendimento volumétrico e rendimento interno.

Os dados de entrada utilizados neste trabalho são os pertencentes a Usina BURICA I, a qual pertence a Cooperativa de distribuição de Energia Entre Rios Ltda. (CERTHIL), os dados estão mostrados na Figura 2.

```
#Dados de entrada
Q = 3.82 #m³/s vazão no rotor
Q = 3.82 #m³/s vazão mínima no rotor
H = 21.70 #m altura da barragem
Hmax = 25.00 #m altura máxima da barragem
g = 9.81 #gravidade
n = 450.00 #rpm rotação do rotor
nv = 0.96 #rendimento volumétrico
ni = 0.910 #rendimento interno
```

Figura 2 - Dados de entrada para os cálculos

Fonte: Autoria Própria (2018).

Após a execução dos cálculos em código *Python*, os resultados obtidos foram utilizados para a elaboração da geometria do rotor (componentes individuais) com o *Software Solidworks*. Com todos os elementos modelados, realizou-se a montagem do conjunto com a inserção das restrições necessárias para o funcionamento do rotor, sendo na sequência realizada a geração da malha e a simulação, definido as condições de contorno e por fim, a obtenção dos resultados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados encontrados a partir da aplicação do primeiro código em *Python*, com os dados de entrada, estão mostrados na Tabela 3.

B4m	D5e	b0	D4i	D4e	D4m	D3e	D3i	D5i
71.07	0.697	0.207	0.598	0.665	0.631	0.865	0.664	0.239

Tabela 3 - Resultados

Fonte: Autoria Própria (2018).

A projeção das curvas da Coroa Interna e da curva da Cinta Externa projetadas no plano xy, são mostradas na Figura 3a e 3b. A Figura 4a mostra as projeções juntamente com os resultados obtidos nas medições realizadas no *Software Solidworks*. Após os traçados das curvas, desenhou-se as arestas de entrada e saída da pá, mostradas na Figura 4b.

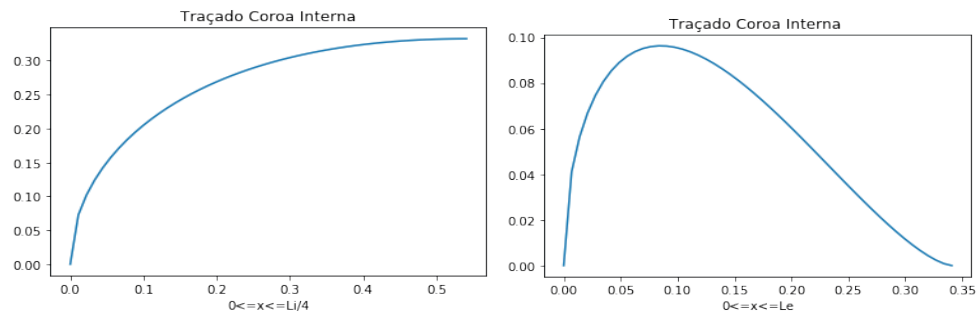


Figura 3 - a) Projeção da Cinta Externa no eixo xy, b) Projeção da Coroa Interna no eixo xy

Fonte: Autoria Própria (2018).

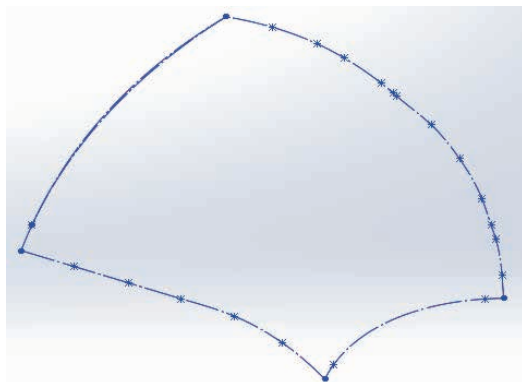
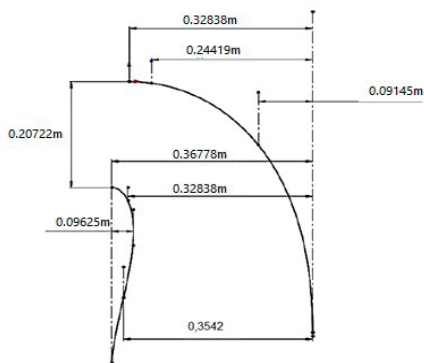


Figura 4 – a) Projeção da Pá no plano xy , b) Projeção no plano xy com as arestas de entrada e saída da pá.

Fonte: Autoria Própria (2018).

Com a projeção da pá do rotor modelada em CAD, as arestas de entradas e saída foram divididas em 6 segmentos iguais, S_j , e medido o diâmetro de cada ponto. A partir desses dados de entrada mostrados nas Tabelas 4 e 5, foi gerado um segundo código em *Software Python*, onde se obteve os seguintes resultados mostrados nas Tabelas 6, 7, 8 e 9. Obteve-se também os diâmetros b_m , mostrados, na Figura 5, os quais foram utilizados como referência para as linhas de pressão provisórias.

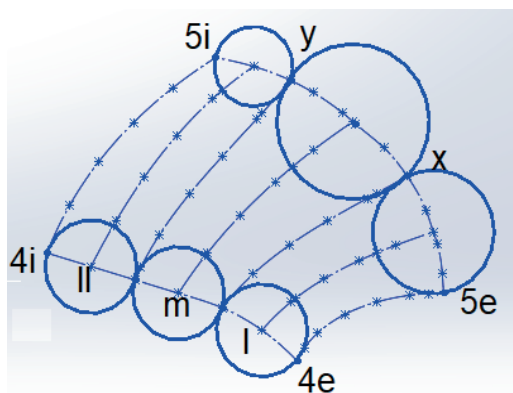


Figura 5 - Arestas de Pressão

Fonte: Autoria Própria (2018).

Pts	Sj	Cmj*/Cm4i	Dj	Kj
-	m	-	m	m
4i	0	1,0000000	0,32823328	0,32823328
1	0,033127275	1,0342212	0,30054135	0,31082624
2	0,06625455	1,0914553	0,28432198	0,31032473
3	0,099381825	1,1753779	0,27407737	0,32214449
4	0,1325091	1,2916004	0,26411586	0,34113215
5	0,165636375	1,4482978	0,25415435	0,38251842
4e	0,19876365	1,6571684	0,24419284	0,40466866

Tabela 4 - Dados da Aresta de entrada da pá.

Fonte: Autoria Própria (2018)

Pts	Sj	Cmj*/Cm4i	Dj	Kj
-	m	-	m	m
5i	0	1,0000000	0,27534827	0,27534827
1	0,030220742	1,0311724	0,18176537	0,18743143
2	0,060441483	1,0831072	0,15009391	0,16256776
3	0,090662225	1,1588314	0,12679365	0,14693246
4	0,120882967	1,2629261	0,10948044	0,13826571
5	0,151103708	1,4019885	0,09801941	0,15349032
5e	0,18132445	1,5853303	0,0914555	0,14498717

Tabela 5 - Dados da Aresta de saída da pá.

Fonte: Autoria Própria (2018).

Onde:

Cmj^* = velocidade meridional (m/s);

$Cm4i^*$ e $Cm5i^*$ = velocidades meridionais nos pontos 4i e 5i, respectivamente.

Pts	θ_j	ζ_j	Cmj^*	u_j	Cuj	β_j^*
-	graus	graus	m/s	m/s	m/s	graus
4e	93,1600086	46	14,35926766	7,7338144	25,0481920	12,46621119
4l	90	75	14,3198137	7,1770944	26,9911550	13,46954603
4x	82,1681844	85	14,2907477	6,7592905	28,6595270	14,33753133
4m	73,308842	86	14,27262827	6,4954052	29,8238621	14,94701961
4y	91,3204217	88	14,25593607	6,2498991	30,9953911	15,56351097
4ll	90	87	14,23922741	6,0017787	32,2767764	16,24167452
4i	86,0630384	89	14,22268038	5,7536582	33,6686785	16,98308145

Tabela 6 - Resultados para a Aresta de entrada da Pá

Fonte: Autoria Própria (2018).

Pts	tj	ej	Fesj	Cmj	β_j	β_{hj}
-	m	m	-	m/s	graus	graus
4e	0,85931271	0,0020417	0,98749915	15,085543	11,3974233	81,749013
4l	0,79745494	0,0020646	0,98730764	14,970436	12,2289835	78,175780
4x	0,75103228	0,0020818	0,98700363	14,891263	12,9561814	77,091466
4m	0,72171169	0,0020926	0,98664712	14,845807	13,4717844	76,559840
4y	0,69443324	0,0021027	0,99785056	14,633786	13,8399124	76,168194
4ll	0,66686430	0,0021129	0,98710206	14,748213	14,5579467	75,461158
4i	0,6392953	0,0021231	0,98695872	14,706826	15,1894012	74,812805

Tabela 7 - Resultados para a Aresta de entrada da Pá

Fonte: Autoria Própria (2018).

Pts	θ_j	ζ_j	Cmj*	uj	Wj	rgj
-	graus	graus	m/s	m/s	-	m
5e	89,33825	44,6691	15,46325	6,48056	0,497626	0,087458
5l	90,17451	45,0872	14,28693	5,36517	0,484964	0,124118
5x	81,71205	40,8560	14,18900	4,33809	0,455561	0,157650
5m	74,71059	37,3552	14,06977	3,37765	0,442351	0,201638
5y	74,52508	37,2625	13,96972	2,31531	0,417137	0,241762
5ll	49,93813	24,9690	13,92374	2,57166	0,423619	0,276967
5i	42,11520	21,0576	13,88315	2,15486	0,413427	0,310506

Tabela 8 - Resultados para a Aresta de saída da Pá

Fonte: Autoria Própria (2018).

Pts	Lgj	Sj	cotg β_{rj}	β_{rj}	β_{rhj}
-	m	-	-	graus	graus
5e	0,13425275	0,01174156	0,537839587	61,7268768	52,5821756
5l	0,15860173	0,01968535	0,431481769	66,6606829	58,45998151
5x	0,18117271	0,02856206	0,306808158	72,9435593	66,42259249
5m	0,19457352	0,03923351	0,252769321	75,8145173	70,22384381
5y	0,20013064	0,0483841	0,170688369	80,3136262	76,35289188
5ll	0,20535178	0,0568757	0,188942297	79,3005346	74,95659666
5i	0,20682484	0,06422048	0,1571756	81,0675791	77,3973696

Tabela 9 - Resultados para a Aresta de saída da Pá

Fonte: Autoria Própria (2018).

Onde:

θ_j = ângulo entre as tangentes às linhas de corrente e cada ponto da aresta;

ζ_j = ângulo entre as tangentes às linhas de correntes e as linhas paralelas ao eixo

nos pontos;

U_j = velocidade tangencial;

β_j^* = ângulo entre as velocidades tangenciais e relativas;

t_j = número de passos;

F_{esj} = coeficiente de estrangulamento;

C_{mj} = velocidade meridional;

β_j = ângulo entre a velocidade tangencial e relativas, levando em conta o estrangulamento variável;

β_{hj} = ângulo na projeção horizontal correspondente a aresta de entrada da pá;

W_j = coeficiente empírico de correção no desvio da saída da pá do rotor;

rg_j e L_{gj} = raio de centro de gravidade e o comprimento das linhas de corrente, respectivamente;

S_j = momento estático das linhas de corrente rebatidas no plano vertical;

β_{rj} = ângulo da pá do rotor na aresta de saída;

β_{rhj} = ângulo na projeção horizontal correspondentes à aresta de saída da pá.

Com os resultados dos ângulos das projeções horizontais das arestas de saída e de entrada, projetou-se a curvatura das arestas, como mostra a Figura 6.

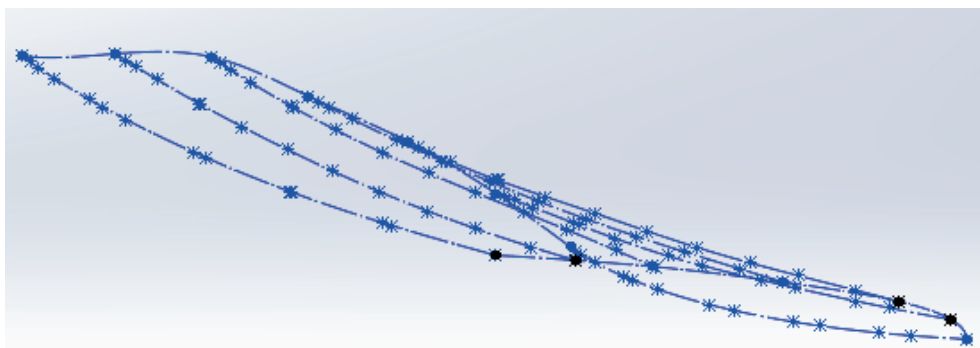


Figura 6 - Projeção 3D das Arestas da Pá.

Fonte: Autoria Própria (2018).

Para modelagem das superfícies de cada aresta de preção, utilizou-se o perfil padronizado Go 428, o que resultou na Figura 7. E por fim com auxílio da ferramenta Superfície por Loft no *Software* CAD, gerou-se a geometria da pá da turbina, mostrada na Figura 8a e na Figura 8b a mesma montada no conjunto do rotor.

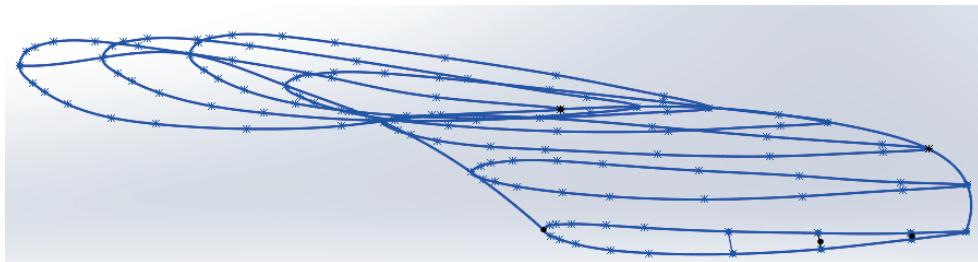


Figura 7 - Perfil das arestas da pá.

Fonte: Autoria Própria (2018)

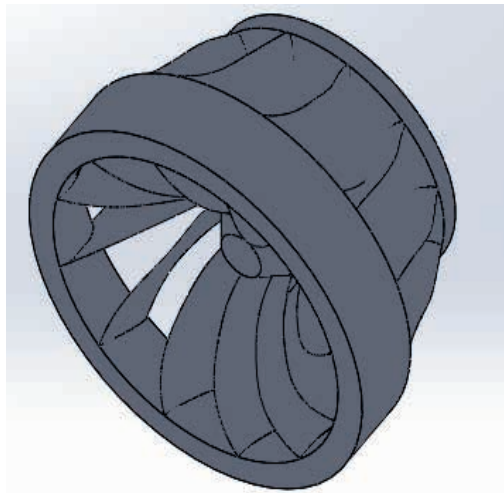
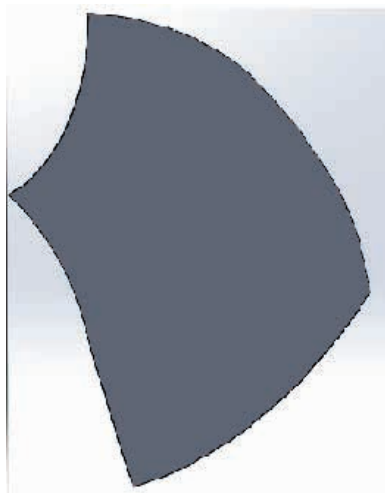


Figura 8 – a) Modelagem da Pá, b) Rotor da Turbina Francis Montado

Fonte: Autoria Própria (2018).

Após o desenvolvimento do rotor, foi projetado a espiral da Turbina Francis, seu cálculo para as dimensões encontrasse no Apêndice B, e é mostrado com o rotor montado na Figura 9.

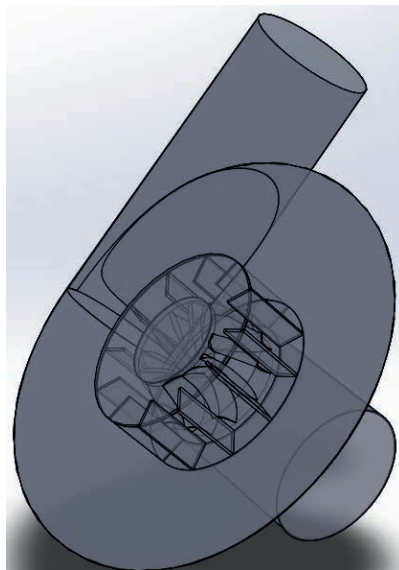


Figura 9 - Vista 3D da Turbina Francis

Fonte: Autoria Própria (2018).

Com os elementos e conjuntos montados, realizou-se a simulação do funcionamento do sistema, pelo método CFD do *Software Solidworks*, utilizando seu comando *Flow Simulation*. Para a realização desse comando é necessário fornecer uma condição de entrada e uma de saída do fluido, as quais foram consideradas as da Usina BURICA I, sendo elas a entrada do fluido na turbina à uma velocidade de 4,12 m/s e a saída a uma pressão atmosférica. Para realizar os cálculos o *Software* necessita que a geometria seja fechada, para isso utiliza-se o comando *Cread Lids*, mostrados na Figura 10, para definir as regiões de entrada e saída e deixar a geometria utilizada na simulação fechada.

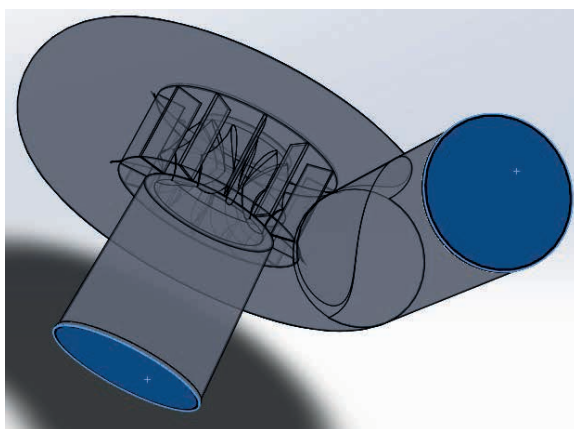


Figura 10 - Em Destaque os Lids Definindo as Regiões de Entrada e Saída

Fonte: Autoria Própria (2018).

Após definir as regiões de entrada e saída, na aba *Wizard*, definiu-se as configurações de unidades, sendo as mesmas no Sistema Internacional, e o tipo de fluido.

Após a realização das etapas para configurar a simulação, os resultados obtidos mostraram uma velocidade máxima do fluido em contato com o rotor de 6,2 m/s, também mostrou que a pressão máxima atingida foi de 109,5 kPa e uma força 9,02 KN.

Para avaliar os resultados obtidos, tomou-se como comparativo os resultados da simulação feita no trabalho de Santos (2012), o qual desenvolveu um rotor de Turbina Francis para a mesma hidrelétrica, porém com métodos para realizar os cálculos e tomadas de decisões diferentes no projeto das arestas de saída e de entrada das pás, a Figura 11a mostra a pá da turbina desenvolvida, além de um outro formato para o caracol da turbina, mostrado na Figura 11b. O processo de simulação adotado por Santos (2012) foi desenvolvido no *software* Ansys.



Figura 11 – a) Modelagem da Pá, b) Modelagem da Turbina Francis

Fonte: Santos (2012).

Os resultados obtidos pelo Solidworks mostraram que o fluido em contato com o rotor tem uma velocidade máxima de 6,2 m/s e uma pressão máxima de 109,5kPa, um valor menor que o obtido pelo Ansys, os quais foram de 10,72 m/s e 308,5kPa.

CONCLUSÃO

Com os dados referentes a usina hidrelétrica, foi possível realizar os cálculos, dimensionamento e a simulação do rotor da Turbina Francis. Os cálculos foram realizados em uma linguagem Python e o dimensionamento e a simulação no *Software* CAD Solidworks.

Os códigos desenvolvidos em linguagem Python possibilitaram a obtenção de dados para o dimensionamento dos componentes da Turbina Francis com um grau de precisão alto, devido aos seus cálculos serem realizados sem ocorrerem grandes erros de arredondamentos, pois ele trabalha com 16 casas decimais.

Para o desenvolvimento da geometria foram tomadas decisões que influenciaram

nos resultados da simulação. A primeira foi no desenvolvimento das arestas de saída e de entrada das pás, as quais influenciam nas espessuras e nos ângulos de entrada e saída de cada aresta da pá do rotor. Um outro fato que influenciou foi o formato da turbina, o comando ressalto por loft do Solidworks não é capaz de realizar o caracol da turbina quando os valores da circunferência variam, isso influencia na velocidade e na pressão do fluido. Esses fatores influenciaram na diferença entre os resultados obtidos através do Solidworks e do obtido por Santos (2012) no *Software* Ansys.

REFERÊNCIAS

ANEEL, **Gerando Evolução e Diversidade**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/documents/656877/15142444/Fontes+de+Energia+no+Brasil/2eb48f5c-cc7f-4f63-867e-b2a4f3603418?version=1.0>> Acesso em: 04 de Jun de 2017

ANELL, **Fontes de Energia Exploradas no Brasil**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/FontesEnergia.asp>> Acesso em: 04 de Jun de 2017

ANELL, **Energia Hidraulica**, Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/energia_hidraulica/4_3.htm> Acesso em: 04 de Jun de 2017

ANELL, **Resolução nº 394**, Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/res1998394.pdf>> Acesso em: 01 de Jun de 2017

Santos, César Gabriel dos, **Dimensionamento e Simulação Computacional de um Rotor Hidráulico do Tipo Francis**. Horizontina, Faculdade Horizontina, 2012.

SOUZA, Z. **Projetos de Máquinas de Fluxo: tomo I, Base teórica e Experimental**. Rio de Janeiro: Editora Interciência: Minas Gerais: Editora Acta, 2011.

Turbine Selection. Disponível em: <<http://rivers.bee.oregonstate.edu/book/export/html/35>> Acesso em: 08 de Jun de 2017

HENRIQUE AJUZ HOLZMANN - Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Graduação em Tecnologia em Fabricação Mecânica e Engenharia Mecânica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Mestre em Engenharia de Produção pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Doutor em Engenharia e Ciência dos Materiais pela Universidade Estadual de Ponta Grossa. Trabalha com os temas: Revestimentos resistentes a corrosão, Soldagem e Caracterização de revestimentos soldados.

GÉSSICA KATALYNE BILCATI - Professora do Curso de Engenharia Civil na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campus Guarapuava. Possui Graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Pará (UFPA). Mestrado em Engenharia Civil com ênfase em Materiais e Componentes de Construção pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campus Curitiba. Desenvolveu pesquisas relacionadas à painéis cimento-madeira. Doutora em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Paraná (UFPR), na área de compósitos cimentícios com adição de materiais celulósicos.

A

Aços 6, 7, 8, 14, 15, 16, 17, 19, 23, 24

C

Calor 1, 2, 3, 4, 5, 8, 9, 10, 11, 12, 13

Canal aberto 26, 27, 28, 34

Coeficiente de Chézy 26, 29, 33

Coeficiente de Manning 26, 29, 33, 35

D

Datalogger 36, 37, 40, 41, 42, 44

Desgaste de insertos 14, 15, 20

Dimensionamento 46, 48, 49, 60, 61

E

Escoamento de água 26, 27

Estudo experimental 26, 27, 35

F

Fluidos 1, 2, 9, 10, 11, 12, 13, 35

H

Horizontal axis wind turbine 37

L

Lubrificação 1

M

Metal duro revestido 8, 14, 15, 24

P

Pequena Central Hidroelétrica 46

Plant factor 37

R

Refrigeração 1, 4, 10, 11, 12

T

Torneamento 7, 9, 11, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25

Turbina Francis 46, 48, 49, 58, 59, 60

U

Usinagem 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 19, 20, 21, 22, 23, 24

W

Wind potential 37

Wind speed 37

Wind turbine performance 37

Engenharia mecânica:

conceitos fundamentais
e aplicações práticas

- 🌐 www.atenaeditora.com.br
- ✉ contato@atenaeditora.com.br
- 📷 @atenaeditora
- 📘 www.facebook.com/atenaeditora.com.br

Engenharia mecânica:

conceitos fundamentais
e aplicações práticas

- 🌐 www.atenaeditora.com.br
- ✉ contato@atenaeditora.com.br
- 📷 [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
- 📘 www.facebook.com/atenaeditora.com.br