Universidad Nacional de Loja

Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales No Renovables

Carrera de Electromecánica

Diseño y construcción de un prototipo de rueda hidráulica tipo overshot con cangilones articulados.

Trabajo de Integración Curricular, previo a la obtención del título de Ingeniero Electromecánico.

AUTOR:

Alan Stiven Cabezas Tenesaca

DIRECTOR:

Ing. Byron Agustín Solórzano Castillo

Loja-Ecuador

2024

Educamos para Transformar

Loja, 11 de noviembre del 2024

Ing. Byron Agustín Solórzano Castillo

DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICO:

Que he revisado y orientado todo proceso de la elaboración del trabajo de Integración Curricular titulado: **Diseño y construcción de un prototipo de rueda hidráulica tipo overshot con cangilones articulados** previo a la obtención del título de **Ingeniero en Electromecánico**, de autoría del estudiante **Alan Stiven Cabezas Tenesaca**, con **cédula de identidad 1104178494**, una vez que el trabajo cumple con todos los requisitos exigidos por la Universidad Nacional de Loja para el efecto, autorizo la presentación para la respectiva sustentación y defensa.

Firmado electrónicamente por:
BYRON AGUSTIN
SOLORZANO CASTILLO

Ing. Byron Agustín Solórzano Castillo

DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Autoría

Yo, **Alan Stiven Cabezas Tenesaca**, declaro ser autor del presente Trabajo de Integración Curricular y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos de posibles reclamos y acciones legales, por el contenido del mismo. Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja la publicación de mí trabajo de integración curricular o de titulación en el Repositorio Digital Institucional – Biblioteca Virtual.

Firmado electrónicamente por:
ALAN STIVEN CABEZAS TENESACA

Firma

Cédula de Identidad:1104178494

Fecha: 11 de noviembre del 2024

Correo electrónico: alan.cabezas@unl.edu.ec

Celular: 0989281975

Carta de autorización del trabajo de integración curricular por parte del autor para la consulta de producción parcial o total, y publicación electrónica de texto completo.

Yo **Alan Stiven Cabezas Tenesaca** declaro ser autor del Trabajo de Integración Curricular denominado: **Diseño y construcción de un prototipo de rueda hidráulica tipo overshot con cangilones articulados.**, como requisito para obtener el título de **Ingeniero Electromecánico**, autorizo al sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que con fines académicos muestre la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el Repositorio Institucional.

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el Repositorio Institucional, en las redes de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia del trabajo de integración curricular que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, suscribo, en la ciudad de Loja, a los 11 días del mes de noviembre del dos mil veinticuatro.

Firmado electrónicamente por:
ALAN STIVEN CABEZAS TENESACA

Firma.

Autor: Alan Stiven Cabezas Tenesaca

Cédula: 1104178494

Dirección: Paraguay y Quijos

Correo electrónico: alan.cabezas@unl.edu.ec

Celular: 0989281975

DATOS COMPLEMENTARIOS:

Director del Trabajo de Integración Curricular: Ing. Byron Agustín Solórzano Castillo

Dedicatoria

Con un profundo amor, dedico el presente trabajo a mis amados padres, Luis Cabezas y Mariana Tenesaca. Su incansable esfuerzo, las madrugadas dedicadas, los sabios consejos, y su amor incondicional han sido el faro que a iluminado mi camino. Su fortaleza para guiarme por la senda correcta y su determinación inquebrantable son fuentes inagotables de inspiración. A ellos les dedico este triunfo, como expresión de gratitud por todo lo que han contribuido en mi vida, y como un testimonio de que su apoyo es la fuerza motriz detrás de los éxitos alcanzados y de aquellos que están por venir.

A mis queridos hermanos, Madelaine y Yair quienes han sido compañeros inseparables en mis momentos de mayor alegría y también en aquellos de desafío. A lo largo de la travesía de la vida, han sido mi sostén inquebrantable, brindándome su apoyo incondicional, su motivación constante y, sobre todo, su inmenso amor. Agradezco profundamente la dicha de contar con su presencia y amistad en cada capítulo de mi historia.

También dedico mi trabajo de integración curricular a Wilma Troya quien me ha brindado su apoyo incondicional a lo largo de todo este proceso. Agradezco sinceramente su valiosa colaboración y aprecio, que han hecho una diferencia significativa en mi camino académico.

Agradecimientos

Expreso mi profundo agradecimiento a mis Padres por su inquebrantable respaldo, tanto económico como moral,su generosidad, apoyo, aliento y motivación, elementos fundamentales que han guiado mi camino hacia el logro de mis metas.

Expreso mi sincero agradecimiento al Ingeniero Byron Agustín Solórzano Castillo, quien ha desempeñado un papel fundamental en la realización de este trabajo. Su guía constante, el tiempo dedicado y su confianza desde el inicio de este proceso han sido invaluables. Agradezco especialmente por motivarme continuamente, brindándome un respaldo que ha sido clave para alcanzar este logro. Su apoyo y orientación han dejado una huella significativa en mi desarrollo académico y profesional.

A la Universidad Nacional de Loja y a todos los docentes por brindarme la invaluable oportunidad de acceder al mundo profesional, permitiéndome no solo adquirir conocimientos académicos, sino también compartiendo sus saberes personales y profesionales. Este gesto generoso ha enriquecido mi formación de manera integral y ha sido un catalizador clave para mi desarrollo tanto humano como profesional.

Igualmente, a mis compañeros y amigos que compartimos toda la experiencia de vivir la vida universitaria.

Índice de contenidos

PORTADA . . . . . **i**

CERTIFICACIÓN . . . . . **ii**

AUTORÍA . . . . . **iii**

CARTA DE AUTORIZACIÓN . . . . . **iv**

DEDICATORIA . . . . . **v**

AGRADECIMIENTO . . . . . **vi**

ÍNDICE DE CONTENIDO . . . . . **vii**

Índice de tablas xi

Índice de figuras xiii

Índice de anexos xiv

1 TÍTULO **1**

2 RESUMEN **2**

3 INTRODUCCIÓN **4**

4 MARCO TEÓRICO **6**

4.1 Capítulo 1 6

4.1.1 Ruedas Hidráulicas 6

4.1.2 Rueda hidráulica con canal de alimentación superior 7

4.1.3 Rueda hidráulica con canal de alimentación en la altura de su eje de giro 8

4.1.4 Rueda hidráulica con canal de alimentación inferior 9

4.2 Capítulo 2 10

4.2.1 Comportamiento Elástico 11

4.2.2 Plasticidad 11

4.2.3 Dureza del material 11

4.2.4 Análisis de Esfuerzos y Deformaciones 11

4.2.4.1 Esfuerzo de Tracción 11

4.2.4.2 Esfuerzo de Compresión . . . 12
4.2.4.3 Esfuerzo de flexión en la estructura . . . 12
4.2.4.4 Esfuerzo de torsión . . . 12
4.2.5 Diagrama de cuerpo libre . . . 12
4.2.5.1 Pasos para elaborar un Diagramas de Cuerpo Libre . . . 12
4.2.6 Momento de Inercia . . . 13
4.3 Capítulo 3 . . . 13
4.3.1 Factor de seguridad . . . 13
4.3.2 Transmisión de potencia . . . 13
4.3.3 Ejes . . . 14
4.3.4 Rodamientos rígidos de bola . . . 14
4.4 Capítulo 4 . . . 15
4.4.1 Procesos de construcciones . . . 15
4.4.1.1 Procesos de soldadura . . . 15
4.4.1.1.1 Soldadura por arco eléctrico . . . 15
4.4.2 Freno de Prony . . . 16
4.4.2.1 Diseño y Componentes del Freno de Prony . . . 17
4.4.2.2 Ventajas del Freno de Prony . . . 18
4.4.2.3 Limitaciones del Freno de Prony . . . 18
4.4.3 Frenos de Zapata Corta . . . 19
4.4.4 Diseño mecánico de ruedas hidráulicas . . . 20
4.4.4.1 Número de cangilones . . . 20
4.4.4.2 Volantes . . . 20
4.4.4.2.1 Volante de Disco Sólido . . . 20
4.4.4.2.2 Esfuerzos en los Volantes . . . 21
4.4.4.2.3 Esfuerzo máximo de tensión . . . 22
4.4.4.2.4 Torque . . . 23
4.4.4.2.5 Potencia . . . 25

5 METODOLOGÍA . . . 27
5.1 Equipos y materiales de oficina . . . 27
5.2 Software y herramientas de computador . . . 27
5.3 Equipos de construcción mecánica . . . 27

5.4 Proceso metodológico 28

6 RESULTADOS **31**

6.1 Diseño Conceptual de banco de pruebas para ruedas hidráulicas 31

6.2 Diseño de la rueda Hidráulica con cangilones articulados 32

6.2.1 Diseño conceptual de la rueda 32

6.2.2 Diseño geométrico de la rueda 34

6.2.2.1 Diámetro de la rueda 34

6.2.2.2 Número de cangilones 34

6.2.2.3 Análisis de velocidad angular de la rueda hidráulica 34

6.2.2.4 Cálculo del arco recorrido por el cangilón 35

6.2.2.5 Caudal para accionamiento de la rueda hidráulica 37

6.2.2.6 Torque máximo 38

6.2.2.7 Cálculo de ejes 41

6.2.2.7.1 Eje sólido para rueda hidráulica 41

6.2.2.7.2 Diámetro mínimo del eje solido 43

6.2.2.8 Cálculo de la Chaveta y Eje Hueco 44

6.2.2.9 Potencia teórica de la rueda hidráulica 46

6.2.2.10 Volumen del recipiente de montaje (V_{rm}) 46

6.2.3 Diseño de piezas y proceso constructivo 47

6.2.3.1 Adquisición de cangilones 47

6.2.3.2 Tapas laterales fijas 48

6.2.3.3 Tapas laterales móviles 49

6.2.3.4 Soporte o base 50

6.2.3.5 Mecanizado de acoples 50

6.2.3.6 Mecanizado de ejes 51

6.3 Diseño de la rueda Hidráulica convencional 53

6.3.1 Diseño conceptual de la rueda 53

6.3.1.1 Calculó de torque 53

6.3.2 Ingreso de Valores 55

6.3.3 Generación de Gráficas 57

6.3.4 Proceso constructivo 59

6.3.4.1 Tapas laterales 59

6.3.4.2 Pieza central 60
6.3.4.3 Soporte o base 61
6.3.5 Recipiente recaudador de agua 62
6.4 Pruebas de funcionamiento y simulación 64
6.4.1 Caudal real 64
6.4.1.1 Cálculo del volumen 64
6.4.2 Freno de zapata corta 65
6.4.2.1 Rueda Hidráulica con cangilones articulados 65
6.4.2.2 Rueda Hidráulica con cangilones fijos 70
6.4.2.3 Calculadora WheCalc: Herramienta automatizada para la evaluación de ruedas hidráulicas con cangilones articulados y convencionales 74
6.4.3 Simulación del proyecto en software XFLOW 76
6.5 Análisis de costos 81
6.5.1 Costos directos 81
6.5.2 Costos indirectos 83
6.5.3 Costo total de la construcción de prototipo de rueda hidráulica con cangilones articulados 83

7 DISCUSIÓN 84

8 CONCLUSIONES 86

9 RECOMENDACIONES 87

10 BIBLIOGRAFÍA 88

11 ANEXOS 91

Índice de tablas

Tabla 1. Ajuste de volumen y caudal para alcanzar un caudal cercano a 20 litros/min 38

Tabla 2. Torque obtenido por unidad de profundidad en rueda hidráulica con cangilones articulados 40

Tabla 3. Parámetros para el calculo del diámetro mínimo 43

Tabla 4. Torque obtenido por unidad de profundidad en rueda hidráulica fija . . . 55

Tabla 5. Resultados de las pruebas realizadas con la rueda hidráulica con cangilones articulados (caudal de 14.8 litros/min). 66

Tabla 6. Resultados de las pruebas realizadas con la rueda hidráulica con cangilones articulados (caudal de 5.67 litros/min). 67

Tabla 7. Resultados de las pruebas realizadas con la rueda hidráulica con cangilones fijos (caudal de 14.8 litros/min). 71

Tabla 8. Resultados de las pruebas realizadas con la rueda hidráulica con cangilones fijos (caudal de 5.67 litros/min). 72

Tabla 9. Costo del material para la construcción de rueda hidráulica con cangilones articulados 81

Tabla 10. Costo por mano de obra para rueda hidráulica con cangilones articulados 82

Tabla 11. Costo por mano de obra para rueda hidráulica con cangilones fijos 82

Tabla 12. Costo de maquinaria 82

Tabla 13. Total de costos directos 82

Tabla 14. Total de costos indirectos 83

Tabla 15. Total de costos indirectos 83

Índice de figuras

Figura 1. Rueda hidráulica de alimentación superior 8
Figura 2. Rueda hidráulica de alimentación lateral 9
Figura 3. Rueda hidráulica de alimentación inferior 10
Figura 4. Diagrama esquemático de la soldadura con arco 16
Figura 5. Diagrama esquemático del freno de prony 17
Figura 6. Flujograma para el desarrollo del trabajo de titulación. 30
Figura 7. Banco de pruebas para ruedas hidráulicas 32
Figura 8. Diseño conceptual de la rueda 33
Figura 9. Carga y descarga en la rueda 35
Figura 10. Sección lateral de la rueda hidráulica con cangilones articulados con su respectivo volumen y área 39
Figura 11. Fuerzas ejercidas sobre la rueda con cangilones articulados y con sus respectivos brazos 40
Figura 12. Fuerzas aplicadas al eje sólido 41
Figura 13. Diagrama de fuerzas cortantes y momento flector 43
Figura 14. Diagrama de cuerpo libre para chavetero 45
Figura 15. Cangilón TAPCO INC. 7x5 47
Figura 16. Modificación de cangilones TAPCO Inc. 7x5 con perforaciones laterales . 48
Figura 17. Tapas laterales fijas 49
Figura 18. Pieza céntrica móvil 49
Figura 19. Soporte para ruedas hidráulicas 50
Figura 20. Acople con rodamiento en grilon 51
Figura 21. Acople fijo en grilon 51
Figura 22. Torno marca TRAVIS 52
Figura 23. Eje de la rueda hidráulica 52
Figura 24. Sección lateral de la rueda Hidráulica y su respectivo volumen y área . . 53
Figura 25. Fuerzas ejercidas sobre la rueda y con sus respectivos brazos 54
Figura 26. Resultados de Software Matlab 57
Figura 27. Relación Torque - Número de cangilones 58
Figura 28. Relación Volumen - Número de cangilones 59
Figura 29. Pieza lateral de rueda hidráulica con cangilones fijos 60

Figura 30. Pieza céntrica con dobleces 60
Figura 31. Perforaciones en la pieza central de la rueda hidráulica para la fijación de los cangilones 61
Figura 32. Pieza central 61
Figura 33. Rueda hidráulica con cangilones fijos 62
Figura 34. Doblez de plancha para recipiente 63
Figura 35. Recipiente receptor de agua 63
Figura 36. Dimensiones de tanque 64
Figura 37. Potencia vs. Velocidad de giro (Rueda hidráulica con cangilones articulados) 68
Figura 38. Torque vs. Velocidad de giro (Rueda hidráulica con cangilones articulados) 69
Figura 39. Torque vs. Potencia (Rueda hidráulica con cangilones articulados) 70
Figura 40. Potencia vs. Velocidad (Rueda hidráulica con cangilones fijos) 73
Figura 41. Torque vs. Velocidad de giro (Rueda hidráulica con cangilones fijos) . . . 73
Figura 42. Torque vs. Potencia (Rueda hidráulica con cangilones fijos) 74
Figura 43. Pantalla de inicio de la calculadora WheCalc 75
Figura 44. Interfaz principal del programa Calculadora WheCalc 76
Figura 45. Configuración de entorno de simulación 77
Figura 46. Datos del fluido 78
Figura 47. configuración de geometría y velocidad de chorro 79
Figura 48. Simulación de rueda hidráulica 80
Figura 49. Soporte para ruedas hidráulicas 80

Índice de Anexos

Anexo 1. Planos de ruedas hidráulicas 91
Anexo 2. Programa Calculadora WheCalc 91
Anexo 3. Guía de prácticas 92
Anexo 4. Construcción del Proyecto 92
Anexo 5. Tabla de longitud de chaveta según la norma DIN 6885 A. 93
Anexo 6. Tabla de selección de b y h de chaveta según el catalogo OPAC 94
Anexo 7. Tabla de datos de chumaceras 95
Anexo 8. Planos eléctricos 96
Anexo 9. Detalles del acero de transmisión AISI 1018 97
Anexo 10. Detalles de planchas de acero negro laminadas 98
Anexo 11. Prototipo final 99
Anexo 12. Certificación de traducción del resumen 100

Simbología y acrónimos

Símbolo	Significado
A	Área
g	Aceleración debido a la gravedad
η	Eficiencia del sistema
ϵ	Deformación unitaria
ρ	Densidad
d_c	Diámetro comercial para el eje sólido
d_s	Diámetro del eje sólido
F	Fuerza
F_R	Fuerza de reacción
F_c	Fuerza producida por un cangilón
F_i	Fuerza necesaria para producir el movimiento en la rueda hidráulica
σ	Esfuerzo normal
τ	Esfuerzo cortante
E	Módulo de elasticidad
G	Módulo de rigidez
m	Masa
M	Momento
M_F	Momento flector
M_T	Momento torsor
I	Momento de inercia
J	Momento polar de inercia
L	Longitud o brazo de palanca
N	Velocidad de giro de la rueda hidráulica
n	Número de veces que un cangilón pasa por la misma posición durante un minuto
Y	Número de cangilones por minuto
v	Velocidad tangencial o de escape
w	Velocidad angular
V	Volumen
V_r	Velocidad de rotación efectiva de la rueda hidráulica
ν	Coeficiente de Poisson
θ_{min}	Diámetro mínimo del eje sólido
T_{max}	Torque máximo

1. Título

Diseño y construcción de un prototipo de rueda hidráulica tipo overshot con cangilones articulados.

2. Resumen

El presente trabajo de titulación tuvo como propósito diseñar un prototipo de rueda hidráulica con cangilones articulados y comparar su funcionamiento con una rueda hidráulica convencional de igual geometría.

En la fase de diseño, se desarrollaron los componentes del sistema, desde la estructura base hasta las modificaciones en los cangilones para optimizar la retención de agua y mejorar el rendimiento general.

Para la validación se construyo un banco de pruebas que incluye tanques de agua superior e inferior, una bomba de recirculación, un freno de Prony para medir el torque y sensores que accionan la bomba asegurando un flujo constante de agua. En el prototipo, se emplearon cangilones TAPCO de 7x5 pulgadas con rodamientos y acoples de grilón, lo cual permite que cada cangilón tenga su propio eje de rotación. Este diseño, combinado con un riel de vaciado, facilita la descarga de agua al finalizar la trayectoria, asegurando un ciclo continuo de llenado y vaciado.

Además, se desarrolló un software específico para realizar cálculos rápidos de torque y potencia, agilizando el proceso de análisis tras cada lectura de fuerza y velocidad obtenida en el banco de pruebas. Las simulaciones de dinámica de fluidos en el software XFlow versión estudiantil y las pruebas experimentales confirmaron la mayor retención de agua del prototipo articulado, evidenciando un mayor torque a altas velocidades y caudales.

La construcción del proyecto se llevó a cabo utilizando materiales accesibles en la ciudad, lo que permitió reducir costos y elaborar mejores propuestas de diseño con materiales disponibles dentro del medio. Sin embargo, para los componentes principales, como los cangilones, se optó por adquirirlos fuera de la ciudad debido a que dentro de la misma aún no se cuenta con este tipo de productos.

Palabras clave: Rueda hidráulica, cangilones articulados, alimentación superior, banco de pruebas.

Abstract

The purpose of this degree work was to design a prototype water wheel with articulated buckets and compare its performance with a conventional water wheel of the same geometry.

In the design phase, the system components were developed, from the base structure to modifications in the buckets to optimize water retention and improve overall performance.

For validation, a test bench was built that includes top and bottom water tanks, a recirculation pump, a Prony brake to measure torque, and sensors that actuate the pump to ensure a constant flow of water. In the prototype, 7x5-inch TAPCO buckets with bearings and bucket couplings were used, allowing each bucket to have its own axis of rotation. This design, combined with an emptying rail, facilitates the discharge of water at the end of the trajectory, ensuring a continuous filling and emptying cycle.

In addition, specific software was developed to perform fast torque and power calculations, speeding up the analysis process after each force and speed reading obtained on the test bench. Fluid dynamics simulations in the XFlow student version software and experimental tests confirmed the higher water retention of the articulated prototype, evidencing higher torque at high speeds and flow rates.

The construction of the project was carried out using materials accessible in the city, which allowed reducing costs and developing better design proposals with materials available in the environment. However, for the main components, such as the buckets, it was decided to purchase them outside the city, since this type of product is not yet available in the city.

Keywords: Water wheel, articulated buckets, top feed, test bench.

3. Introducción

Motivación

Las ruedas hidráulicas convencionales, aunque efectivas en muchos contextos, presentan limitaciones significativas en cuanto a la optimización del volumen de agua retenido. Durante el ciclo de operación, particularmente en el punto de máximo brazo de accionamiento, estas ruedas no logran retener la máxima cantidad de agua posible, lo que afecta su eficiencia. Por esta razón, el presente trabajo propone el diseño de un prototipo de rueda hidráulica tipo overshot con cangilones articulados, con el objetivo de mejorar la retención de agua y, por lo tanto, su rendimiento general.

Tema metodológico

La investigación se llevará a cabo mediante la construcción y prueba de un prototipo de rueda hidráulica con cangilones articulados. Este prototipo será comparado con una rueda hidráulica convencional de igual geometría. Para realizar esta comparación, se utilizarán prototipos a escala y se medirán parámetros como el torque utilizando un freno de zapata corta. El proceso experimental será complementado con simulaciones de dinámica de fluidos utilizando el software XFlow, lo que permitirá analizar el comportamiento del agua en ambas ruedas y evaluar su eficiencia en la retención del fluido.

Antecedentes

Diversas investigaciones en la Universidad Nacional de Loja han explorado el diseño y cálculo de ruedas hidráulicas convencionales, como las de Luis Enríquez, Claudio Quevedo, Marco Saritama, Rolando Vaca, Bryan Paccha y Juan Solórzano. Estos estudios, respaldados por investigadores como Eras (2004), se centran en diversas metodologías de cálculo para diferentes tipos de ruedas hidráulicas, enfocándose en el análisis de ruedas con cangilones fijos, evaluando la geometría y el rendimiento de estas estructuras. Sin embargo, no se ha estudiado en profundidad el impacto de los cangilones articulados en la retención del agua y el rendimiento de la rueda. Este trabajo busca llenar ese vacío, proponiendo un diseño que permita mejorar la retención de agua a lo largo de todo el ciclo de operación de la rueda.

Con estos antecedentes, los objetivos de este trabajo de integración curricular son:

Objetivos

Objetivo general

Diseñar, construir y comparar un prototipo funcional de una rueda hidráulica overshot con cangilones articulados.

Objetivos específicos

- Diseñar la rueda hidráulica overshot con cangilones articulados.
- Construir el prototipo de rueda hidráulica overshot con cangilones articulados.
- Comparar el prototipo con una rueda hidráulica convencional de igual geometría.

Presentación del documento

El documento está estructurado de la siguiente manera: en el primer capítulo se presenta el marco teórico, donde se explican los conceptos básicos sobre el funcionamiento de las ruedas hidráulicas. En el segundo capítulo se detalla la metodología utilizada para el diseño, construcción y prueba de los prototipos. El tercer capítulo incluye los resultados obtenidos a partir de las pruebas experimentales y simulaciones. Finalmente, en el cuarto capítulo se presentan las conclusiones del estudio y se sugieren posibles investigaciones futuras.

4. Marco teórico

4.1 Capítulo 1

El propósito de este capítulo es proporcionar información general sobre las ruedas hidráulicas, incluyendo una clasificación basada en los diferentes métodos de entrada de agua.

4.1.1 Ruedas Hidráulicas

La rueda hidráulica en un mecanismo que aprovecha la energía potencial generada por el peso del agua en las palas de una rueda mecánica, el peso hace que la rueda gire y mediante el uso de un punto excéntrico en un disco metálico, se produce el movimiento el cual es aprovechado para la obtención de energía eléctrica (Lluscha, 2015). El aprovechamiento de la energía cinética del agua mediante las paletas se debe a un elemento motor

Existe una relación óptima entre la velocidad de la rueda y la velocidad de la corriente de agua (Smith A., 2018). Los adelantos realizados a las ruedas hidráulicas tradicionales dieron como resultado la construcción de ruedas de impulso y de reacción, las cuales aprovechan en gran cantidad la energía cinética y pueden ser de menor tamaño.

La investigación de las ruedas hidráulicas representa una solución prometedora ante los desafíos de escasez de energía eléctrica en varios sectores. Este enfoque se destaca por su capacidad de ofrecer una fuente alternativa de energía, aprovechando el movimiento del agua para generar electricidad. Este tipo de tecnología se clasifica en tres categorías principales:

- Rueda hidráulica con canal de alimentación superior.
- Rueda hidráulica con canal de alimentación en la altura de su eje de giro.
- Rueda hidráulica con canal de alimentación inferior.

Estos sistemas tienen como ventajas:

- Gracias al continuo ciclo del agua, esta fuente de energía disfruta de una disponibilidad ilimitada, lo que garantiza un recurso constante para la generación de energía eléctrica.
- Se distingue por ser una energía completamente limpia. No genera emisiones de gases de efecto invernadero, no produce contaminantes tóxicos, ni contribuye a la creación de lluvia ácida, lo cual la posiciona como una alternativa energética respetuosa con el medio ambiente.
- Los embalses construidos para la producción de energía hidráulica ofrecen ventajas suplementarias significativas. Facilitan el almacenamiento de agua, lo que no solo asegura

un suministro adecuado para la generación de energía, sino que también beneficia actividades recreativas y sistemas de riego, reforzando así el valor de esta fuente energética en el fomento de un desarrollo sostenible.

4.1.2 Rueda hidráulica con canal de alimentación superior

Las ruedas hidráulicas de alimentación superior son un tipo de mecanismo que aprovecha la energía potencial del agua a una altura elevada para generar energía mecánica. Este tipo de rueda está compuesto por un eje horizontal y una serie de cajones o cangilones distribuidos en la periferia, los cuales reciben el agua desde un canal situado por encima de la rueda (Álvarez, 1985). Al entrar el agua en los cajones, la gravedad produce un movimiento de rotación que permite transformar la energía potencial del agua en energía cinética, como se muestra en la **Figura 1**

Álvarez (1985) explica que estas ruedas hidráulicas requieren una caída de agua considerable para operar de manera óptima y son especialmente eficientes en entornos donde el caudal es relativamente constante, pero la altura es considerable. En particular, se ha observado que la eficiencia de estas ruedas puede alcanzar hasta el 85 %, siempre que se mantenga una velocidad tangencial de entre 1.5 m/s y 2.5 m/s. Esta velocidad asegura que el agua permanezca en los cangilones el tiempo suficiente para maximizar la transferencia de energía, evitando descargas prematuras debido a la fuerza centrífuga (Córdova, 2010).

Para optimizar su funcionamiento, el diseño de los cajones es un factor clave. Anderson (2009) destaca que el uso de cajones curvos o cangilones profundos permite retener más agua durante el ciclo de rotación, lo cual incrementa la eficiencia del sistema. Además, estudios de Muller (2013) señalan que la disposición de los cangilones y el ángulo de entrada del agua son factores críticos para minimizar las pérdidas de energía y asegurar un movimiento fluido. Esto se debe a que, con un diseño optimizado, se puede reducir el desperdicio de agua y maximizar la fuerza aplicada en el punto de rotación de la rueda.

Históricamente, las ruedas de alimentación superior fueron ampliamente utilizadas en Europa y Asia para la molienda de granos y otras aplicaciones industriales antes de la revolución industrial. Según Giesecke (1989), su adopción fue impulsada principalmente por su capacidad para operar de manera eficiente en terrenos montañosos, donde era posible aprovechar el desnivel natural de los ríos y arroyos.

Actualmente, el interés por estas ruedas ha resurgido en el contexto de la generación de energía renovable. Estudios recientes muestran que estos dispositivos pueden integrarse en sis-

temas modernos de energía hidroeléctrica de pequeña escala, ofreciendo una opción sostenible para comunidades rurales y zonas aisladas (Muller, 2013).

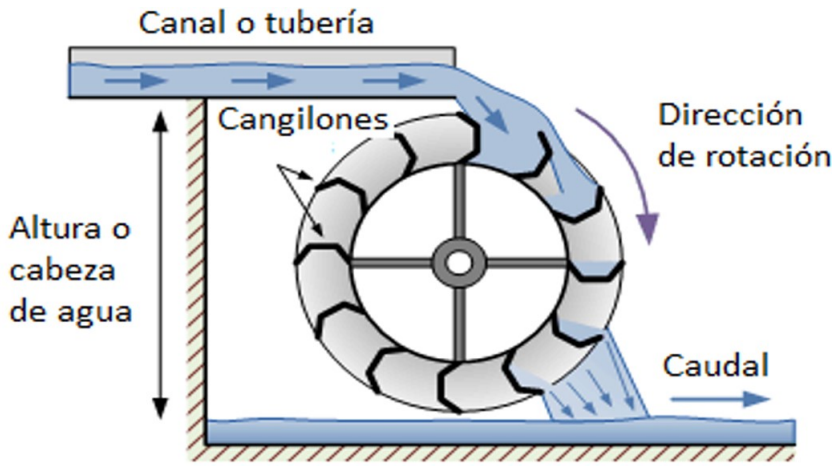


Figura 1. Rueda hidráulica de alimentación superior

Fuente: Alternative (2013).

4.1.3 Rueda hidráulica con canal de alimentación en la altura de su eje de giro

Las ruedas hidráulicas con canal de alimentación al nivel de su eje de giro son sistemas eficaces de conversión de energía, donde el agua impacta las paletas en el nivel del eje, aprovechando tanto su energía potencial como cinética. Este tipo de rueda es ideal para caídas de agua relativamente bajas, entre 0.40 y 1.5 metros, siendo su rendimiento óptimo cuando el flujo de agua es constante y se dirige mediante conductos bien diseñados hacia las paletas de la rueda (Cardona, 1985). La disposición de estas ruedas permite maximizar la captura de energía hidráulica, ya que el agua fluye de manera controlada hacia las paletas, como se muestra en la **Figura 2**.

Estudios realizados por J. Córdova (2019) y Jiménez (2020) indican que el diseño de los canales de alimentación es fundamental para optimizar el desempeño de estas ruedas. Al dirigir el agua a través de canales específicos, se mejora la eficiencia del sistema y se reduce la pérdida de energía. Estas ruedas han sido implementadas exitosamente en áreas rurales de América Latina, proporcionando una fuente de energía sostenible y de bajo mantenimiento en comunidades donde los recursos técnicos son limitados. Además, García (2021) destaca que su construcción con materiales locales no solo reduce costos, sino que también facilita el mantenimiento, permitiendo que las comunidades locales puedan llevar a cabo reparaciones básicas y prolongar la vida útil del sistema.

La selección de materiales y el diseño de las paletas y el eje central también son factores

clave en el rendimiento de estas ruedas. Según Álvarez (1985), un ángulo adecuado de las paletas y la orientación del flujo de agua hacia ellas pueden incrementar la eficiencia en más del 20 %, ya que se aprovecha al máximo la energía cinética del agua. Los estudios de García (2021) concluyen que la durabilidad de estos sistemas se puede mejorar con materiales anticorrosivos y con estructuras que resistan la exposición prolongada al agua, lo que es crucial en entornos rurales húmedos o en contacto constante con agua en movimiento.

Finalmente, estos sistemas de ruedas hidráulicas con canal de alimentación al nivel del eje no solo ofrecen una solución de generación de energía en pequeña escala, sino que también fomentan la sostenibilidad y el desarrollo comunitario al proporcionar un recurso energético renovable y accesible. Gracias a la simplicidad de su diseño, estas ruedas pueden ser adaptadas a diferentes configuraciones de flujo y altura de caída, lo que permite su implementación en una amplia variedad de contextos (S. López, 2020).

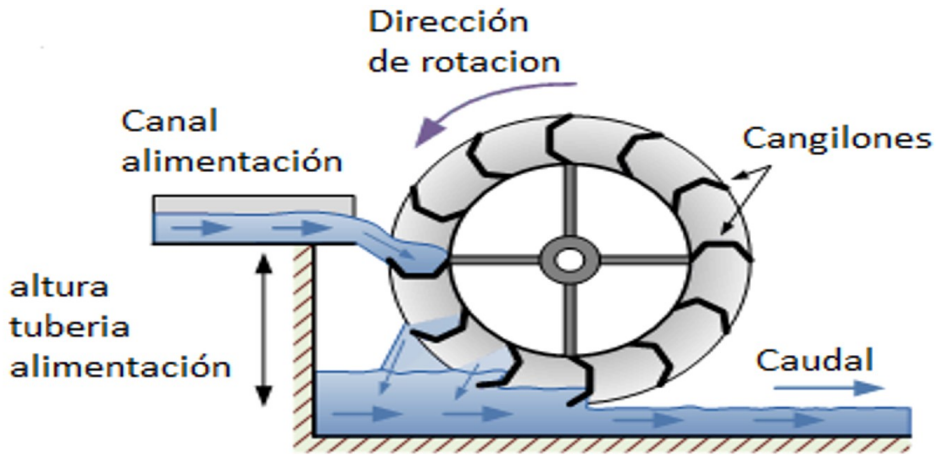


Figura 2. Rueda hidráulica de alimentación lateral

Fuente: Alternative (2013).

4.1.4 Rueda hidráulica con canal de alimentación inferior

Las **ruedas hidráulicas de admisión inferior** son un tipo de rueda que aprovecha el choque del agua que pasa por debajo de la rueda, como se muestra en la **Figura 3**. Este diseño se basa en la energía cinética generada por el agua al fluir bajo la rueda, impulsando su rotación. La eficiencia de estas ruedas hidráulicas oscila entre el 20 % y el 30 %, lo que refleja una conversión de energía notablemente eficaz para aplicaciones específicas, como se detalla en un estudio sobre hidroenergía directa (Decker, 2013).

Este tipo de rueda ha sido ampliamente estudiado a lo largo de la historia. Estudios más recientes como los de Sant'Angelo (1995), en su trabajo sobre técnicas y máquinas de

energía, destacan cómo la tecnología de la rueda hidráulica ha evolucionado, especialmente con la implementación de canales de alimentación inferior. Alternative (2013) enfatiza que este diseño ofrece ventajas significativas en términos de eficiencia al aprovechar mejor la fuerza del agua.

Por su parte, McBain (1911) profundiza en cómo el canal de alimentación inferior optimiza la distribución de agua, lo que mejora la estabilidad y el rendimiento de la rueda hidráulica. S. López (2020) resalta que las ruedas con alimentación inferior permiten un flujo de agua más constante, lo que aumenta la eficiencia del sistema en comparación con otros tipos de ruedas hidráulicas.

Además, Gault (1941) subraya la importancia del control del flujo de agua en el diseño de la rueda hidráulica con canal de alimentación inferior. Según Gault (1941), este tipo de diseño mejora la distribución de la energía, lo que resulta en un funcionamiento más eficiente y fácil de mantener.

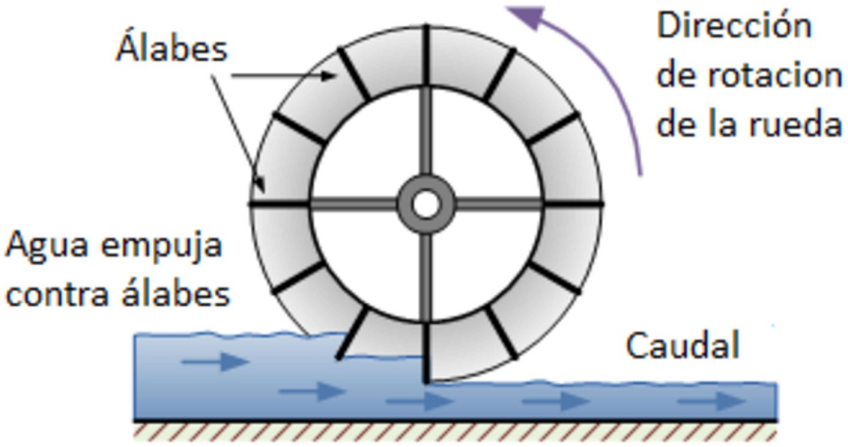


Figura 3. Rueda hidráulica de alimentación inferior

Fuente: Alternative (2013).

4.2 Capítulo 2

En este capítulo se aborda los fundamentos de las propiedades de los materiales y los métodos para analizar esfuerzos y deformaciones. Abordaremos conceptos como la elasticidad, la plasticidad y la dureza de los materiales. Además, contempla técnicas de análisis estructural que permiten evaluar el comportamiento de los materiales bajo fuerzas externas, incluyendo esfuerzos de tracción, compresión, flexión y torsión.

4.2.1 Comportamiento Elástico

En el campo de la ingeniería mecánica, la propiedad de elasticidad de un material desempeña un papel esencial. Esta característica asegura que las deformaciones sufridas por el material bajo la influencia de cargas sean temporales y completamente reversibles. Tal capacidad es de suma importancia en el proceso de diseño de estructuras sometidas a cargas que varían o se repiten a lo largo del tiempo, garantizando así su integridad y funcionamiento óptimo bajo condiciones dinámicas (Ane Miren García Romero, 2018).

4.2.2 Plasticidad

La plasticidad, aunque estrechamente relacionada con la elasticidad, se distingue por el comportamiento de los materiales bajo ciertas condiciones. En el caso de los materiales elásticos, estos tienen la capacidad de retornar a su forma original tras ser sometidos a deformaciones. Sin embargo, si la deformación excede un umbral específico, el material no podrá recuperar su forma inicial y, por ende, se considerará que ha adoptado una deformación plástica (J. R. López, 2013).

4.2.3 Dureza del material

Según Ortiz Domínguez (2017) es la capacidad que tienen los cuerpos a resistir la deformación, es fundamental para determinar su capacidad para resistir fuerzas externas sin sufrir deformaciones significativas.

Los métodos de medición de la dureza son:

- Dureza Rockwell
- Dureza Brinell
- Dureza Vickers

4.2.4 Análisis de Esfuerzos y Deformaciones

Este análisis es fundamental en el estudio de la resistencia de materiales y la mecánica estructural, permitiendo evaluar cómo las distintas cargas afectan a los elementos estructurales. Se examina cómo las fuerzas externas aplicadas inducen esfuerzos internos en los materiales, lo cual es crucial para entender su comportamiento bajo carga.

4.2.4.1 Esfuerzo de Tracción

Es la que se opone a una fuerza que tiende a estirar el cuerpo. Se produce sometiendo al cuerpo a dos cargas de igual dirección, sentido contrario y divergentes.

Coronel (2020) define la tracción como el esfuerzo al que está sometido un cuerpo por la aplicación de dos fuerzas que actúan en sentido opuesto, y tienden a estirarlo.

4.2.4.2 Esfuerzo de Compresión

Coronel (2020) lo define como el esfuerzo al que está sometido un cuerpo por la aplicación de fuerzas que actúan en el mismo sentido, y tienden a acortarlo. Es lo contrario a la tracción y hace que se aproximen las diferentes partículas de un material, tendiendo a producir acortamientos o aplastamientos.

4.2.4.3 Esfuerzo de flexión en la estructura

La flexión es una combinación de esfuerzos de compresión y de tracción. Mientras que las fibras superiores de la pieza están sometida a un esfuerzo de flexión (se alargan), las inferiores se acortan, o viceversa, produciendo una deformación a lo largo de su eje, que tiendan a doblarlo (Andrea Sosa, 2022).

4.2.4.4 Esfuerzo de torsión

Es la reacción interna que se presenta cuando se aplica un momento sobre el eje longitudinal de un elemento constructivo o prisma mecánico, como pueden ser ejes o elementos donde una dimensión predomina sobre las otras dos, aunque es posible encontrarla en situaciones diversas (Coronel, 2020).

4.2.5 Diagrama de cuerpo libre

Es una herramienta que permite analizar las fuerzas que actúan sobre un cuerpo mediante la representación esquemática del objeto aislado de su entorno, con todas las fuerzas externas e internas que actúan sobre él representadas por vectores, facilita la comprensión de cómo estas fuerzas influyen en el comportamiento del objeto.

4.2.5.1 Pasos para elaborar un Diagramas de Cuerpo Libre

Pinzón. (1977), afirma:

1. Identificar el cuerpo cuyo movimiento se va a considerar.

2. Tener clara la decisión en relación con la selección del cuerpo libre que será utilizado. Después se debe separar este del suelo (en caso de que esté sobre él) y de todos los demás cuerpos. De esta forma se realiza un esquema del contorno del cuerpo ya aislado.

3. Todas aquellas fuerzas externas, es decir, aquellas que representan acciones sobre el cuerpo libre ya sea por el suelo o por los otros cuerpos que han sido separados del mismo, deben indicarse en el DCL y deben representarse en el punto donde el cuerpo libre estaba apoyado en el suelo o estaba en contacto o conectado a otros cuerpos. Se deben incluir entre estas fuerzas externas el peso del cuerpo libre.

4. Se deben indicar las direcciones de las fuerzas, teniendo claro que estas son las ejercidas sobre y no por el cuerpo libre.

5. Las reacciones se ejercen en los puntos donde el cuerpo libre está apoyado o conectado o en contacto a otros cuerpos y debe indicarse con claridad.

6. Puede en algunos casos cuando se considere importante incluir, alguna dimensión; pero lo importante es no saturar el Diagrama de Cuerpo Libre con demasiada información que enrede la descripción del sistema.

4.2.6 Momento de Inercia

La inercia es una propiedad inherente de los materiales que les confiere resistencia ante cualquier fuerza que busque alterar su estado de equilibrio. Por tanto, el momento de inercia se refiere específicamente a la capacidad de resistencia de un objeto frente a la rotación. Este parámetro depende no solo de la masa del objeto, sino también de cómo esta masa se distribuye en relación con el eje de rotación.

4.3 Capítulo 3

En el presente apartado se considera proporcionar información sobre el factor de seguridad, la transmisión de potencia mediante ejes y engranajes, y la función y mantenimiento de rodamientos rígidos de bola.

4.3.1 Factor de seguridad

Se fundamenta en diversas incertidumbres que el diseñador debe considerar. Estas incluyen las propiedades de los materiales utilizados, las fluctuaciones en las cargas aplicadas, la consistencia en la calidad de fabricación, la precisión de los modelos matemáticos empleados, las implicaciones económicas de la implementación y los riesgos potenciales para la seguridad del personal (Budynas R., 2014).

4.3.2 Transmisión de potencia

Budynas R. (2014), define que la transmisión de potencia desde una fuente, tal como un mecanismo o un motor, a través de una máquina para tener un impulso de salida, es una de las tareas más comunes que se asignan a una maquinaria. Un medio eficiente para transmitir la potencia es a través del movimiento rotatorio de un eje, soportado por cojinetes. Se pueden incorporar engranes, bandas, poleas o catarinas (ruedas dentadas) de cadena a fin de proporcionar cambios de velocidad y par de torsión entre ejes. La mayoría de los ejes son cilíndricos (sólidos

o huecos) e incluyen diámetros de paso con hombros para alojar la posición y soporte de los cojinetes, engranes.

4.3.3 Ejes

Son elementos que sirven para transmitir potencia y en general se llaman árboles a los ejes sin carga torsional, la mayoría de los ejes están sometidos durante su trabajo a cargas combinadas de torsión, flexibilidad y cargas axiales. El diseño de ejes consiste básicamente en la determinación del diámetro adecuado del eje para asegurar la rigidez y resistencia satisfactoria cuando el eje transmite potencia en diferentes condiciones de carga y operación (Zapata., 2013).

Para calcular el diámetro mínimo del eje (D_{min}), utilizamos la siguiente fórmula:

$$\theta_{\text{min}} = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot \eta_s}{\pi \cdot G_{\text{mat}}} \cdot \sqrt{M_{\text{Fmax}}^2 + M_{\text{torsor}}^2}} \tag{1}$$

Donde:

- η_s: Coeficiente de seguridad
- G_{mat}: Módulo de elasticidad en cortadura del material del eje [Pa]
- M_{Fmax}: Momento flector máximo [Nm]
- M_{torsor}: Momento torsor máximo [Nm]

Esta fórmula combina el esfuerzo cortante máximo y los momentos flector y torsor máximos para determinar el diámetro mínimo requerido del eje, asegurando que el eje pueda soportar las cargas aplicadas con un coeficiente de seguridad adecuado.

4.3.4 Rodamientos rígidos de bola

Un rodamiento de bolas es un componente mecánico circular que facilita la conexión entre una parte rotativa y otra, generalmente estacionaria, dentro de una máquina. Su función principal es brindar soporte estructural a la parte giratoria, permitiendo su movimiento con una reducción considerable de la fricción generada por la rotación.

Dado que la suavidad de las pistas y de las bolas y su capacidad de rodar libremente es lo que permite que la rotación se produzca sin mucha fricción, no se debe permitir la entrada de residuos en la pista acanalada, donde podrían impedir que una bola ruede o causar arañazos o abolladuras, provocando el fallo del rodamiento. Por esta razón, la mayoría de los rodamientos de bolas se construyen con juntas o escudos que cierran el espacio ranurado entre las pistas del resto del entorno de la máquina (Kolstad, 2022).

4.4 Capítulo 4

Finalmente, el cuarto capítulo aborda los conceptos principales de la construcción del prototipo como lo es la soldadura. Destacando la soldadura por arco eléctrico como técnica versátil para la unión de componentes en fabricaciones complejas.

4.4.1 Procesos de construcciones

4.4.1.1 Procesos de soldadura

La soldadura representa un método de conformación metálica sumamente versátil, empleado cuando otros procedimientos resultan inaplicables. Este proceso se destaca en el ensamblaje de componentes de piezas complejas o instalaciones, ofreciendo una solución efectiva para la unión de partes de objetos metálicos.

Según Molera Solá (1992), la soldadura no solo se limita a la fabricación a gran escala, sino que también es particularmente útil para la creación de prototipos y la producción de pequeñas series, lo que subraya su flexibilidad y adaptabilidad en diversos contextos de manufactura y diseño.

4.4.1.1.1 Soldadura por arco eléctrico

La soldadura de arco manual, también conocida como soldadura de electrodo revestido, soldadura de varilla o soldadura de arco eléctrico, es uno de los métodos más antiguos y versátiles dentro de los procesos de soldadura por arco. Este proceso implica mantener un arco eléctrico entre la punta de un electrodo revestido y la pieza de trabajo.

A través de este arco, gotas de metal fundido son transferidas y forman un cordón de soldadura. Durante este proceso, la descomposición del revestimiento del electrodo genera un escudo protector de gases que protege la soldadura, mientras que el revestimiento fundente puede aportar elementos adicionales a la aleación. Además, la escoria resultante fluye sobre el cordón de soldadura, protegiendo la atmósfera durante su solidificación y ayudando a moldear la soldadura, lo cual es particularmente útil en posiciones de soldadura vertical y sobre cabeza. Es importante destacar que, tras la soldadura, se debe remover la escoria para completar el proceso (Naranjo C., 2015). La **Figura 4** representa de manera esquemática la operación de este proceso.

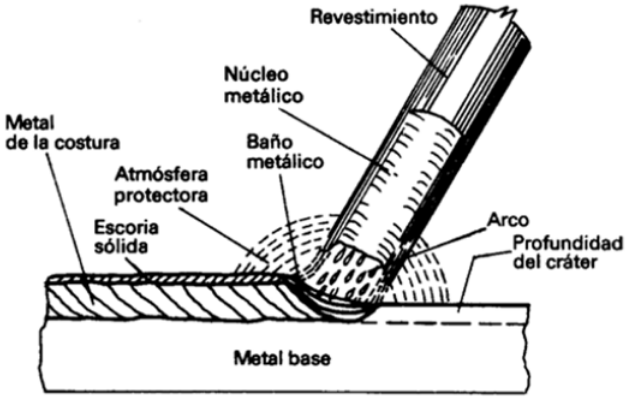


Figura 4. Diagrama esquemático de la soldadura con arco

Fuente: AlphaC (2023).

Hall et al. (2000) menciona que, hay muchos aspectos importantes de la soldadura que se deben considerar en el diseño de máquinas. El problema inmediato del diseñador es determinar la dimensión adecuada de la soldadura de una parte específica, lo cual implica un análisis de esfuerzos de las diferentes partes, en los puntos sometidos a cargas estáticas o fluctuantes. Se utilizarán los procedimientos recomendados por la American Welding Society (AWS) y las modificaciones hechas por la Lincoln Electric Company.

4.4.2 Freno de Prony

El freno de Prony es un dispositivo diseñado para absorber la energía del motor y convertirla en calor. Inventado en 1821 por el matemático e ingeniero francés Gaspard Clair François Marie Riche de Prony, originario de Chamelet, Beaujolais, Francia (Killedar, 2012), este tipo de freno se clasifica en función de su diseño.

Existen dos tipos principales de freno de Prony según el diseño. Uno de ellos es el sistema dinamométrico, que incluye un dinamómetro de fuerza al final del brazo. Este sistema puede tener una zapata externa hecha de materiales como madera, corcho u otros con un alto coeficiente de fricción, o una cincha de rozamiento. En contraste, algunos diseños emplean un sistema de pesas. Al añadir las pesas, se equilibra el sistema hasta detener el eje de potencia a medir. Sin embargo, este método puede presentar desventajas en términos de precisión, ya que equilibrar el sistema puede ser complicado.

Durante la medición con un freno de Prony en un sistema dinamométrico, el eje del motor se conecta a un volante que está siendo presionado por las zapatas para frenar el motor. Cuando el motor se detiene, el dinamómetro registra un valor de fuerza. Este valor es fundamental para calcular el torque y la potencia del motor. Para realizar estos cálculos de manera correcta, es esencial entender los conceptos de torque y potencia.

4.4.2.1 Diseño y Componentes del Freno de Prony

El freno de Prony es un dispositivo mecánico sencillo pero efectivo para medir la potencia de ejes rotativos, como motores y generadores. Su diseño básico se compone de varios elementos esenciales, cada uno diseñado para cumplir una función específica que garantiza la precisión y durabilidad del sistema durante su operación. Según De Prony (1821), el principio central de este dispositivo es convertir la energía mecánica en calor mediante fricción, un enfoque que ha demostrado ser eficiente y práctico en diversas aplicaciones.

Uno de los componentes más importantes son las zapatas o mordazas de fricción, las cuales se colocan alrededor del eje giratorio, como se muestra en la **Figura 5**. Estas zapatas generan una fuerza de fricción controlada que frena el movimiento del eje y produce el torque necesario para los cálculos de potencia. De acuerdo con Cengel y Boles (2006), los materiales utilizados para las zapatas, como acero o compuestos resistentes al desgaste, son seleccionados cuidadosamente para minimizar el deterioro y soportar condiciones de alta fricción.

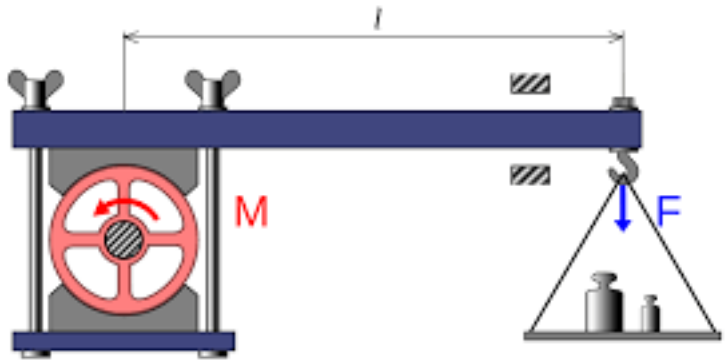


Figura 5. Diagrama esquemático del freno de prony

Fuente: Johnson (2020).

El sistema de regulación de la fuerza de fricción incluye tornillos de ajuste que permiten variar la presión aplicada por las zapatas sobre el eje. Esto asegura que el freno pueda adaptarse a diferentes niveles de potencia y velocidad angular, como señalan Beer y Johnston (2012). El ajuste preciso de estos tornillos es crucial no solo para evitar el sobrecalentamiento del sistema, sino también para garantizar la fiabilidad de las mediciones obtenidas.

Otro componente clave es el brazo de palanca, una barra rígida que conecta las zapatas de fricción con el sistema de medición. La longitud del brazo, según (Cengel & Boles, 2006), influye directamente en el cálculo del torque, ya que este se determina mediante la fuerza de fricción multiplicada por la longitud del brazo. Este elemento es esencial para transmitir el

torque generado al punto de medición con precisión.

Finalmente, el torque se mide mediante el uso de pesas calibradas o un dinamómetro colocado en el extremo del brazo de palanca. De Prony (1821) explica que el equilibrio logrado entre el torque generado por la fricción y la fuerza medida por el dinamómetro permite calcular la potencia con gran exactitud. Las pesas se colocan estratégicamente en el brazo de palanca, mientras que el dinamómetro mide la fuerza de manera directa, simplificando los cálculos.

El diseño del freno de Prony, tal como se describe en las investigaciones de Dorf y Bishop (2011), está concebido para ser modular y adaptable a diferentes necesidades experimentales e industriales. Aunque sus principios básicos permanecen constantes, los materiales y configuraciones pueden variar según la aplicación, asegurando que el dispositivo sea tanto funcional como eficiente.

4.4.2.2 Ventajas del Freno de Prony

Magazine (2024) menciona que el freno de Prony presenta diversas ventajas que lo hacen ideal para proyectos experimentales y de bajo costo:

1. **Simplicidad**: su diseño no requiere componentes electrónicos ni calibraciones complejas.
2. **Bajo costo**: los materiales necesarios, como madera, cuero y pernos, son accesibles y económicos.
3. **Adaptabilidad**: puede ajustarse para probar motores de diferentes tamaños y potencias.
4. **Versatilidad**: se emplea en aplicaciones experimentales, educativas y prácticas para evaluar motores y sistemas mecánicos.
5. **Portabilidad**: su diseño compacto permite transportarlo fácilmente entre laboratorios o bancos de prueba.
6. **Mediciones directas**: proporciona una forma sencilla de calcular torque y potencia sin necesidad de sensores avanzados.
7. **Durabilidad**: con el mantenimiento adecuado, puede operar eficientemente durante largos períodos.

4.4.2.3 Limitaciones del Freno de Prony

Magazine (2024) explica que pese a sus ventajas, este dispositivo también tiene limitaciones importantes:

1. **Generación de calor**: la fricción constante genera acumulación de calor, lo que puede afectar el rendimiento y dañar los componentes.

2. **Pérdida de precisión**: el desgaste de los materiales de fricción puede alterar la uniformidad de las mediciones con el tiempo.

3. **Limitación de potencia**: no es adecuado para probar motores de alta potencia debido a restricciones en la capacidad de disipación de calor.

4. **Mantenimiento constante**: requiere ajustes frecuentes para asegurar que las mediciones sean precisas y consistentes.

5. **Desgaste de componentes**: las bandas de fricción, generalmente de cuero o goma, deben reemplazarse periódicamente.

6. **Limitación de escalabilidad**: en aplicaciones industriales o de gran escala, su uso es poco práctico debido a la falta de automatización y precisión avanzada.

4.4.3 Frenos de Zapata Corta

Los frenos de zapata corta son dispositivos utilizados para medir el torque en sistemas mecánicos mediante la aplicación de fricción en una superficie reducida. Según Shigley y Budynas (2011), los frenos de zapata corta aplican una fuerza de fricción sobre una superficie limitada para resistir el movimiento rotacional, lo que permite la medición precisa del torque generado por el motor. Este tipo de freno es especialmente útil en situaciones donde se requiere una medición rápida y exacta del rendimiento del motor.

El diseño de los frenos de zapata corta es un factor clave en su eficacia. Kumar y Bansal (2017) destacan que el tamaño reducido de la zapata y el material con alto coeficiente de fricción, como corcho o madera, son factores determinantes en la eficacia del freno. Estos aspectos son fundamentales para garantizar que el freno pueda generar la resistencia necesaria para mediciones precisas.

Sin embargo, el uso de frenos de zapata corta también presenta ciertos desafíos. y K. Reavell (2004) señalan que uno de los principales desafíos de estos frenos es la dificultad para equilibrar el sistema, lo cual puede afectar la exactitud de las mediciones. A pesar de estos problemas, los frenos de zapata corta son ampliamente utilizados debido a su capacidad para proporcionar datos precisos con mínima variabilidad (y K. Reavell, 2004).

4.4.4 Diseño mecánico de ruedas hidráulicas

4.4.4.1 Número de cangilones

Según Eras (2004), para determinar el número de cangilones en una rueda hidráulica se considera el diámetro de la rueda la distancia especificada entre ellos.

$$N_{\text{cangilones}} = \frac{2\pi r}{S} \tag{2}$$

Donde:

- $N_{\text{cangilones}}$: Número de cangilones
- r: Radio de la rueda [m]
- S: Distancia entre cangilones [m]

4.4.4.2 Volantes

Según Hall et al. (2000), los volantes son dispositivos empleados para controlar la variación de velocidad de una máquina; la diferencia entre unos y otros es que los volantes distribuyen la energía dentro de un ciclo para controlar la velocidad, mientras que los reguladores controlan la cantidad de combustible que llega a una máquina, para igualar los requerimientos de carga y mantener una velocidad específica.

Si imaginamos que un regulador funciona en una posición fija, entonces la función del volante es limitar la variación de velocidad. Si los requerimientos exteriores de carga son constantes y la potencia de entrada también es constante, no se necesita volante. Si la potencia de entrada es variable y los requerimientos exteriores de carga son constantes, se puede utilizar un volante para aumentar la uniformidad del funcionamiento; de igual forma, si la potencia de entrada es constante y los requerimientos exteriores de carga son variables, se puede utilizar un volante para aumentar la uniformidad del funcionamiento.

4.4.4.2.1 Volante de Disco Sólido

El peso de un volante de disco sólido puede determinarse por una de las siguientes formas equivalentes:

$$W = \frac{2gE}{V_m^2\delta} = \frac{4gE}{V_{1o}^2 - V_{2o}^2} = \frac{4gE}{r_o^2(\omega_1^2 - \omega_2^2)} \tag{3}$$

Donde:

- W: Peso del volante [lb]

- g: $32{,}2$ [p/seg^2]
- E: Energía que se debe suministrar al volante [lb-p]
- V_m: Velocidad media de un punto situado en el radio exterior del volante
- δ: Coeficiente de fluctuación de velocidad

$$\delta = \frac{(V_{1o} - V_{2o})}{V_m} = \frac{(\omega_1 - \omega_2)}{\omega}$$

- V_{1o}: Velocidad máxima de un punto situado en el radio exterior del volante [p/seg]
- V_{2o}: Velocidad mínima de un punto situado en el radio exterior del volante [p/seg]
- r_o: Radio exterior del volante
- ω_1: Velocidad angular máxima del volante [rad/seg]
- ω_2: Velocidad angular mínima del volante [rad/seg]
- ω: Velocidad angular media del volante [rad/seg]

4.4.4.2.2 Esfuerzos en los Volantes

Los esfuerzos producidos en la llanta de un volante se pueden aproximar a los esfuerzos producidos en un anillo que gira libremente. El efecto de los rayos se desprecia y únicamente se considera el esfuerzo debido a la carga de inercia.

1. Considérese medio anillo aislado, la masa diferencial dM es:

$$dM = \frac{r(d\theta)tb\rho}{g} \tag{4}$$

Donde:

- r: Radio medio [in].
- $d\theta$: Ángulo diferencial subtendido por la masa diferencial, en radianes.
- t: Espesor de la llanta [in]
- b: Ancho de la llanta [in]
- ρ: Peso específico [lb/in^3]
- g: Aceleración debido a la gravedad, 386 [in/seg^2]

2. Carga diferencial de inercia

$$f = \text{masa} \times \text{aceleración} \tag{5}$$

$$f = \frac{r(d\theta)tb\rho}{g}(r\omega^2) \tag{6}$$

Donde:

- ω: Velocidad angular [rad/seg]

3. Suponiendo que el esfuerzo de tensión s_t (psi) está uniformemente distribuido a través de toda la sección:

$$2F = 2(s_t tb) = \frac{r^2 tb\rho\omega^2}{g} \tag{7}$$

o

$$s_t = \frac{r^2\rho\omega^2}{g} = \frac{\rho v^2}{g} \tag{8}$$

Donde:

- $v = r \cdot \omega$: Velocidad [pul/seg] en el radio medio.

4.4.4.2.3 Esfuerzo máximo de tensión

Timoshenko (2004) dedujo una ecuación que tiene en cuenta la fuerza axial en los rayos, la flexión y el esfuerzo normal; la cual obtuvo considerando la llanta como un anillo delgado, despreciando la curvatura de la llanta y utilizando el signo que dé el mayor valor de $\frac{P}{A} + \frac{Mc}{I}$.

$$s_t = \frac{qv^2}{btg}\left[1 - \frac{\cos\phi}{3C\sin\alpha} \pm \frac{2r}{Ct}\left(\frac{1}{\alpha} - \frac{\cos\phi}{\sin\alpha}\right)\right] \tag{9}$$

Donde:

- s_t: Esfuerzo de tensión [psi]
- q: Peso de la llanta por pulgada de longitud, bt [lb/pul]
- v: Velocidad en el radio medio [pul/seg]
- b: Ancho de la llanta [pul]
- t: Espesor de la llanta [pul]
- g: 386 [pul/seg^2]
- ϕ: Ángulo subtendido desde la línea media entre los rayos hasta la sección donde se encuentra el esfuerzo
- 2α: Ángulo entre dos rayos
- r: Radio medio de la llanta [pul]

- C: Constante que depende del área de la sección transversal de la llanta, del área de la sección transversal de un rayo, de las proporciones de la llanta y del ángulo entre rayos

$$C = \frac{12r^2}{t^2}\left(\frac{1}{\sin^2\alpha}\left(\frac{\sin 2\alpha}{4} + \frac{\alpha}{2}\right) - \frac{1}{2\alpha}\right) + \frac{1}{\sin^2\alpha}\left(\frac{\sin 2\alpha}{4} + \frac{\alpha}{2}\right)\frac{A}{A_1} \tag{10}$$

Donde:

- C: Constante.
- A: Área de la sección transversal de la llanta, bt.
- A_1: Área de la sección transversal de un rayo.

Los valores numéricos de C para diferentes números de rayos (para simplificar la aritmética) son

- 4 rayos $(2\alpha = 90°)$: $C = \frac{12r^2}{t^2}(0{,}00608) + 0{,}643 + \frac{A}{A_1}$
- 6 rayos $(2\alpha = 60°)$: $C = \frac{12r^2}{t^2}(0{,}00169) + 0{,}957 + \frac{A}{A_1}$
- 8 rayos $(2\alpha = 45°)$: $C = \frac{12r^2}{t^2}(0{,}00076) + 1{,}274 + \frac{A}{A_1}$

La fuerza axial en cada rayo es $F = \frac{2qv^2}{3gC}$ lb.

4.4.4.2.4 Torque

Desde un análisis estático el torque es el producto de la relación entre la fuerza y el brazo o radio, la que es perpendicular a la fuerza.

$$\tau = F \cdot r \tag{11}$$

Donde:

- τ: Torque [Kg·m]
- F: Fuerza [Kg]
- r: Brazo o radio [m]

El torque máximo se lo determina sumando los torque unitarios como se muestra en la ecuación siguiente:

$$\tau_{máx.} = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \cdots + \tau_n \tag{12}$$

La fuerza producida por el peso del fluido se calcula con la ecuación siguiente:

$$F_f = \frac{m \cdot {v_r}^2}{2e} \tag{13}$$

Donde:

- F_f: Fuerza [Kgf]
- m: Masa del fluido [Kg]
- v_r: Velocidad $\left[\frac{m}{s}\right]$
- e: Espacio o arco recorrido [m]

Para el espacio o arco recorrido se utiliza la siguiente relación:

$$e = P \cdot \frac{\alpha}{2\pi} \tag{14}$$

Donde:

- α: Ángulo recorrido
- P: Perímetro [m]

Para el calculo de la velocidad de escape:

$$v = \sqrt{2 \cdot 9{,}8 \cdot e} \tag{15}$$

Donde:

- e: Espacio de arco recorrido [m]

Para el cálculo de la velocidad angular:

$$\omega = \frac{v}{r} \tag{16}$$

Donde:

- e: Espacio de arco recorrido [m]
- r: Radio [m]

La fuerza de inercia, es decir la producida por el cuerpo:

$$F_i = W \cdot cf \tag{17}$$

Donde:

- cf: Coeficiente de fricción de los rozamientos
- W: Peso [Kgf]

La fuerza produce un movimiento que se expresa en velocidad de giro de la rueda y se establece así:

$$v = \sqrt{\frac{(F \cdot 2e)}{M}} \tag{18}$$

Donde:

- v: Velocidad de giro de la rueda $[\frac{m}{s}]$
- F: Fuerza [Kgf]
- e: Espacio [m]
- M: Masa [Kg]

Para determinar el torque desde el punto de vista cinético utilizamos la siguiente expresión.

$$\tau_{\text{Cinética}} = \frac{\delta \cdot A \cdot {v_{\text{fluido}}}^2 \cdot r_{\text{medio}}}{2} \tag{19}$$

Donde:

- $\tau_{\text{Cinética}}$: Torque desde el punto de vista cinético $[kg \cdot m]$
- δ: Densidad del fluido $[\frac{Kg}{m^3}]$
- A: Área o sección [m]
- v_{fluido}: Velocidad del fluido $[\frac{m}{s}]$
- r_{medio}: Radio medio [m]

4.4.4.2.5 Potencia

La potencia es la relación entre el torque y la velocidad angular.

$$\text{Pot} = \tau \cdot \omega \tag{20}$$

Donde:

- Pot: Potencia [W]
- τ: Torque [$kg \cdot m$]
- ω: Velocidad angular [rad/s]

5. Metodología

5.1 Equipos y materiales de oficina

- Computadora
- Libros de diseño y construcción de máquinas y resistencia de los materiales

5.2 Software y herramientas de computador

- Paquete de Microsoft Office
- AutoCAD 2025 (versión estudiantil)
- Software de modelado 3D
- Xflow (versión estudiantil)

5.3 Equipos de construcción mecánica

- Torno
- Soldadora eléctrica
- Taladro manual y de pedestal
- Amalodora
- Esmeril
- Machuelo
- Escuadra
- Calibrador
- Destornilladores
- Juego de hexágonos

5.4 Proceso metodológico

Para el adecuado diseñó del prototipo rueda hidráulica con cangilones articulados se estructuró y cumplió con la siguiente metodología:

Búsqueda de información: Para la conceptualización de la rueda hidráulica y la identificación de los parámetros influyentes en su diseño y funcionamiento, se realizó una búsqueda exhaustiva en el repositorio digital de la Universidad Nacional de Loja, así como en artículos, manuales, fichas técnicas y tesis.

Reconocimiento de la clasificación de las ruedas según la entrada del agua: Se realizó un estudio utilizando fichas técnicas y manuales de diversas ruedas hidráulicas. Este análisis incluyó la identificación y comparación de las diferentes configuraciones de entrada de agua, tales como ruedas por encima con admisión superior (overshot), ruedas de costado con admisión intermedia (breastshot) y ruedas por debajo con admisión inferior (undershot).

Definición de sistemas y componentes principales de la rueda: Se identifican y describen los sistemas y componentes principales necesarios para el funcionamiento de la rueda hidráulica con cangilones articulados. Estos incluyen el eje principal que soporta y transmite el torque, los cangilones articulados que capturan y vacían el agua, la estructura de soporte que asegura estabilidad y el sistema de articulación que optimiza la eficiencia de captura y vaciado.

Diseño conceptual del prototipo: Se desarrolla un diseño conceptual basado en ruedas hidráulicas análogas existentes, incluyendo bocetos y diagramas que muestran la disposición de los componentes y el funcionamiento básico del prototipo. Este diseño inicial sirve como base para futuras iteraciones y mejoras durante el desarrollo del prototipo.

Fase experimental para definir los parámetros de operación: Se realizan experimentos para optimizar los parámetros operacionales del prototipo, tales como el ángulo de inclinación de los cangilones, la frecuencia de articulación, la velocidad de rotación de la rueda y la altura de caída del agua.

Diseño del prototipo final: Se presenta el diseño final de la rueda hidráulica, incluyendo todos los sistemas y componentes importantes. Se ofrece una explicación técnica detallada y se realiza una demostración física del prototipo, mostrando su funcionamiento y destacando las mejoras implementadas a lo largo del proceso de desarrollo.

Construcción de una rueda hidráulica de igual geometría: Se procede a diseñar y fabricar una rueda hidráulica con la misma geometría que la original, pero sin cangilones articulados. Este modelo servirá como base de comparación para evaluar las diferencias en ren-

dimiento, eficiencia, entre otros parámetros. La rueda será construida utilizando los mismos materiales y procesos, asegurando que cualquier diferencia observada sea resultado del diseño de los cangilones articulados.

Comparación entre las dos ruedas: Se realiza una comparación entre la rueda hidráulica con cangilones articulados y la rueda con geometría igual pero con cangilones fijos. Los criterios de comparación incluyen el torque generado por cada rueda, capacidad de manejo de caudales, durabilidad, costos de fabricación, y facilidad de instalación. Los resultados de esta comparación se utilizan para validar las ventajas del diseño con cangilones articulados y para identificar posibles mejoras en ambos prototipos.

Análisis de Costos del Prototipo Final: Aquí se realiza un análisis de los costos involucrados en la fabricación del prototipo, incluyendo materiales, piezas y procesos constructivos. Este análisis permite estimar el precio final del dispositivo.

El procedimiento metodológico que se siguió en este trabajo de titulación se muestra en el flujograma de la **Figura 6**.

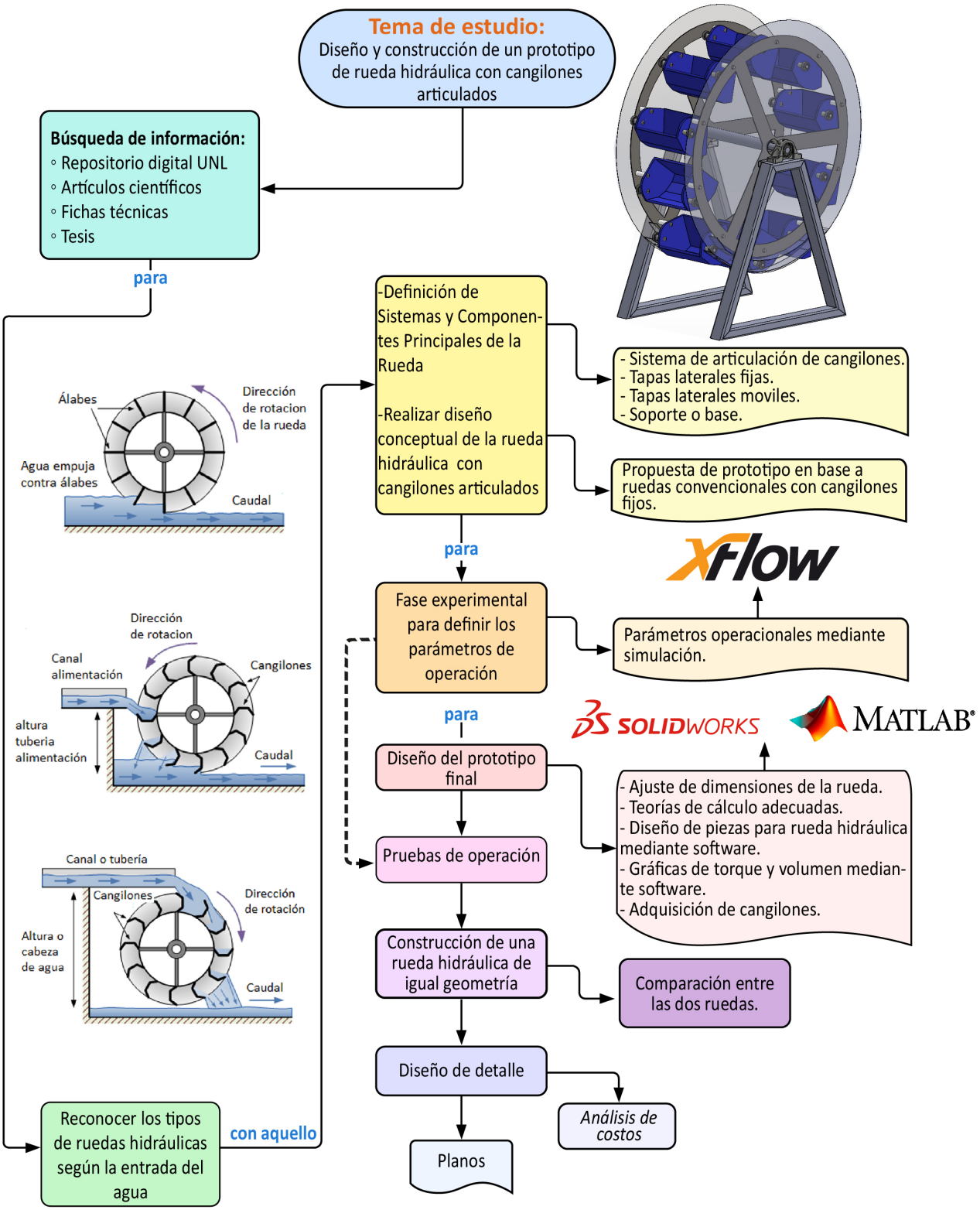


Figura 6. Flujograma para el desarrollo del trabajo de titulación.

6. Resultados

6.1 Diseño Conceptual de banco de pruebas para ruedas hidráulicas

La **Figura 7** muestra un banco de pruebas destinado a analizar el rendimiento de ruedas hidráulicas. La configuración permite estudiar el comportamiento de la rueda bajo distintos caudales, aprovechando el flujo de agua recirculado mediante una bomba.

En primer lugar, el tanque superior actúa como el depósito principal donde se acumula el agua antes de ser liberada para accionar la rueda hidráulica. Este tanque se sitúa en una posición elevada para generar una caída de agua que aproveche la gravedad, permitiendo un impacto controlado sobre la rueda.

Para controlar el movimiento de la rueda, el sistema cuenta con un freno de zapata corta. Este freno permite aplicar resistencia adicional a la rueda, regulando su velocidad o incluso deteniéndola por completo. Esto es esencial para evaluar el torque de la rueda y por ende la potencia de la misma.

El tanque inferior recoge el agua que ha pasado por la rueda hidráulica. Funciona como un depósito temporal donde el agua se acumula antes de ser recirculada nuevamente hacia el tanque superior, cerrando así el circuito.

Finalmente, la bomba es el componente que impulsa el agua desde el tanque inferior hasta el tanque superior. Al ser un sistema de recirculación, esta bomba permite que el flujo de agua sea continuo.

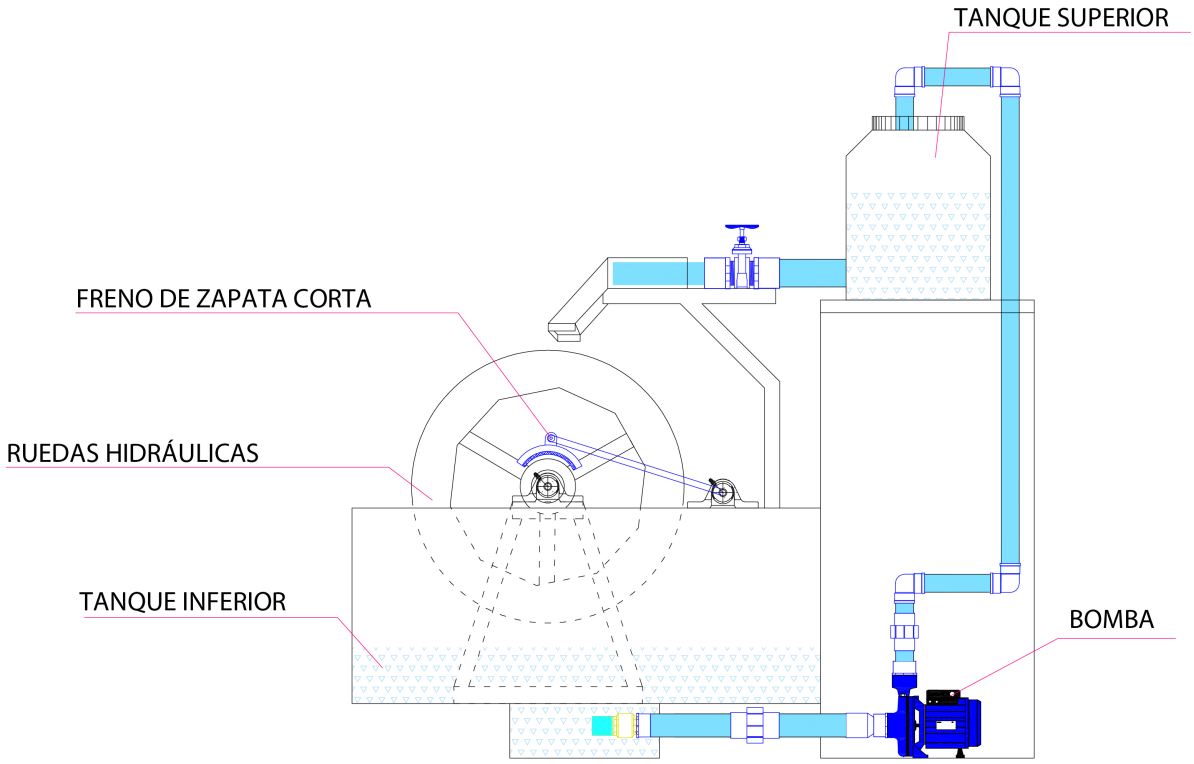


Figura 7. Banco de pruebas para ruedas hidráulicas

El objetivo principal de este estudio es diseñar, construir y comparar un prototipo de una rueda hidráulica tipo overshot con cangilones articulados, en contraste con una rueda hidráulica convencional. Este diseño busca mejorar la retención y maximiza el aprovechamiento del agua. A continuación, se procede con el desarrollo detallado del diseño del prototipo.

6.2 Diseño de la rueda Hidráulica con cangilones articulados

6.2.1 Diseño conceptual de la rueda

La **Figura 8** muestra el diseño conceptual de una rueda hidráulica con cangilones articulados, los componentes principales son los siguientes:

- **Rodamientos**: Estos elementos están ubicados en los cangilones y permiten un movimiento de los mismo controlando el contacto con el riel de vaciado, facilitando la descarga completa del agua de los cangilones.
- **Eje**: Es la estructura central que sostiene la rueda y transmite el movimiento generado por la fuerza del agua sobre los cangilones. Su diseño está pensado para soportar las cargas y torsiones del sistema.

- **Chumaceras**: Sostienen el eje y proporcionan estabilidad al conjunto. Estas piezas aseguran que el eje se mantenga en la posición adecuada y minimizan el desgaste debido al movimiento rotatorio.
- **Acoples**: Conectan la tapa móvil con los cangilones y también sostienen los rodamientos en estos últimos, permitiendo la interacción necesaria para el vaciado de los cangilones cuando entran en contacto con el riel.
- **Cangilones**: Son los recipientes encargados de retener el agua. A medida que los cangilones se desplazan, el riel de vaciado en la parte inferior de la rueda guía su trayecto, inclinándolos para vaciar completamente el agua y permitir que continúen su ciclo de retención.
- **Tapa Móvil**: Esta tapa se mueve en sincronía con los cangilones. Facilita el acceso a los componentes internos y ayuda a mantener la estructura en su posición.
- **Tapa Fija**: Aporta rigidez a la estructura general de la rueda, brindando estabilidad al sistema.
- **Riel de Vaciado**: Ubicado en la parte inferior, este riel guía el trayecto de los cangilones, inclinándolos para vaciar todo el contenido de agua antes de que continúen su ciclo y vuelvan a llenarse.
- **Soportes**: Sostienen la rueda, garantizando su alineación y estabilidad durante el recorrido.

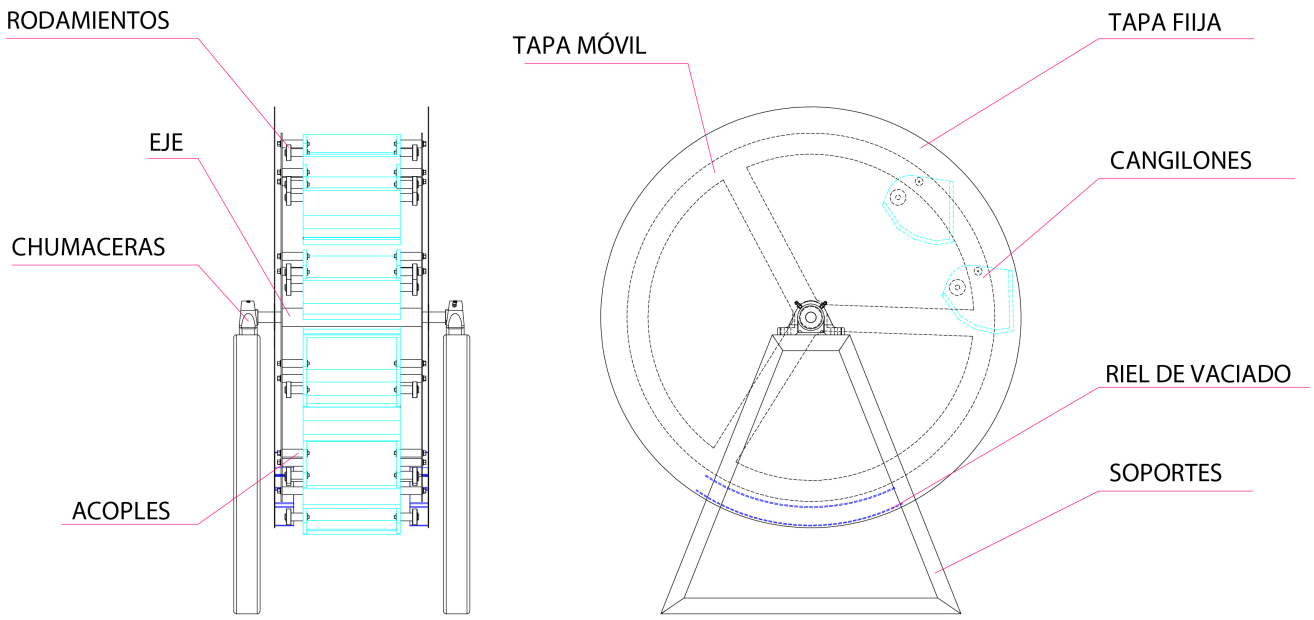


Figura 8. Diseño conceptual de la rueda

6.2.2 Diseño geométrico de la rueda

En esta sección se presentan los datos obtenidos del proceso de diseño de la rueda hidráulica overshot con cangilones articulados. Se incluyen detalles sobre las dimensiones finales, el número de cangilones, los materiales seleccionados y los resultados de las simulaciones.

6.2.2.1 Diámetro de la rueda

En proyectos anteriores realizados en la Universidad Nacional de Loja, se han recopilado datos valiosos sobre las dimensiones adecuadas de ruedas hidráulicas para diversas aplicaciones.

Se seleccionó un diámetro de 0.80 metros, este diámetro fue elegido después de analizar la disposición y el espacio necesario para que cada cangilón realice el vaciado de agua de manera adecuada sin entrar en contacto con los demás. Al ser móviles, los cangilones requieren una separación para evitar colisiones durante el proceso de vaciado, lo cual podría afectar tanto la eficiencia del sistema como la integridad estructural de los componentes.

6.2.2.2 Número de cangilones

Para determinar el número de cangilones en una rueda hidráulica con un radio de 0.40 metros y una distancia entre cangilones de 0.25 metros, se utiliza la ecuación (2).

$$N_{cangilones} = \frac{2\pi * 0{,}40m}{0{,}25}$$

$$N_{cangilones} = \mathbf{10{,}05}$$

$\therefore$ tenemos un total de 10 cangilones

6.2.2.3 Análisis de velocidad angular de la rueda hidráulica

El estudio de la velocidad angular se lleva a cabo considerando la caída libre de un objeto. Esto incluye el arco que se forma desde el punto de inicio del llenado hasta el punto de descarga ver **Figura 9**.

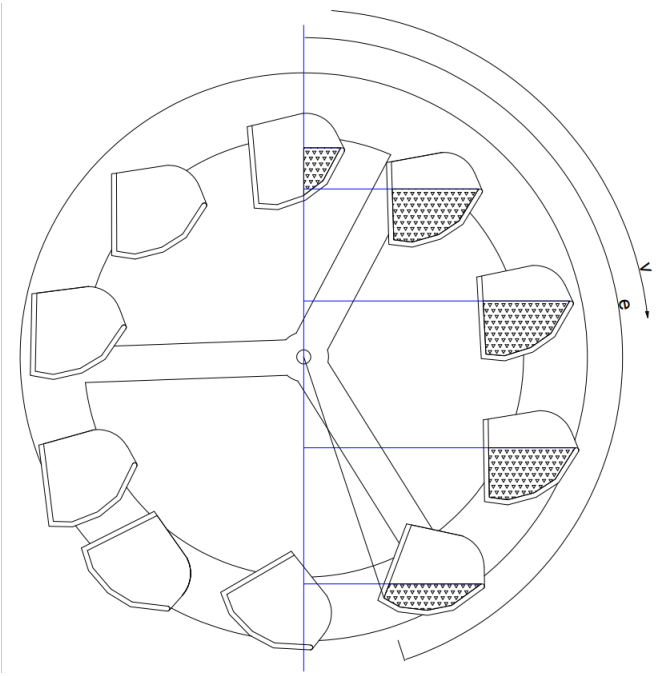


Figura 9. Carga y descarga en la rueda

6.2.2.4 Cálculo del arco recorrido por el cangilón

Para determinar el arco de recorrido del cangilón se utiliza la ecuación (21).

$$P = \pi * 0{,}80\ m = \mathbf{2{,}5132\ m} \tag{21}$$

Espacio de arco

La distancia o arco recorrido se calcula utilizando la ecuación (14), en la que $\alpha = 162°$ representa el ángulo que un recipiente recorre desde el momento de su llenado hasta el de su vaciado véase **Figura 9**.

$$e = 2{,}5132 * \frac{162}{360} = \mathbf{1{,}131\ m}$$

Velocidad tangencial o de escape con la ecuación (15).

$$v = \sqrt{2 * 9{,}8 * 1{,}131} = \mathbf{4{,}708\ \frac{m}{s}}$$

Velocidad angular w con la ecuación (16).

$$w = \frac{4{,}708\ \frac{m}{s}}{0{,}40m} = \mathbf{11{,}77\ \frac{rad}{s}}$$

Transformando

$$N = w * \frac{60\ s}{1\ min} * \frac{1\ rev}{2\pi} \tag{22}$$

$\therefore$ la velocidad de giro de la rueda hidráulica es $112{,}39\ \frac{rev}{min}$

Fuerza producida por un cangilón se determina con la ecuación (13).

$$Fc = \frac{1{,}1814\ kg * 4{,}708\frac{m^2}{s}}{2(1{,}131\ m)} = \mathbf{11{,}57\ N}\ \approx\ \mathbf{1{,}18\ kgf}$$

Fuerza necesaria para producir el movimiento en la rueda hidráulica con cangilones articulados se la calcula con la ecuación (17).

Si:

- $cf\ =\ 0{,}05$
- $21{,}35\ kg \rightarrow$ peso estimado de la rueda

Entonces:

$$F_i = 21{,}35\ kgf * 0{,}05 = \mathbf{1{,}0675\ kgf}\ \approx\ \mathbf{10{,}4686\ N}$$

Fuerza real que actúa para iniciar el movimiento de la rueda hidráulica con cangilones articulados se la calcula con la ecuación (23).

$$F_R = F_{cangilón} - F_{inercia} \tag{23}$$

$$F_R = 11{,}57\ N - 10{,}4686\ N$$

$$F_R = \mathbf{1{,}1014\ N}$$

Con la fuerza real, podemos calcular la velocidad de rotación efectiva de la rueda hidráulica utilizando la ecuación (18).

$$V_r = \sqrt{\frac{1{,}1014\frac{kgm^2}{s^2} * 2 * 1{,}131m}{1{,}1814\ kg}} = \mathbf{1{,}45\ \frac{m}{s}}$$

Transformando:

$$N_R = \mathbf{34{,}56}\ \frac{\mathbf{rev}}{\mathbf{min}}$$

6.2.2.5 Caudal para accionamiento de la rueda hidráulica

Se determinó el caudal máximo que la rueda puede manejar basándose en dos factores: la capacidad de retención de agua del cangilón en su máxima capacidad y las revoluciones a las que gira la rueda hidráulica.

La ecuación (24) para calcular el número de cangilones por minuto y basado en el número total de cangilones N y la frecuencia n con la que cada cangilón pasa por la misma posición en un minuto se expresa como:

$$Y = n \times N_{Cangilones} \tag{24}$$

Donde:

- Y: Número de cangilones por minuto.
- n: Número de veces por las que el cangilón pasa por la misma posición durante 1 minuto.
- $N_{Cangilones}$: Número total de cangilones que están siendo transportados.

Por lo tanto:

$$Y = 34{,}56 \times 10 = \mathbf{345{,}6\ cangilones/min}$$

Se determinó que se deben llenar 346 cangilones, cada uno con un volumen de 1645.2 cm^3, en el transcurso de un minuto.

Para calcular el caudal Q, que es el volumen total transportado por unidad de tiempo, se utiliza la ecuación (25).

$$Q = Y \times V \tag{25}$$

Donde:

- Q es el caudal.
- Y es el número de cangilones por minuto.
- V es el volumen transportado por cada cangilón.

Por lo tanto

$$Q = \frac{346}{1\ min} \times 0{,}0016452\ m^3$$

$$Q = \mathbf{0{,}57}\frac{\mathbf{m^3}}{\mathbf{min}}$$

$\therefore$ Se obtiene un caudal promedio de $0{,}0095\ m^3/s$ que correspondería a $9{,}5\ l/s$.

La tabla **Tabla 1** muestra cómo se ajusta el volumen V de cada cangilón de manera uniforme para reducir el caudal Q.

Tabla 1. Ajuste de volumen y caudal para alcanzar un caudal cercano a 20 litros/min

Caudal ajustado con decremento de volumen			
Iteración	V ($\mathbf{m}^3$)	$Q\ \left(\frac{\mathbf{m}^3}{\mathbf{min}}\right)$	Q (**l/min**)
1	0.0016452	0.57	570
2	0.0014	0.48	480
3	0.00115	0.40	400
4	0.0009	0.31	310
5	0.00065	0.23	230
6	0.0004	0.14	140
7	0.00035	0.12	120
8	0.0003	0.10	100
9	0.00025	0.0865	86.5
10	0.0002	0.069	69
11	0.00015	0.0519	51.9
12	0.0001	0.0346	34.6
13	0.000058	0.0200	20.0

$\therefore$ Se obtiene un caudal promedio de $0{,}0200\ m^3/s$ que correspondería a $20{,}0\ l/min$.

Una vez que hemos calculado la velocidad de rotación de la rueda hidráulica y el caudal, se procede a determinar el torque de accionamiento.

6.2.2.6 Torque máximo

La rueda con cangilones articulados con un diámetro de 0.80 m y armada con 10 cangilones mismos que tienen una capacidad de 1.2421 litros de agua. Por lo que se requiere conocer la cantidad de agua en cada cangilón durante la rotación, así como la fuerza de impacto del agua en cada cangilón, que se deriva de la energía cinética del fluido.

Al momento en que la rueda entre en funcionamiento, en la **Figura 10** se muestra el área y el volumen de agua contenido en cada cangilón con respecto al centro de la rueda.

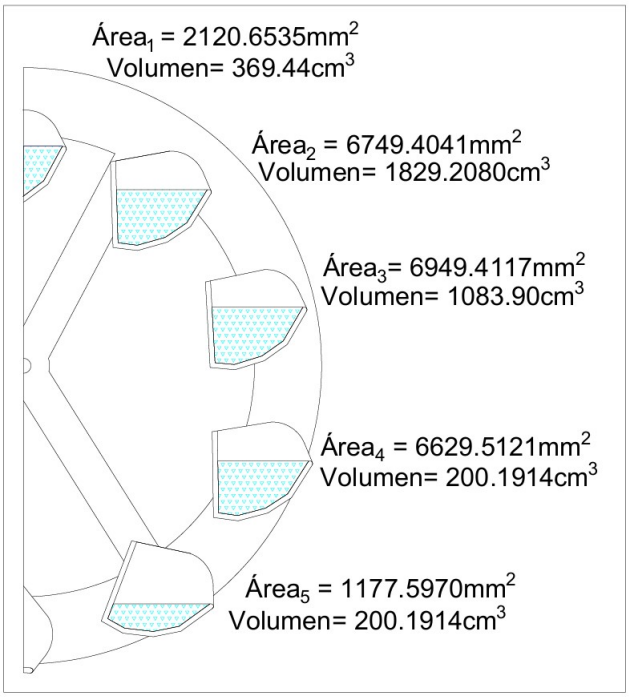


Figura 10. Sección lateral de la rueda hidráulica con cangilones articulados con su respectivo volumen y área

Esta cantidad de agua nos permite calcular el torque instantáneo mediante la evaluación del peso del líquido en relación con el centro de gravedad con respecto al centro de la rueda. Los centros de gravedad se identifican a través de secciones planas, y el peso del líquido se determina utilizando el volumen y la densidad del fluido correspondiente. Por lo tanto:

- La densidad del agua es de $\rho = 1000\,\text{kg/m}^3 \approx 1\,\text{g/cm}^3$.

  De acuerdo a esto se determina que $1000\ cm^3$ tiene un peso de $9{,}81\ N\ (1\ kg)$.

  Con este dato determinamos el torque, como sigue:

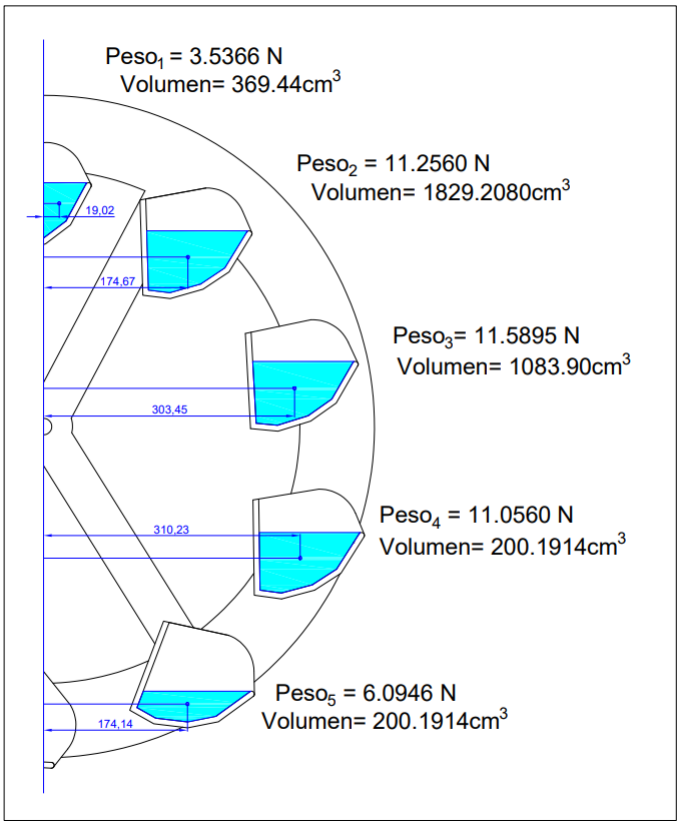


Figura 11. Fuerzas ejercidas sobre la rueda con cangilones articulados y con sus respectivos brazos

En la **Tabla 2** se muestra el torque producido por cada cangilón en función de la cantidad de agua que contiene y la longitud de su brazo de palanca. Asimismo, se calcula el torque total generado por unidad de profundidad.

Tabla 2. Torque obtenido por unidad de profundidad en rueda hidráulica con cangilones articulados

Rueda hidráulica con cangilones articulados								
Área	Profundidad	Volumen		Densidad	Masa	Peso	Brazo	Torque
$[mm^2]$	[cm]	$[cm^3]$	[litros]	del agua	[kg]	[N]	[m]	[Nm]
2120.6535		360.5111	0.3605		0.3605	3.5366	0.01902	0.0672664
6749.4041		1147.3987	1.1474	$1000kg/m^3$	1.1474	11.2560	0.17467	1.96608224
6949.4117	17	1181.4000	1.1814	$1g/cm^3$	1.1814	11.5895	0.30345	3.51684406
6629.5121		1127.0171	1.1270		1.1270	11.0560	0.31023	3.42991446
3654.5001		621.2650	0.6213		0.6213	6.0946	0.17414	1.06131535
Gravedad $[m/s^2]$=9.81					**Torque total [Nm]**			**10.041423**

El torque se determina con la ecuación (11):

$$T_1 = 3{,}5366N * 0{,}01902m = \mathbf{0{,}0672\ Nm}$$

Se realiza el mismo procedimiento para cada cangilón siguiente **Figura 11**, y con esto se obtiene:

- $T_2 = \mathbf{1{,}9660\ Nm}$
- $T_3 = \mathbf{3{,}5168\ Nm}$
- $T_4 = \mathbf{3{,}4299\ Nm}$
- $T_5 = \mathbf{1{,}0613\ Nm}$

El torque máximo se lo determina con la ecuación (12):

$$T_t = \mathbf{10{,}0414\ Nm}$$

6.2.2.7 Cálculo de ejes

6.2.2.7.1 Eje sólido para rueda hidráulica

Para determinar el diámetro mínimo del eje sólido de la rueda hidráulica, es fundamental considerar el peso estimado de la rueda, que es de 21.35 kg, equivalente a una fuerza de 209.45 N. Esta fuerza, que debe soportar el eje. La **Figura 12** muestra la distribución de fuerzas actuantes sobre el eje, proporcionando un diagrama de las cargas involucradas.

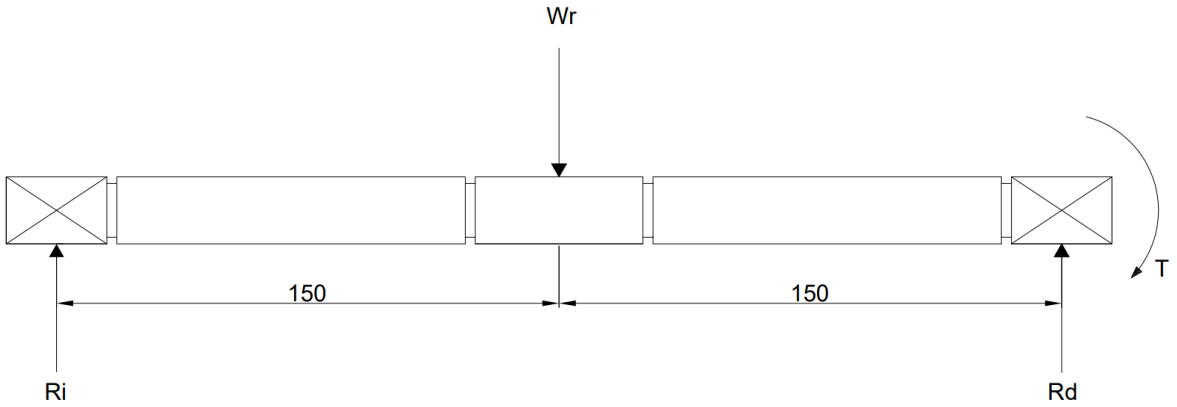


Figura 12. Fuerzas aplicadas al eje sólido

Se aplica las ecuaciones de equilibrio para determinar las fuerzas de reacción establecidas que se encuentran en el eje.

$$+ \circlearrowleft \sum M_{Ri} = 0$$

$$-209{,}45\ N * (150\ mm) + Rd * (300\ mm) = 0$$

$$Rd = \frac{209{,}45\ N * 150\ mm}{300\ mm}$$

$$Rd = \mathbf{104{,}725\ N}$$

$$\uparrow \sum F = 0$$

$$R_i - 209{,}45\ N + R_d = 0$$

$$R_i = 209{,}45\ N - R_d$$

$$R_i = 209{,}45\ N - 104{,}725\ N$$

$$R_i = \mathbf{104{,}725\ N}$$

Una vez identificadas estas fuerzas, se puede proceder a trazar el diagrama de fuerza cortante. Posteriormente, se elabora el diagrama de momento flector como se muestra en la **Figura 13**

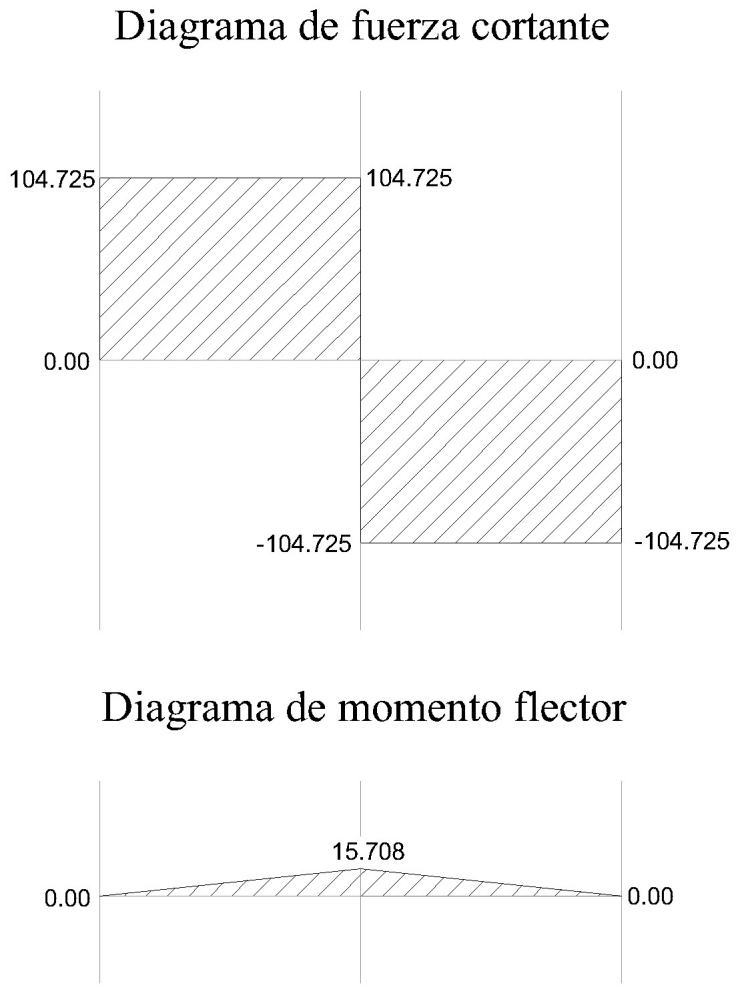


Figura 13. Diagrama de fuerzas cortantes y momento flector

6.2.2.7.2 Diámetro mínimo del eje solido

La siguiente **Tabla 3** presenta los parámetros necesarios para calcular el diámetro mínimo del eje sólido de la rueda hidráulica.

Tabla 3. Parámetros para el calculo del diámetro mínimo

Parámetros	
Acero	SAE 1018
Esfuerzo de material	370 MPa (54,000 lb/in²)
Factor de seguridad	2.5
Momento Flector	15.708 Nm
Momento Torsor	167.56 Nm

Una vez que conocemos estos datos, procederemos a calcular el diámetro del eje sólido

utilizando la ecuación (1).

$$\theta_{min} = \sqrt[3]{\frac{32 * (2{,}5)}{\pi * (370x10^6) * \sqrt{(15{,}708^2 + 167{,}56^2)}}}$$

$$\theta = \mathbf{0{,}023\ m = 23\ mm}$$

$\therefore$ el diámetro comercial de para el eje solido es $\mathbf{1\ in = 25{,}4\ mm}$

6.2.2.8 Cálculo de la Chaveta y Eje Hueco

Para el cálculo de la chaveta y eje hueco según la norma DIN 6885 A, utilizaremos una chaveta de acero C45 con una resistencia a la tracción de 150 N/mm^2 (OPAC). El diámetro del eje es de 1 pulgada. A continuación, se presentan los datos y el procedimiento para determinar el ancho y el alto de la chaveta.

Datos de la Chaveta y Eje

- **Material de la chaveta**: Acero C45
- **Resistencia a la tracción**: 150 N/mm^2
- **Diámetro del eje**: 1 pulgada (25.4 mm)

Selección de la Chaveta según la norma DIN 6885 A

Basándonos en el diámetro del eje de 1 pulgada (25.4 mm), podemos determinar las dimensiones de la chaveta. La norma DIN 6885 A proporciona una tabla estandarizada donde se relaciona el diámetro del eje con las dimensiones de la chaveta. Para un eje de 1 pulgada, las dimensiones de la chaveta se establecen como sigue:

- Ancho de la chaveta (b): 8 mm
- Altura de la chaveta (h): 7 mm

Estas dimensiones se seleccionan para asegurar un ajuste adecuado y para soportar las cargas de operación especificadas por el material de la chaveta.

Diámetro del eje

$$\Theta = 25{,}4\,\text{mm (equivalente a 1 pulgada)}$$

Seleccionar las dimensiones de la chaveta de acuerdo con la norma DIN 6885 A:

- Para un diámetro de eje de 25 a 30 mm (incluyendo nuestro diámetro de 25.4 mm):

$$b = 8\,\text{mm}$$

$$h = 7\,\text{mm}$$

Para un eje de 1 pulgada de diámetro (25.4 mm) con una chaveta fabricada en acero C45 con una resistencia a la tracción de 150 N/mm^2, la chaveta adecuada según la norma DIN 6885 A debe tener un ancho de 8 mm y una altura de 7 mm. el diámetro exterior recomendado por la norma DIN 6885 A, debe ser 8 mm más el diámetro exterior del eje solido, por tanto:

$$D_{Eje\ hueco} = d_{eje} + 8mm$$

$$D_{Eje\ hueco} = 25{,}4\ mm + 8mm = \mathbf{33{,}4\ mm}$$

$\therefore$ el diámetro comercial de para el eje hueco es $\mathbf{1^3/_8\ in}$.

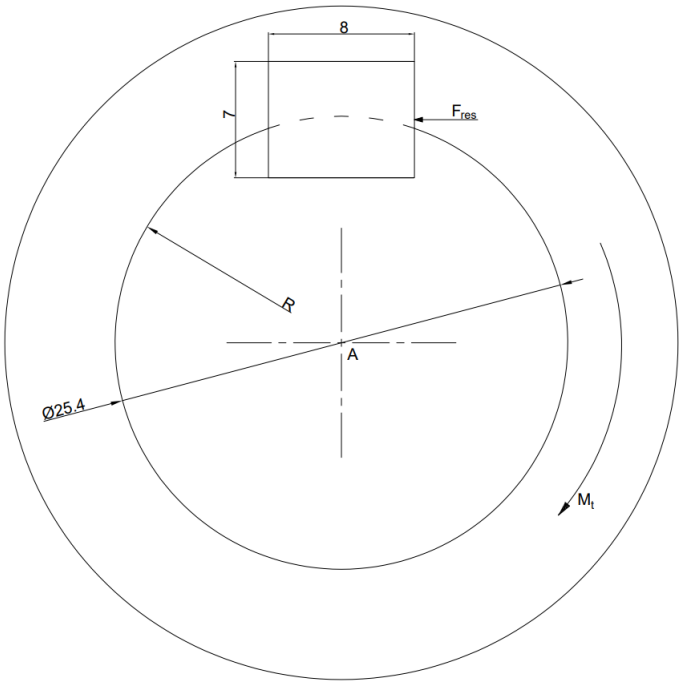


Figura 14. Diagrama de cuerpo libre para chavetero

Por tanto, sabiendo que el torque dado por la rueda hidráulica es de $167560\ Nmm$, la suma de momentos con respecto al punto A es:

$$Fr * r - M_t = 0 \tag{26}$$

$$Fr = \frac{167560\ Nmm}{12{,}7\ m}$$

$$Fr = \mathbf{13193{,}7\ N}$$

Para determinar el largo de la chaveta (L) se utiliza la ecuación (27)

$$L = \frac{Fr}{\tau \cdot b} \tag{27}$$

Donde:

- T = Momento de torsión [Kg · m]
- τ = Resistencia del material $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right]$

$\therefore$ el largo de la chaveta es:

$$L = \frac{13193{,}7\ N}{150\ \frac{N}{mm^2} \cdot 8\ mm}$$

$$L = \mathbf{10{,}99\ mm}$$

De acuerdo a la norma DIN 6885 A, se selecciona una longitud normalizada de 12 mm, por lo tanto la denominación de la chaveta seria:

DIN 6885 A 8x7x12

6.2.2.9 Potencia teórica de la rueda hidráulica

La potencia de la rueda hidráulica con cangilones articulados se determina a partir de la ecuación (20), que relaciona la velocidad angular alcanzada y el torque generado por elemento.

$$Pot = (162{,}56\ Nm)(3{,}61\ rad/s) = \mathbf{586{,}84\ W}$$

6.2.2.10 Volumen del recipiente de montaje (V_{rm})

Utilizamos la ecuación (28).

$$V_{rm} = Largo \times Ancho \times Altura \tag{28}$$

Dónde:

- Largo = 1,2 m
- Ancho = 0,7 m
- Altura = 0,5 m

$$V_{rm} = 1{,}2\text{m} \times 0{,}7\text{m} \times 0{,}5\text{m}$$

∴ Resulta un volumen de 0.42 m^3, que es igual a 420 L.

6.2.3 Diseño de piezas y proceso constructivo

Se detalla cómo fue el proceso de cada una de sus fases, desde la adquisición de los cangilones, la fabricación de las piezas individuales hasta su ensamblaje.

Se inicio la fabricación de las tapas laterales fijas, las cuales fueron diseñadas para evitar el desperdicio de agua por los laterales de la rueda. Posteriormente, se construyeron las tapas laterales móviles, esenciales para permitir la articulación y movimiento de los cangilones durante la operación de la rueda. Se diseñó y fabricó soportes para asegurar la estabilidad y correcta alineación del sistema. Los acoples y cangilones fueron construidos y ensamblados para maximizar la captación y liberación de agua, contribuyendo así a la generación de torque. Por último, se llevó a cabo el mecanizado de ejes.

6.2.3.1 Adquisición de cangilones

Se adquirieron 10 cangilones TAPCO Inc. 7x5, diseñados para servicio pesado ”HEAVY DUTY” tipo CC-HD, específicamente para elevadores. Estos cangilones están fabricados con un material de alta densidad, adecuado para aplicaciones con productos de fácil escurrimiento, como se muestra en la **Figura 15**. La compra se realizó en Casa Comercial Poveda, ubicada en la provincia de Guayaquil, y el envío fue gestionado a través de la Cooperativa de Transportes Loja.

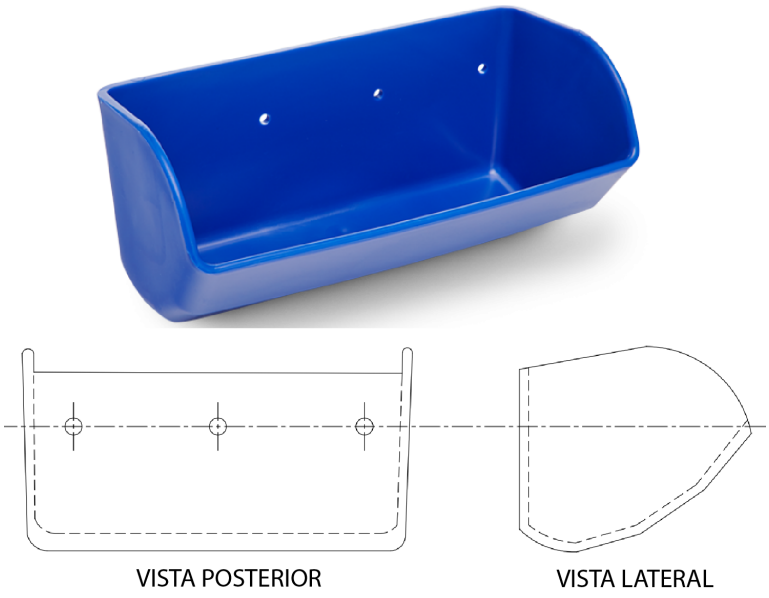


Figura 15. Cangilón TAPCO INC. 7x5

Fuente: Poveda (2024).

Los cangilones vienen de fábrica con tres perforaciones en la parte posterior. Sin embargo, para el proyecto se realizaron perforaciones en las partes laterales, por lo que fue necesario tapar las tres perforaciones traseras con PEGATANKE, un adhesivo que tiene un tiempo de curado completo de aproximadamente 30 min al sol. Este tiempo puede variar dependiendo de la temperatura ambiente. Adicionalmente, se realizaron dos perforaciones con $\theta = 10\ mm$ en las dos partes laterales de los cangilones, tal como se muestra en la **Figura 16**.

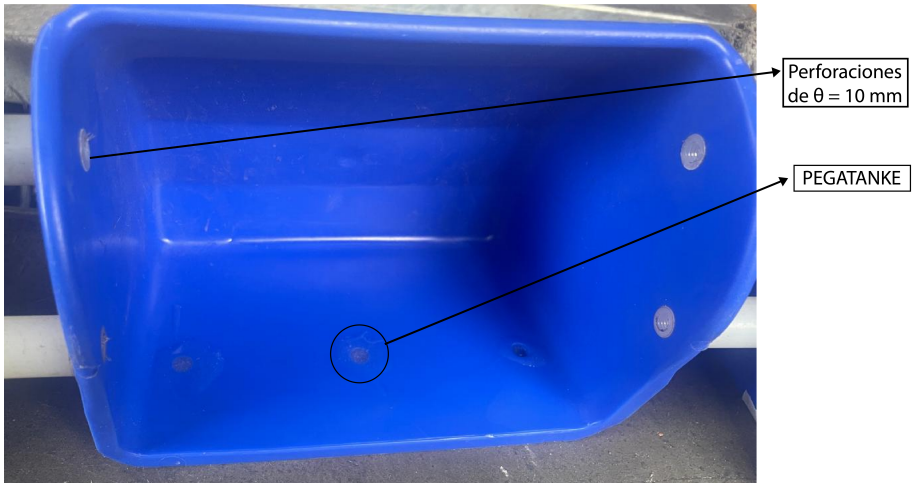


Figura 16. Modificación de cangilones TAPCO Inc. 7x5 con perforaciones laterales

6.2.3.2 Tapas laterales fijas

Las piezas tienen la forma de disco, de acero negro de 3 mm de espesor con un diámetro de 800 mm, que tiene un agujero central de 500 mm. Presenta un corte en su parte inferior, dejando una apertura que va desde 38.81 mm a 45.47 mm desde el borde del círculo, definido por los radios R388.74 mm y R388.20 mm, que marca la forma exacta donde se soldó la pletina de 35 mm de ancho y 2 mm de espesor, tal como se muestra en la **Figura 17**. Esta pletina sirve como riel para los rodamientos que permiten la articulación del cangilón

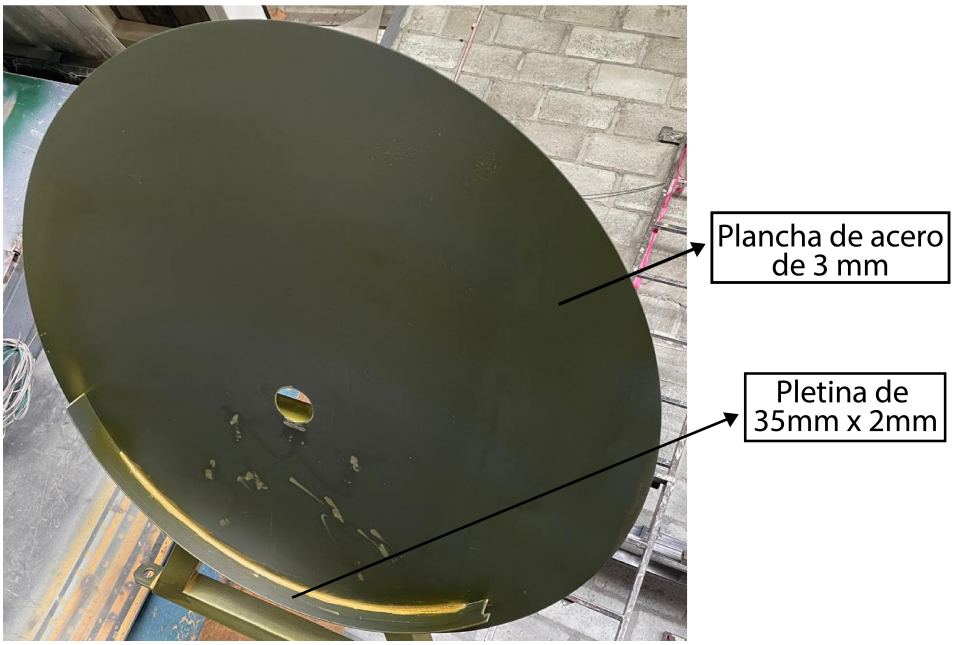


Figura 17. Tapas laterales fijas

6.2.3.3 Tapas laterales móviles

La **Figura 18** muestra las tapas laterales móviles las cuales incluyen tres brazos radiales que conectan el anillo exterior con el núcleo central, el anillo exterior tiene un ancho de 100 mm con un radio exterior R 700 mm. Además, la pieza cuenta con 10 perforaciones de 10 mm de diámetro distribuidos uniformemente alrededor de un radio R 660 mm.

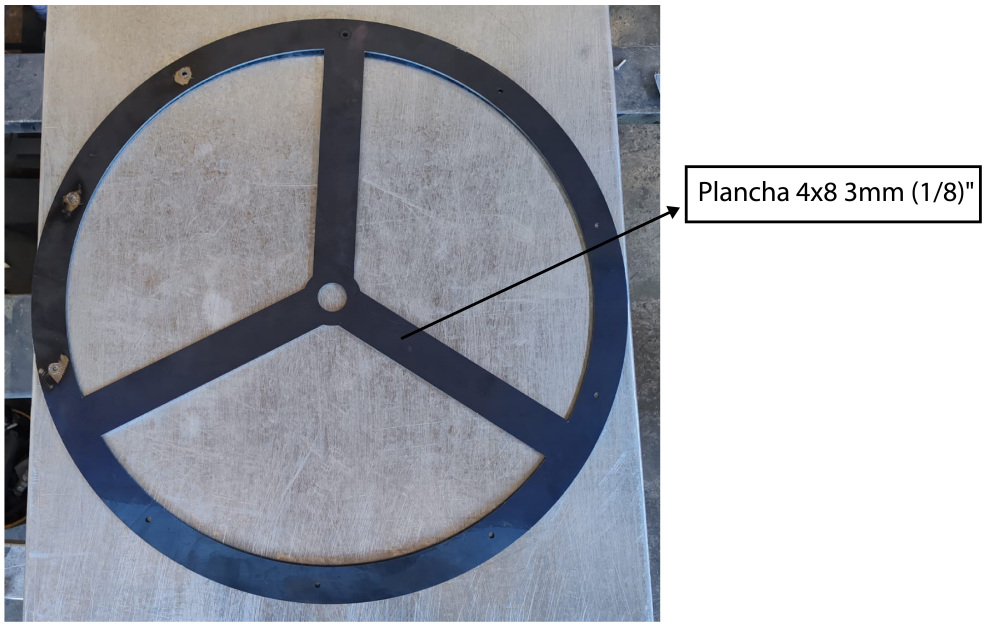


Figura 18. Pieza céntrica móvil

6.2.3.4 Soporte o base

Para asegurar la resistencia y durabilidad del soporte en contacto constante con el agua, se ha fabricado utilizando un tubo galvanizado de 50 x 50 mm con un espesor de 2 mm. La **Figura 19** muestra la estructura presenta una forma trapezoidal y está compuesta por un marco soldado. La base del soporte tiene unas dimensiones de 530 mm de alto por 571.31 mm de ancho, creando un trapezoide que proporciona estabilidad estructural. En la parte superior, el soporte cuenta con un segmento central de 147.31 mm de largo, flanqueado por dos secciones laterales de 212 mm cada una.

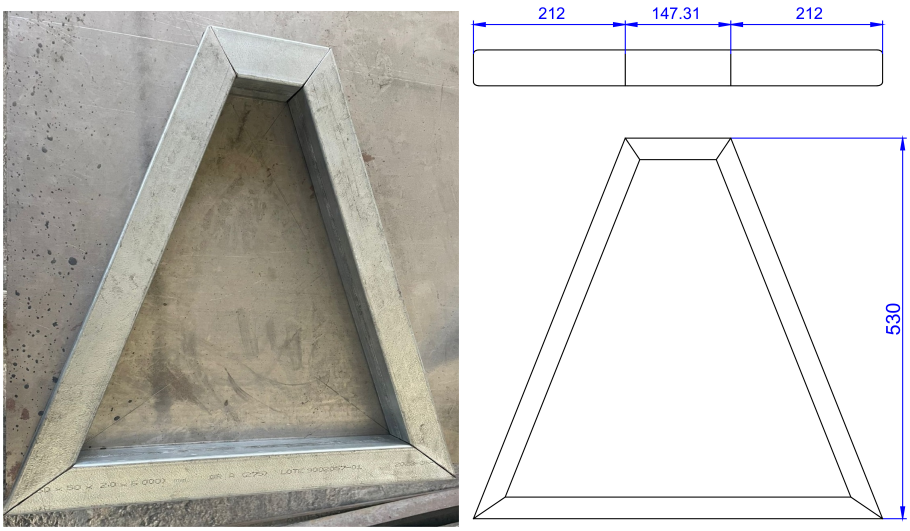


Figura 19. Soporte para ruedas hidráulicas

6.2.3.5 Mecanizado de acoples

Los acoples fueron mecanizados en un torno de la marca [nombre de la marca] y se utilizó grilon de 15 mm de diámetro como material de base. Cada uno de los dos acoples presenta dimensiones diferentes y fue mecanizado específicamente según su integración dentro de la rueda. El proceso de mecanizado incluyó operaciones de desbaste y cilindrado en el torno, realizadas en veinte repeticiones para cada tipo de acople.

El primer acople se conecta con un rodamiento 6200 2RSC3 y el cangilón, como se muestra en la **Figura 20**.

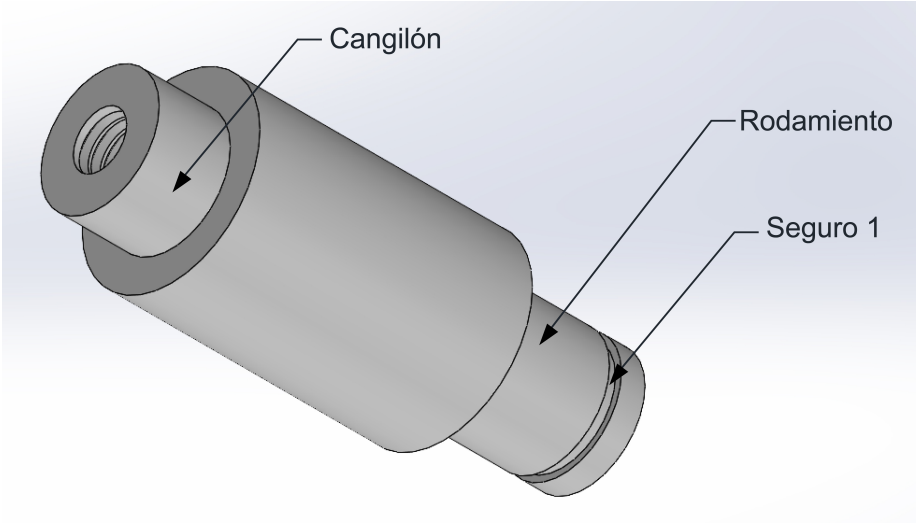


Figura 20. Acople con rodamiento en grilon

La **Figura 21** muestra que el segundo acople el cual se ensambla con el cangilón y la pieza móvil de la rueda hidráulica. Además los dos acoples cuentan con un roscado interno M6 para asegurarse mediante pernos de cabeza hexagonal.

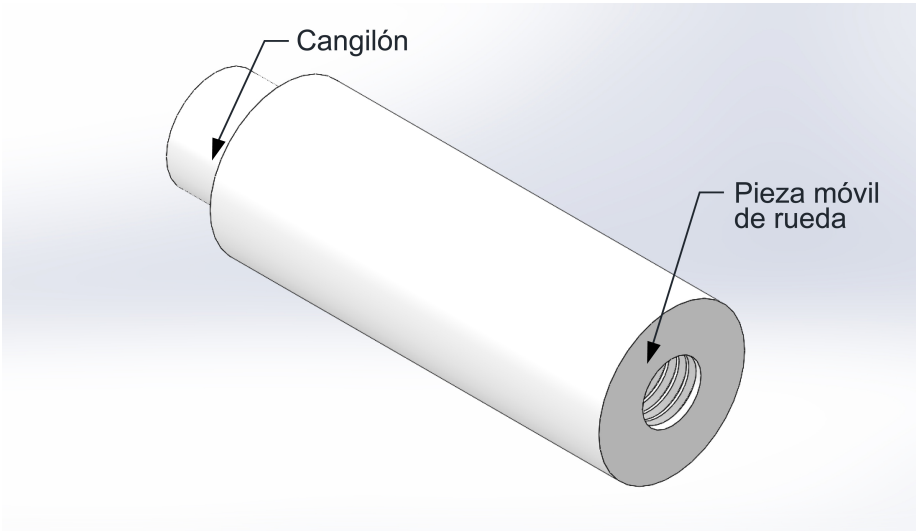


Figura 21. Acople fijo en grilon

6.2.3.6 Mecanizado de ejes

Para el mecanizado, se adquirieron barras de acero SAE 1018 que posteriormente fueron desbastadas hasta alcanzar los diámetros deseados. Ambos ejes para las ruedas siguen el mismo proceso de mecanizado y tienen dimensiones idénticas. El desbaste se realizó en un torno marca **TRAVIS**, donde se colocó el elemento a mecanizar y se llevó a cabo el proceso de desbaste. En la **Figura 22**, se muestra el torno utilizado.

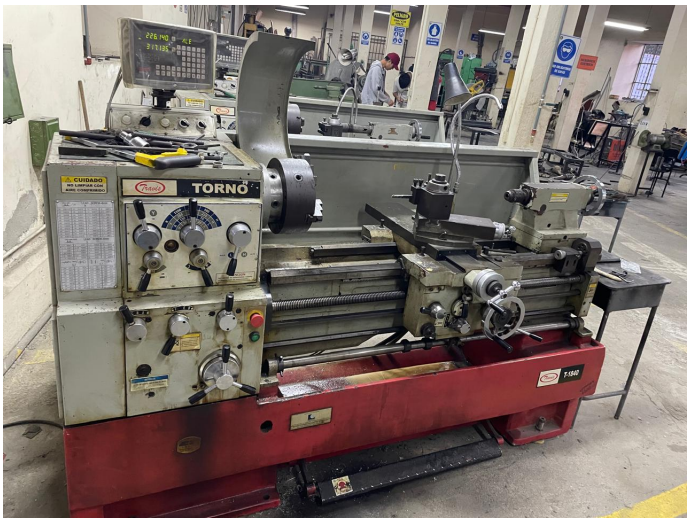


Figura 22. Torno marca TRAVIS

El eje está sometido al mayor esfuerzo, ya que soporta el elemento con mayor peso, que es la rueda hidráulica. Por lo tanto, el diámetro será de 1 pulgada. Esto se muestra en la **Figura 23**.

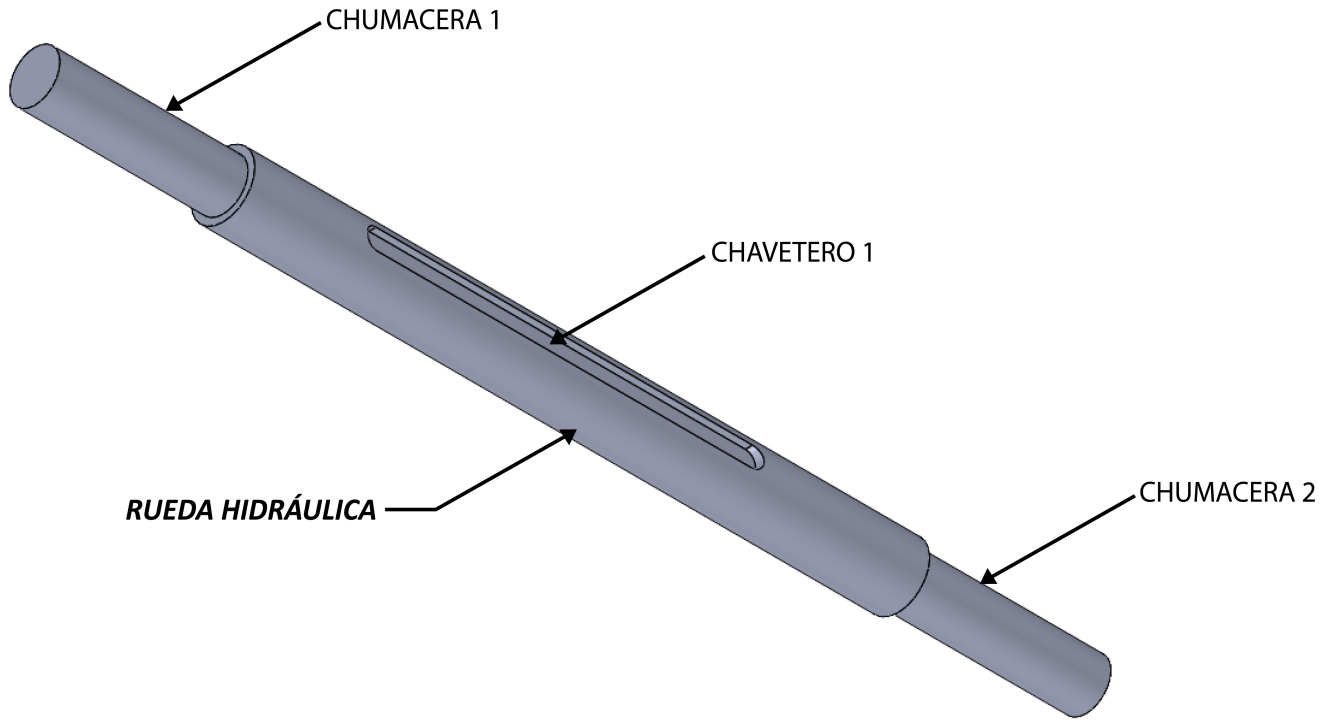


Figura 23. Eje de la rueda hidráulica

6.3 Diseño de la rueda Hidráulica convencional

6.3.1 Diseño conceptual de la rueda

En el diseño de la rueda hidráulica convencional, la geometría es similar a la de la rueda con cangilones articulados. Ambas variantes comparten dimensiones clave, como el diámetro de la rueda, la disposición de los cangilones alrededor de su perímetro y la estructura general de soporte. Esta consistencia en el diseño geométrico permite que ambas versiones operen bajo principios hidráulicos similares, capturando y utilizando la energía del agua para generar movimiento. La principal diferencia radica en la mecánica de los cangilones; mientras que en la rueda con cangilones fijos estos permanecen en una posición constante, en el prototipo con cangilones articulados, estos pueden moverse o ajustarse para optimizar la eficiencia en la captación de agua maximizando el torque.

6.3.1.1 Calculó de torque

Al momento en que la rueda entre en funcionamiento, en la **Figura 24** se muestra el área y el volumen de agua contenido en cada cangilón.

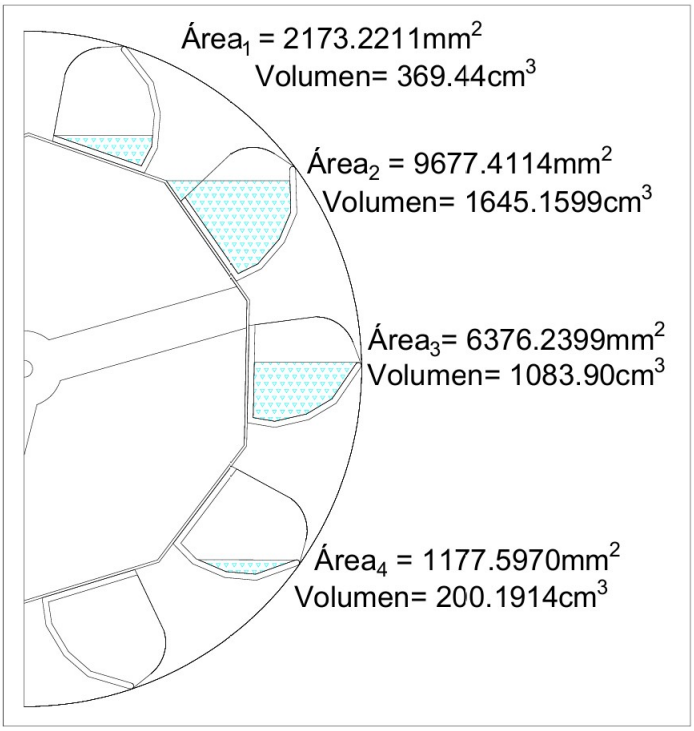


Figura 24. Sección lateral de la rueda Hidráulica y su respectivo volumen y área

Esta cantidad de agua nos permite calcular el torque instantáneo mediante la evaluación del peso del líquido en relación con el centro de gravedad con respecto al centro de la rueda. Los centros de gravedad se identifican a través de secciones planas, y el peso del líquido se

determina utilizando el volumen y la densidad del fluido correspondiente. Por lo tanto:

- La densidad del agua es de $\rho = 1000\,\text{kg/m}^3 \approx 1\,\text{g/cm}^3$.

  De acuerdo a esto se determina que $1000\ cm^3$ tiene un peso de $9{,}81\ N\ (1\ kg)$.

  Con este dato determinamos el torque, como sigue:

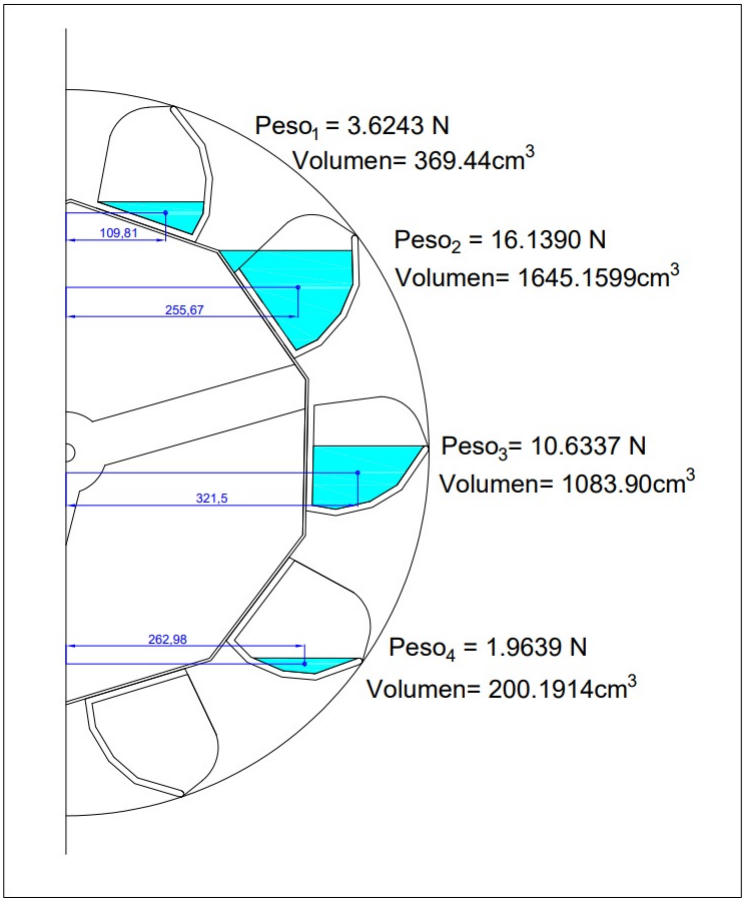


Figura 25. Fuerzas ejercidas sobre la rueda y con sus respectivos brazos

En la **Tabla 4** se muestra el torque producido por cada cangilón en función de la cantidad de agua que contiene y la longitud de su brazo de palanca. Asimismo, se calcula el torque total generado por unidad de profundidad.

Tabla 4. Torque obtenido por unidad de profundidad en rueda hidráulica fija

Rueda hidráulica fija								
Área	Profundidad	Volumen		Densidad	Masa	Peso	Brazo	Torque
$[mm^2]$	[cm]	[cm3]	[litros]	del agua	[kg]	[N]	[m]	[Nm]
2173.2211	17	369.4476	0.3694	$1000kg/m^3$ $1g/cm^3$	0.3694	3.6243	0.1098	0.3980
9677.4114		1645.1599	1.6452		1.6452	16.1390	0.2557	4.1263
6376.2399		1083.9608	1.0840		1.0840	10.6337	0.3215	3.4187
1177.597		200.1915	0.2002		0.2002	1.9639	0.2630	0.5165
Gravedad $[m/s^2]$= 9.81					**Torque Total [Nm]**			**8.45943**

El torque se determina con la ecuación (11):

$$T_1 = 36243N * 0{,}1098m = \mathbf{0{,}398\ Nm}$$

Se realiza el mismo procedimiento para cada cangilón siguiente **Figura 25**, y con esto se obtiene:

- $T_2 = \mathbf{4{,}1263\ Nm}$
- $T_3 = \mathbf{3{,}4187\ Nm}$
- $T_4 = \mathbf{0{,}5165\ Nm}$

El torque máximo se lo determina con la ecuación (12):

$$T_t = \mathbf{8{,}45943\ Nm}$$

A continuación, se detalla el código utilizado para calcular el torque en ruedas hidráulicas, tanto fijas como con cangilones articulados. Este código permite ingresar los valores de entrada, realizar los cálculos necesarios y mostrar los resultados, incluyendo la mejora en eficiencia entre las dos ruedas.

6.3.2 Ingreso de Valores

Primero, se ingresan los valores iniciales para las ruedas hidráulicas, definiendo dos matrices de entrada, una para la rueda hidráulica fija y otra para la rueda con cangilones articulados. Cada fila de la matriz contiene el área en milímetros cuadrados (mm²) y la distancia en milímetros (mm).

```
% Definir la matriz de entrada para rueda hidráulica fija:
```

```
[area_mm2, distancia_mm]
matriz_fija = [
    2173.2211, 109.81;
    9677.4114, 255.67;
    6376.2399, 321.5;
    1177.597, 262.98
];

% Definir la matriz de entrada para rueda hidráulica con cangilones
articulados: [area_mm2, distancia_mm]
matriz_cangilones = [
    2120.6535, 19.02;
    6749.4041, 174.67;
    6949.4117, 303.45;
    6629.5121, 310.23;
    3654.5001, 174.14
];
```

Dentro de la función `calcular_y_mostrar`, se realizan varios cálculos. El primer paso es calcular el volumen:

```
volumen_cm3 = area_mm2 * 0.01 * profundidad_cm;
```

El área en mm² se convierte a cm² multiplicando por 0.01 y luego se multiplica por la profundidad constante de 17 cm para obtener el volumen en centímetros cúbicos (cm³). El siguiente paso es calcular la masa:

```
masa_kg = volumen_cm3 * 0.001;
```

Luego, se calcula el peso:

```
peso_N = masa_kg * gravedad;
```

La masa en kg se multiplica por la aceleración de la gravedad (9.81 m/s²) para obtener el peso en Newtons (N).

Posteriormente, se calcula el torque, la distancia en mm se convierte a metros (m) y luego se multiplica por el peso en N para obtener el torque en Newton-metros (Nm).

```
distancia_m = matriz_entrada(:, 2) * 0.001;
torque_Nm = peso_N .* distancia_m;
```

Después de calcular los torques para ambas ruedas, se determina la mejora en eficiencia, misma que se calcula como el porcentaje de mejora del torque total de la rueda con cangilones articulados respecto a la rueda fija.

```
mejora_eficiencia = ((sum(torque_Nm_cangilones) -
sum(torque_Nm_fija)) / sum(torque_Nm_fija)) * 100;
```

Los resultados que se consiguieron se presentan en la **Figura 26** donde se detalla cada cálculo realizado. Incluye el área en mm² y cm², la profundidad constante en cm, el volumen en cm³ y litros, la masa en kg, el peso en N, la distancia en mm y m, y finalmente el torque en Nm para cada configuración de rueda.

RUEDA HIDRÁULICA FIJA

Num_Cangilon	Area_mm2	Profundidad_cm	Volumen_cm3	Volumen_Litros	Masa_kg	Peso_N	Distancia_mm	Distancia_m	Torque_Nm
1	2173.2	17	369.45	0.36945	0.36945	3.6243	109.81	0.10981	0.39798
2	9677.4	17	1645.2	1.6452	1.6452	16.139	255.67	0.25567	4.1263
3	6376.2	17	1084	1.084	1.084	10.634	321.5	0.3215	3.4187
4	1177.6	17	200.19	0.20019	0.20019	1.9639	262.98	0.26298	0.51646

Torque Total: 8.45943 Nm

RUEDA HIDRÁULICA CON CANGILONES ARTICULADOS

Num_Cangilon	Area_mm2	Profundidad_cm	Volumen_cm3	Volumen_Litros	Masa_kg	Peso_N	Distancia_mm	Distancia_m	Torque_Nm
1	2120.7	17	360.51	0.36051	0.36051	3.5366	19.02	0.01902	0.067266
2	6749.4	17	1147.4	1.1474	1.1474	11.256	174.67	0.17467	1.9661
3	6949.4	17	1181.4	1.1814	1.1814	11.59	303.45	0.30345	3.5168
4	6629.5	17	1127	1.127	1.127	11.056	310.23	0.31023	3.4299
5	3654.5	17	621.27	0.62127	0.62127	6.0946	174.14	0.17414	1.0613

Torque Total: 10.04142 Nm
Mejora en eficiencia: 18.70%

Figura 26. Resultados de Software Matlab

6.3.3 Generación de Gráficas

Para visualizar los resultados, se generan dos gráficas: una para la relación entre torque y número de cangilones, y otra para la relación entre volumen y número de cangilones.

Gráfica de Torque vs. Número de Cangilones

Se muestra una gráfica expuesta en la **Figura 27** donde se relaciona el torque con el número de cangilones para ambas ruedas. Se utilizan diferentes marcadores y colores para distinguir entre las ruedas fijas y las con cangilones articulados.

```
figure;
hold on;
plot(num_cangilon_fija, torque_Nm_fija, 'o-', 'DisplayName',
```

```
'Rueda Fija');
plot(num_cangilon_cangilones, torque_Nm_cangilones, 's-',
'DisplayName','Rueda Cangilones Articulados');
xlabel('Número de Cangilón');
ylabel('Torque (Nm)');
title('Relación entre Torque y Número de Cangilones');
legend('show');
grid on;
hold off;
```

La rueda hidráulica con cangilones fijos presenta un aumento lineal en el torque a medida que aumenta el número de cangilones, debido al incremento en la fuerza de reacción generada por el flujo de agua sobre la rueda. Mientras que la rueda con cangilones articulados muestra un mayor torque en comparación con la rueda fija para un número dado de cangilones.

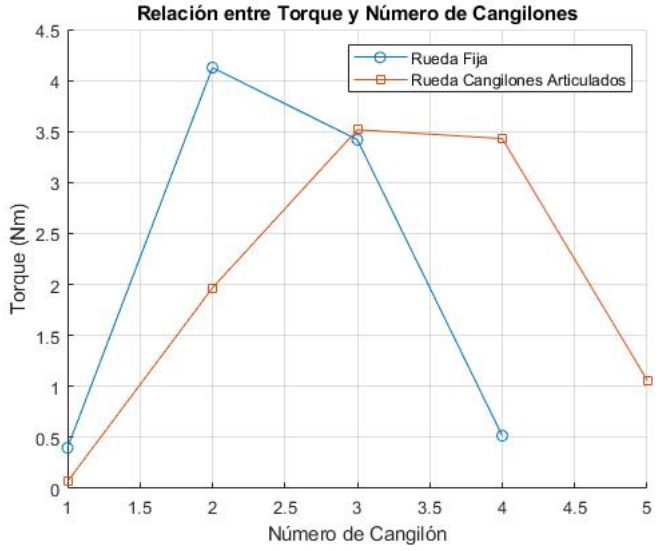


Figura 27. Relación Torque - Número de cangilones

Gráfica de Volumen vs. Número de Cangilones

la **Figura 28**, representa la gráfica donde se muestra la relación entre el volumen y el número de cangilones para ambas ruedas. Al igual que en la gráfica anterior, se utilizan diferentes marcadores y colores para distinguir entre las ruedas.

```
figure;
hold on;
plot(num_cangilon_fija, volumen_cm3_fija, 'o-',
```

```
'DisplayName', 'Rueda Fija');
plot(num_cangilon_cangilones, volumen_cm3_cangilones,
's-', 'DisplayName', 'Rueda Cangilones Articulados');
xlabel('Número de Cangilón');
ylabel('Volumen (cm³)');
title('Relación entre Volumen y Número de Cangilones');
legend('show');
grid on;
hold off;
```

Las dos ruedas hidráulicas muestran un aumento en el volumen captado a medida que se incrementa el número de cangilones. Esto es esperado ya que más cangilones deberían captar más agua, aumentando así el volumen de fluido movido por la rueda, pero al contrastar la cantidad de volumen, la rueda con cangilones articulados tiende a captar un mayor volumen en comparación con la rueda fija para un mismo número de cangilones.

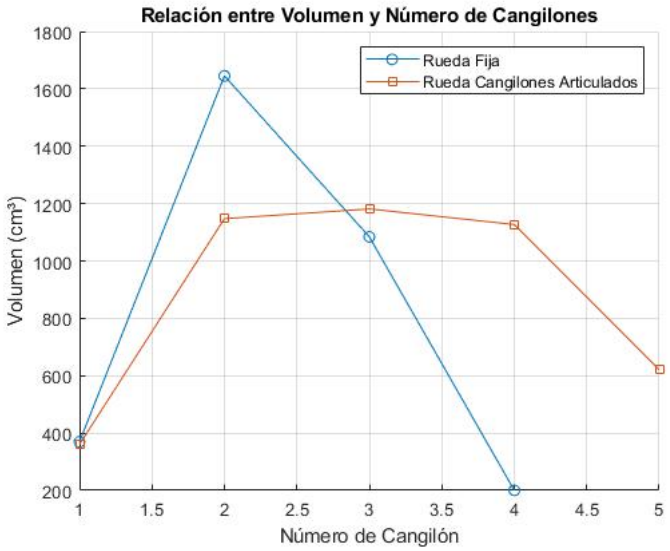


Figura 28. Relación Volumen - Número de cangilones

6.3.4 Proceso constructivo

Durante el diseño de una rueda hidráulica con cangilones fijos, se tomaron en cuenta diferentes parámetros como el espesor de las piezas y materiales a utilizar.

6.3.4.1 Tapas laterales

Las piezas laterales de la rueda tienen un diámetro exterior de 0.80 metros y presentan un decágono interior con un ancho de 0.53 metros. Cada lado del decágono tiene una longitud

de 0.172 metros. Este diseño, con tres soportes hacia el centro de 0.10 metros de ancho a un ángulo de 120 grados entre si, como se muestra en la **Figura 29**.

Figura 29. Pieza lateral de rueda hidráulica con cangilones fijos

6.3.4.2 Pieza central

Para la construcción de la pieza central, encargada de unir todos los cangilones con una forma de decágono, se cortaron dos piezas de 0.19m de ancho por 0.86265m de largo. Posteriormente, se trazaron y doblaron cinco dobleces de 0.17253m de longitud en cada plancha cortada, tal como se muestra en la **Figura 30**.

Figura 30. Pieza céntrica con dobleces

Dado que esta pieza es la encargada de sostener los cangilones, debe presentar tres per-

foraciones, las cuales permitirán la unión mediante pernos avellanados con cabeza hexagonal. Estas perforaciones, con un diámetro de 7 mm, se realizaron a una distancia de 70 mm desde el doblez hacia el centro de cada lado del decágono y con una separación de 67.70 mm entre cada agujero, como se muestra en la **Figura 31**.

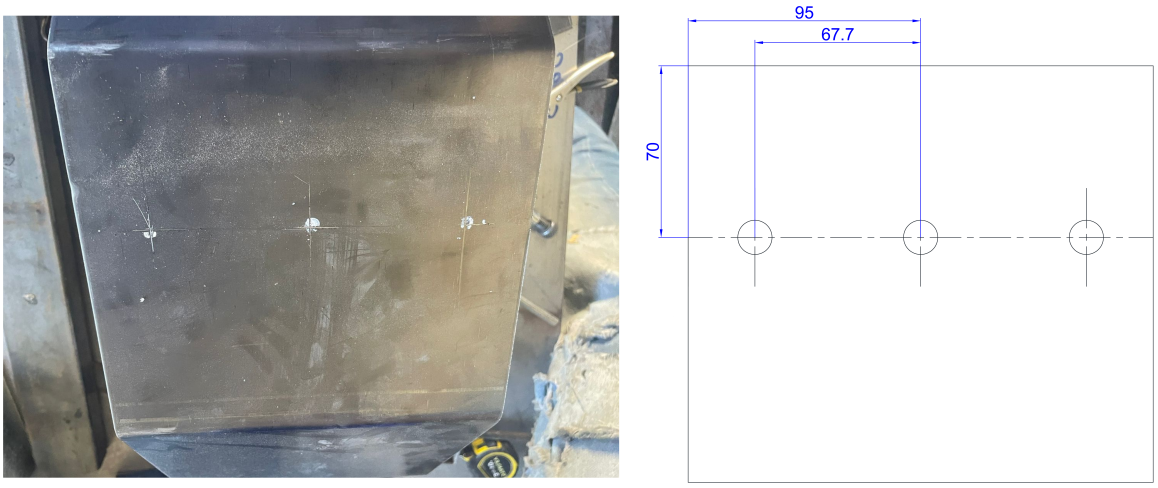


Figura 31. Perforaciones en la pieza central de la rueda hidráulica para la fijación de los cangilones

Luego, las dos piezas fueron soldadas para formar el decágono, como se muestra en la **Figura 32**.

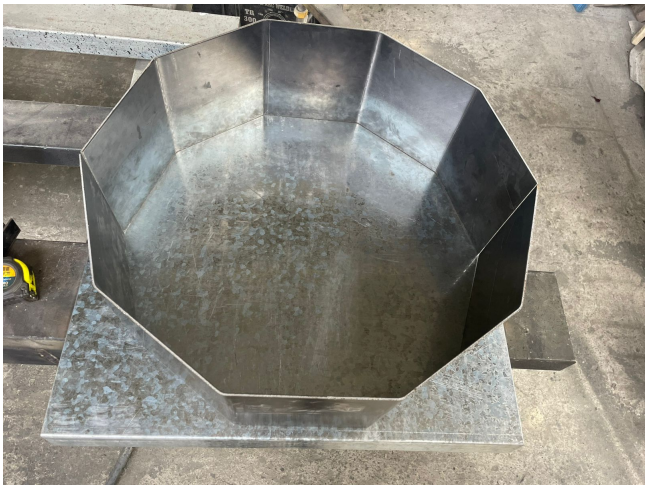


Figura 32. Pieza central

6.3.4.3 Soporte o base

La rueda hidráulica convencional y la rueda hidráulica con cangilones articulados comparten el mismo diseño de soporte, garantizando así la uniformidad en su fabricación y mantenimiento. Este soporte está construido con un tubo galvanizado de 50 x 50 mm y un espesor de 2 mm, tal como se indica en la **Figura 19**. Finalmente, se completó la soldadura de todo el

conjunto de piezas para su montaje, que incluye los ejes sólido y hueco, el soporte base y las chumaceras. La **Figura 33** muestra el ensamblaje final de la rueda hidráulica con cangilones fijos.

Figura 33. Rueda hidráulica con cangilones fijos

6.3.5 Recipiente recaudador de agua

La estructura está construida con planchas de acero galvanizado de 1.9 mm de espesor, material elegido por su notable resistencia a la corrosión. Cuenta con las siguientes dimensiones:

- Base = 1200 mm
- Ancho = 700 mm
- Altura = 500 mm

En el centro del diseño se incorporaron tubos galvanizados de 50x50x2 mm, los cuales proporcionan un refuerzo estructural adicional y permiten la instalación de pernos para asegurar las ruedas hidráulicas. El proceso de construcción incluye el corte y doblado de las planchas como se muestra en la **Figura 34**.

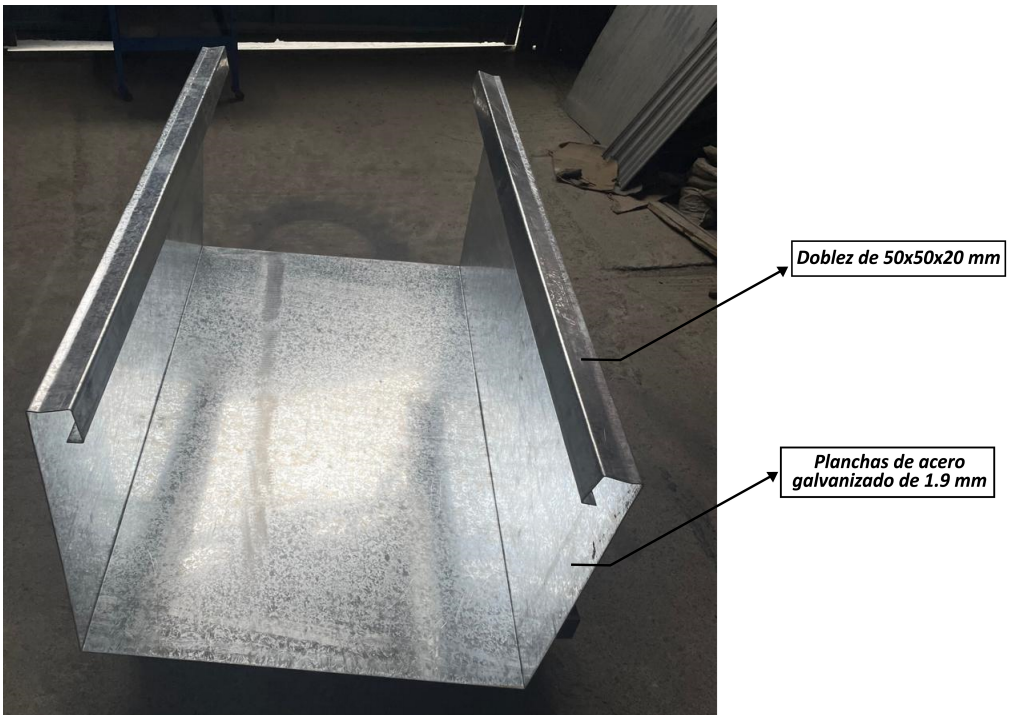


Figura 34. Doblez de plancha para recipiente

Posteriormente, se realiza una soldadura completa tanto en el interior como en el exterior para garantizar la hermeticidad y evitar cualquier posibilidad de fuga de agua. La estructura final del recipiente se muestra en la **Figura 35**.

Figura 35. Recipiente receptor de agua

6.4 Pruebas de funcionamiento y simulación

6.4.1 Caudal real

Para determinar el caudal real, se realizó una prueba utilizando un tanque de agua colocado a una altura de 1,50 metros. El tanque se vació en intervalos de tiempo específicos, permitiendo evaluar el desempeño de las dos tipos de ruedas hidráulicas, una rueda con cangilones articulados y una rueda con cangilones fijos.

6.4.1.1 Cálculo del volumen

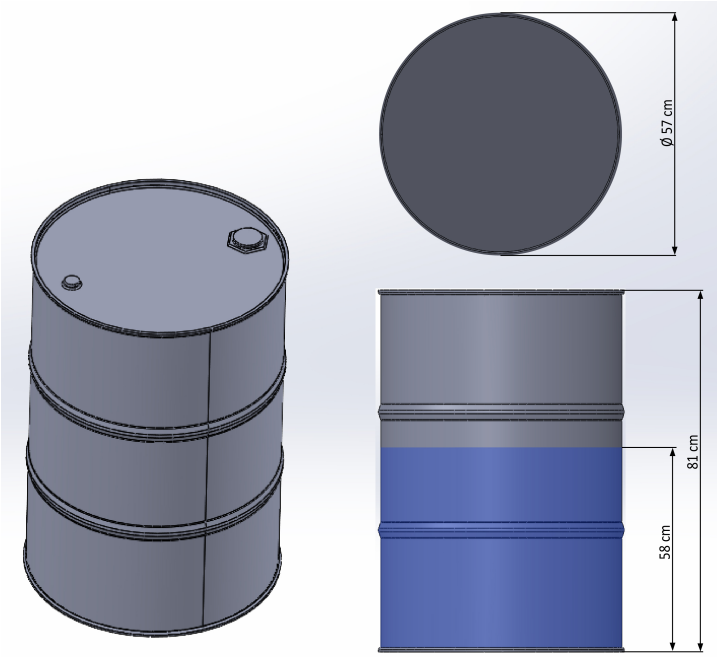


Figura 36. Dimensiones de tanque

Dada las dimensiones que tiene el tanque en la **Figura 36**, se cálculo el volumen utilizando la ecuación (29).

$$Vol = \frac{\pi * \theta^2 * h}{4} \tag{29}$$

donde:

- θ: diámetro del tanque [m]
- h: altura del tanque [m]
- Vol: volumen del tanque [m^3]

$$Vol = \frac{\pi * 57\ cm^2 * 58\ cm}{4}$$

$$Vol = 148{,}002\ x10^3\ cm^3 = 0{,}1480\ m^3 = \mathbf{148{,}002\ litros}$$

Para calcular el caudal Q, que es el volumen total transportado por unidad de tiempo, se utiliza la ecuación (30).

$$Q = \frac{V}{t} \tag{30}$$

Donde:

- Q: Caudal [m^3/s]
- Vol: Volumen [m^3]
- t: Tiempo [s]

Por lo tanto

$$Q = \frac{0{,}1480\ m^3}{600\ seg}$$

$$Q = \mathbf{0{,}00024667}\frac{\mathbf{m^3}}{\mathbf{min}}$$

$\therefore$ Se obtiene un caudal real de $0{,}00024667\ m^3/s$ que correspondería a $14{,}8\ l/min$.

6.4.2 Freno de zapata corta

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de las pruebas realizadas utilizando un freno de zapata corta con una longitud de brazo de 0.6 metros. La masa colocada en el eje de prueba tiene un diámetro de 8 cm, y el ángulo del freno se ha ajustado a 45 grados. Las pruebas se llevaron a cabo en las dos ruedas hidráulicas.

6.4.2.1 Rueda Hidráulica con cangilones articulados

Se realizaron pruebas con una rueda hidráulica con cangilones articulados para evaluar su desempeño en términos de torque y potencia. Las pruebas se llevaron a cabo utilizando dos caudales diferentes: 14.8 litros/min y 5.6736 litros/min.

Para el caudal de 14.8 litros/min, se obtuvieron los datos presentados en la **Tabla 5**. Los resultados muestran que la potencia máxima se alcanzó a una velocidad de 133.2 rpm con una fuerza de 18.28 N, logrando 152.99 W. A medida que la velocidad de giro disminuye, la potencia disminuye significativamente a pesar del aumento en la fuerza aplicada.

Tabla 5. Resultados de las pruebas realizadas con la rueda hidráulica con cangilones articulados (caudal de 14.8 litros/min).

N.	Velocidad de giro [rpm]	Fuerza [N]	Longitud de Brazo [m]	Torque [Nm]	Potencia de la rueda [W]
1	90.9	0	0.6	0	0.00
2	70.8	2.13		1.278	9.48
3	53.1	3.14		1.884	10.48
4	48.3	4.18		2.508	12.69
5	42.1	5.05		3.03	13.36
6	37	7.09		4.254	16.48
7	30.2	8.85		5.31	16.79
8	29.4	10.02		6.012	18.51
9	19.9	22.38		13.428	27.98
10	10.6	28.51		17.106	18.99
11	5.3	52.84		31.704	17.60
12	0	85.02		51.012	0.00

Para el caudal de 5.67 litros/min, los datos están detallados en la **Tabla 6**. En esta serie de pruebas, la potencia máxima observada fue de 6.79 W a una velocidad de 15.7 rpm y una fuerza de 6.88 N. Comparando con el caudal de 14.8 litros/min, se observa que el caudal menor resulta en niveles de potencia significativamente más bajos.

Tabla 6. Resultados de las pruebas realizadas con la rueda hidráulica con cangilones articulados (caudal de 5.67 litros/min).

N.	Velocidad de giro [rpm]	Fuerza [N]	Longitud de Brazo [m]	Torque [Nm]	Potencia de la rueda [W]
1	53.8	0	0.6	0	0.00
2	49.6	0.44		0.264	1.37
3	44.5	0.78		0.468	2.18
4	36.2	1.17		0.702	2.66
5	30.6	2.33		1.398	4.48
6	17.3	3.99		2.394	4.34
7	15.7	6.88		4.128	6.79
8	9.5	8.59		5.154	5.13
9	6.4	10.24		6.144	4.12
10	4.8	11.01		6.606	3.32
11	2.1	12.99		7.794	1.71
12	0	16.2		9.72	0.00

En el gráfico de Potencia vs. Velocidad de giro **Figura 37**, se muestra cómo la potencia generada por el sistema varía con la velocidad de giro para dos caudales diferentes: 14.8 L/min y 5.67 L/min. Se observa que, para el caudal de 14.8 L/min, la potencia aumenta significativamente hasta alcanzar un máximo antes de disminuir a medida que la velocidad de giro disminuye, lo que indica un rango óptimo de operación. En contraste, el caudal de 5.67 L/min muestra un aumento menos pronunciado en la potencia, sugiriendo una menor eficiencia en comparación con el caudal más alto.

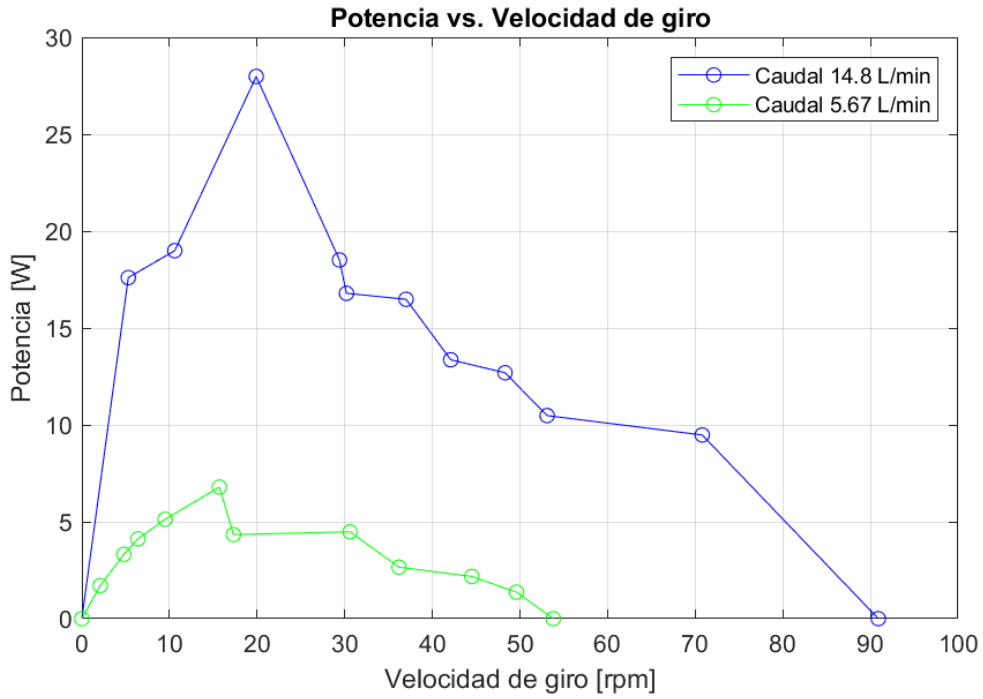


Figura 37. Potencia vs. Velocidad de giro (Rueda hidráulica con cangilones articulados)

En la gráfica de Torque vs. Velocidad de giro **Figura 38**, se analiza la relación entre el torque producido y la velocidad de giro para ambos caudales. Para el caudal de 14.8 L/min, el torque se incrementa considerablemente a medida que aumenta la velocidad, alcanzando valores altos que indican un buen rendimiento. Por otro lado, el caudal de 5.67 L/min muestra un aumento similar en el torque, aunque a niveles significativamente inferiores, lo que resalta que tanto el torque como el caudal son factores cruciales en el rendimiento del sistema.

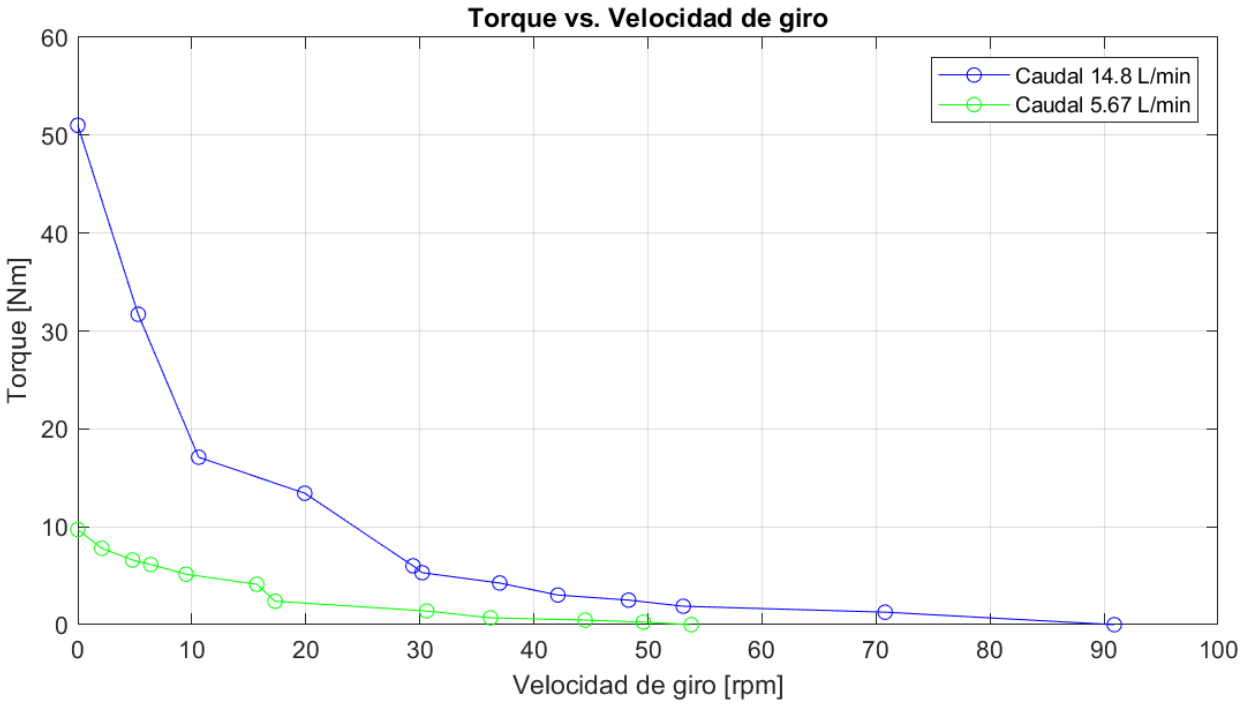


Figura 38. Torque vs. Velocidad de giro (Rueda hidráulica con cangilones articulados)

El gráfico de Torque vs. Potencia **Figura 39** muestra la relación directa entre estas dos variables para los caudales analizados. Para el caudal de 14.8 L/min, se observa una tendencia creciente, donde, a medida que el torque aumenta, la potencia también se incrementa, lo que es consistente con la relación entre estas dos magnitudes. En el caso del caudal de 5.67 L/min, aunque la tendencia es similar, los valores son significativamente más bajos, subrayando que, a pesar de la relación esperada entre torque y potencia, el rendimiento del sistema se ve afectado negativamente por el caudal utilizado.

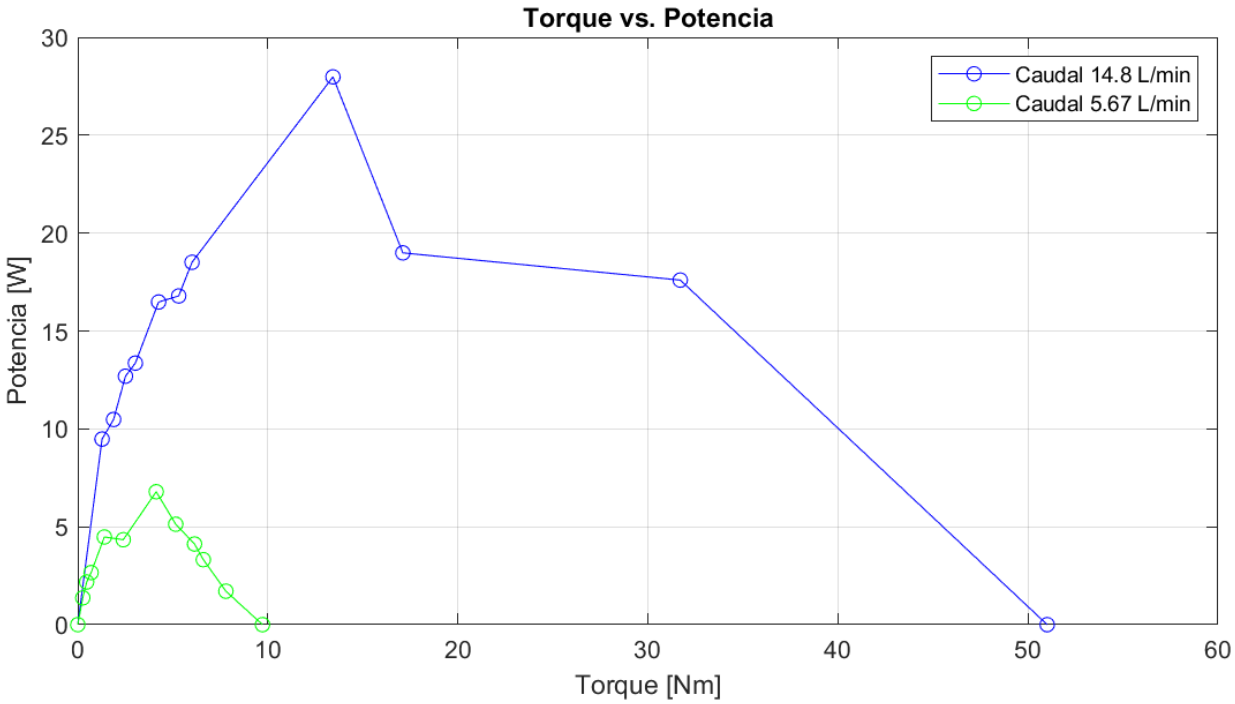


Figura 39. Torque vs. Potencia (Rueda hidráulica con cangilones articulados)

6.4.2.2 Rueda Hidráulica con cangilones fijos

Se realizaron las mismas pruebas con una rueda hidráulica convencional utilizando un freno de zapara corta, con dos caudales distintos: 14.8 litros/min y 5.67 litros/min. Para estas pruebas, se mantuvo el mismo freno y con una longitud de brazo de 0.6m.

Para el caudal de 14.8 litros/min, los resultados están detallados en la **Tabla 7**. La potencia máxima observada fue de 152.99 W a una velocidad de 133.2 rpm y una fuerza de 18.28 N. Como se puede observar, la potencia disminuye a medida que la velocidad de giro disminuye, a pesar del aumento en la fuerza aplicada.

Tabla 7. Resultados de las pruebas realizadas con la rueda hidráulica con cangilones fijos (caudal de 14.8 litros/min).

N.	Velocidad de giro [rpm]	Fuerza [N]	Longitud de Brazo [m]	Torque [Nm]	Potencia de la rueda [W]
1	184.5	0	0.6	0	0.00
2	169.7	1.44		0.864	15.35
3	156.5	2.26		1.356	22.22
4	133.2	18.28		10.968	152.99
5	104.0	20.55		12.33	134.28
6	97.8	22.64		13.584	139.12
7	65.3	24.3		14.58	99.70
8	34.7	34.36		20.616	74.91
9	30.6	38.22		22.932	73.48
10	15.9	46.78		28.068	46.73
11	3.4	50.65		30.39	10.82
12	0	69.07		41.442	0.00

Para el caudal de 5.67 litros/min, los resultados se muestran en la **Tabla 8**. La potencia máxima registrada fue de 9.38 W a una velocidad de 31.3 rpm con una fuerza de 4.77 N. Comparado con el caudal de 14.8 litros/min, el rendimiento en esta prueba fue menor, lo que resalta la importancia del caudal en la optimización de la potencia.

Tabla 8. Resultados de las pruebas realizadas con la rueda hidráulica con cangilones fijos (caudal de 5.67 litros/min).

N.	Velocidad de giro [rpm]	Fuerza [N]	Longitud de Brazo [m]	Torque [Nm]	Potencia de la rueda [W]
1	104.1	0	0.6	0	0.00
2	95.7	0.78		0.468	4.69
3	72.2	1.19		0.714	5.40
4	58.3	1.44		0.864	5.27
5	49.1	1.86		1.116	5.74
6	37.4	3.85		2.31	9.05
7	31.3	4.77		2.862	9.38
8	15.8	6.08		3.648	6.04
9	11.2	7.67		4.602	5.40
10	4.3	8.59		5.154	2.32
11	2.8	10.24		6.144	1.80
12	0	11.49		6.894	0.00

En el gráfico **Figura 40** se compara la potencia generada por la rueda hidráulica en función de la velocidad de giro para dos caudales distintos: 14.8 litros/minuto y 5.67 litros/minuto. Se observa que a medida que la velocidad de giro aumenta, la potencia también tiende a incrementarse, aunque la tasa de aumento es diferente para cada caudal. El caudal de 14.8 L/min muestra un crecimiento más significativo en la potencia a velocidades más altas en comparación con el caudal de 5.67 L/min.

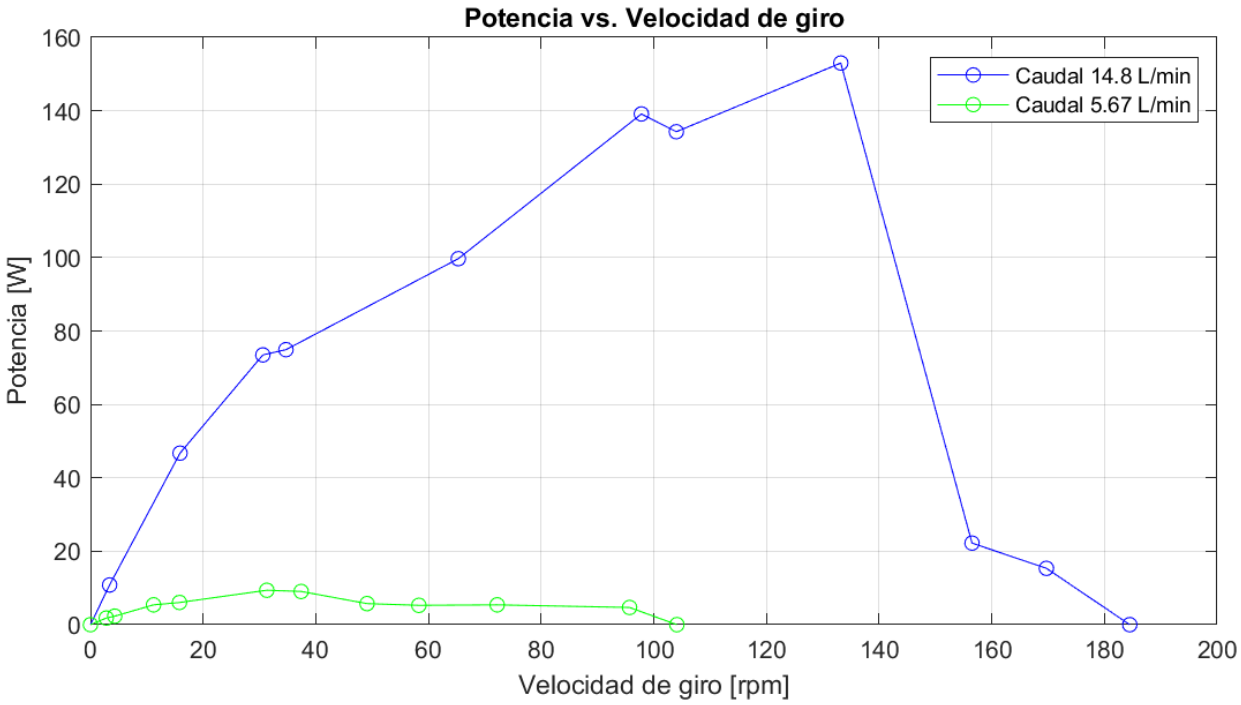


Figura 40. Potencia vs. Velocidad (Rueda hidráulica con cangilones fijos)

El gráfico **Figura 41** ilustra la relación entre el torque y la velocidad de giro, permitiendo una comparación directa entre los dos caudales. Para el caudal de 14.8 L/min, el torque aumenta de manera más pronunciada en comparación con el caudal de 5.67 L/min a medida que la velocidad de giro se incrementa.

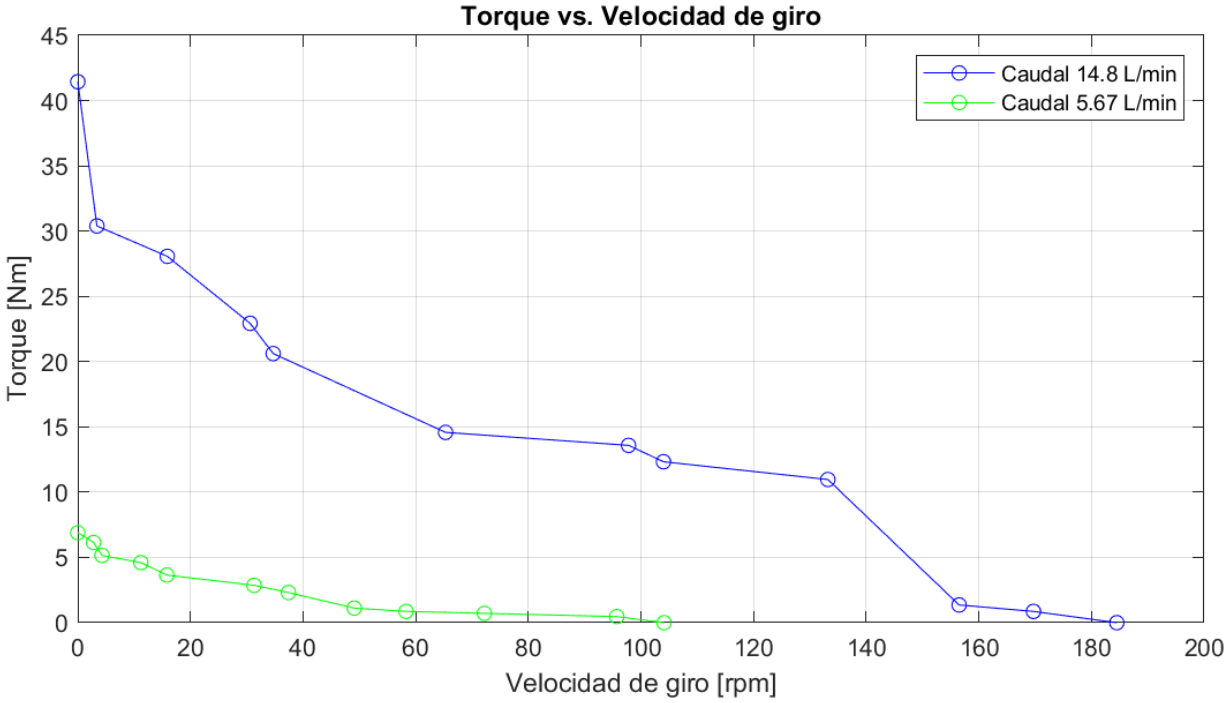


Figura 41. Torque vs. Velocidad de giro (Rueda hidráulica con cangilones fijos)

La última gráfica, mostrada en **Figura 42**, compara directamente el torque y la potencia generada en función de ambos caudales. Se observa que para el caudal de 14.8 L/min, la relación entre torque y potencia es más pronunciada, indicando que un mayor torque se traduce en una potencia significativamente mayor. En contraste, el caudal de 5.67 L/min presenta una relación más débil.

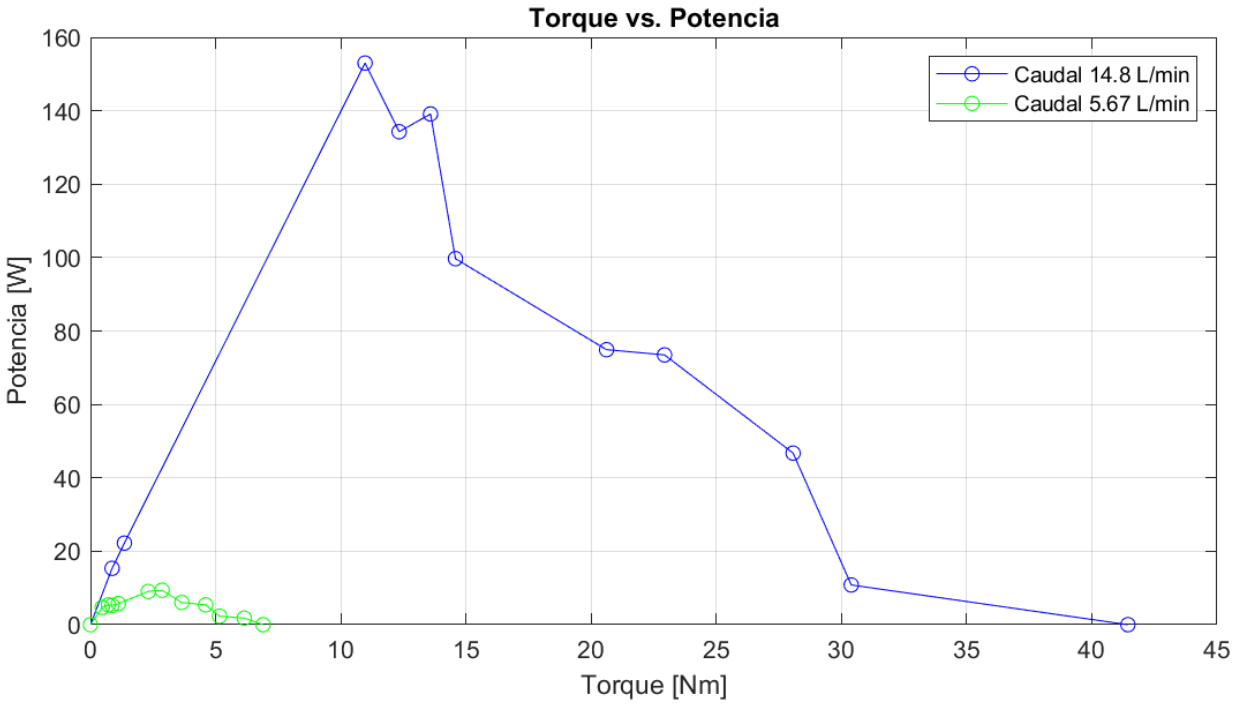


Figura 42. Torque vs. Potencia (Rueda hidráulica con cangilones fijos)

6.4.2.3 Calculadora WheCalc: Herramienta automatizada para la evaluación de ruedas hidráulicas con cangilones articulados y convencionales

Se desarrolló un programa en Python para facilitar la realización de cálculos durante las pruebas de las ruedas hidráulicas. Este programa, denominado Calculadora WheCalc, está diseñado para ofrecer una interfaz que permite a los usuarios ingresar los valores de velocidad en RPM y la fuerza en Newtons (N), y realizar los cálculos automáticamente. Dado que la longitud del brazo es constante en toda la prueba, esta se incluyó como una opción desplegable dentro del programa en un rango de 0.1m a 1m. Además, el usuario puede agregar los valores según el número de mediciones que realice. El programa también genera una guía de prácticas que contiene los pasos para la correcta operación y toma de datos, tanto del prototipo de rueda hidráulica con cangilones articulados como de la rueda hidráulica tradicional con cangilones fijos.

La **Figura 43** muestra la pantalla de inicio del programa. Esta pantalla de inicio brinda

una introducción a la identidad del proyecto y su enfoque en la evaluación de ruedas hidráulicas.

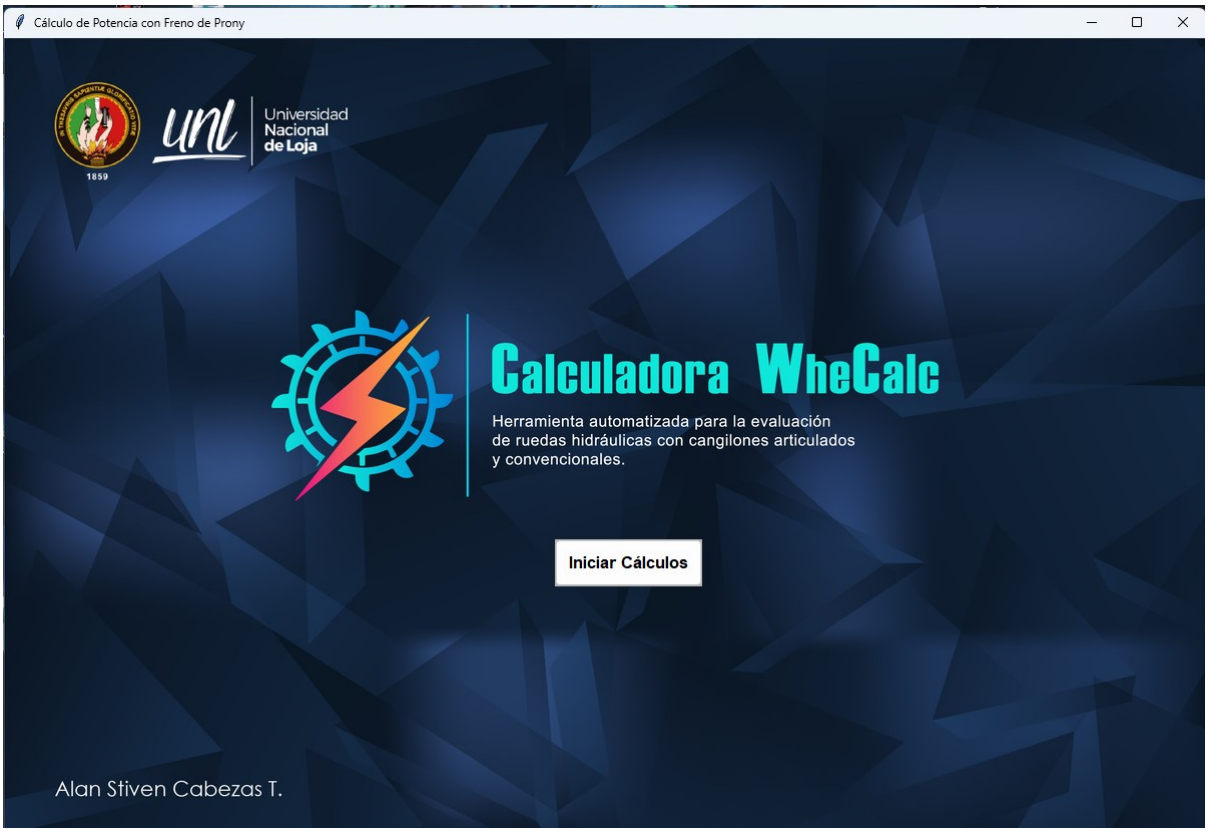


Figura 43. Pantalla de inicio de la calculadora WheCalc

En la **Figura 44**, se presenta la interfaz principal del programa. Aquí, los usuarios pueden ingresar los datos de las pruebas, seleccionando la longitud del brazo desde un menú desplegable y observando los resultados del torque y la potencia calculados en tiempo real. Esta interfaz está dividida en dos secciones que comparan directamente los resultados obtenidos entre la rueda hidráulica con cangilones articulados y la rueda con cangilones fijos. Además, se muestra un resumen con el torque máximo obtenido para cada tipo de rueda, acompañado de una breve comparación que indica el rendimiento superior de una sobre la otra en términos de eficiencia.

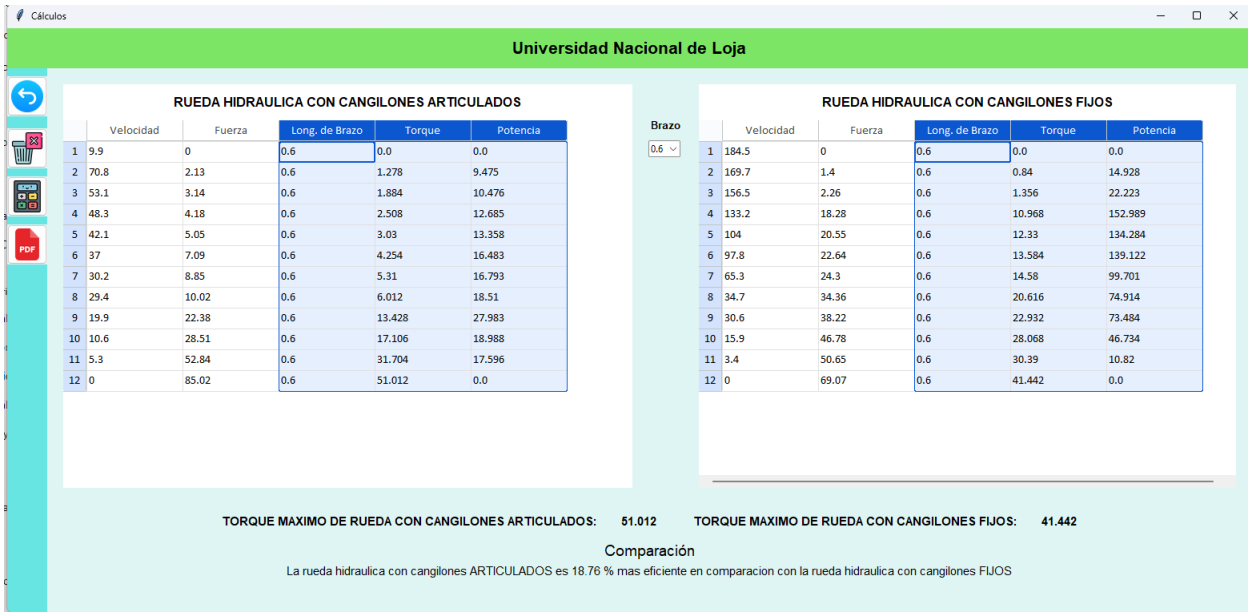


Figura 44. Interfaz principal del programa Calculadora WheCalc

6.4.3 Simulación del proyecto en software XFLOW

En la simulación realizada con el software SIMULIA XFLOW, se llevó a cabo un análisis del comportamiento de la rueda hidráulica cuando entra en contacto con el flujo de agua. La configuración del entorno de simulación incluyó la elección de un modelo de flujo de superficie libre. Se empleo un análisis externo para observar la interacción del agua con la rueda hidráulica sin restricciones internas que pudieran influir en los resultados. Además, se empleó un modelo térmico isotérmico para mantener la temperatura del fluido constante durante todo el proceso de simulación.

Como primer paso se importó la geometría en una sola pieza en formato STEP, generado previamente en el software SolidWorks. La **Figura 45**. muestra cómo se configuró el entorno. Se utilizó un análisis 3D con un modelo de flujo de superficie libre (Free Surface). Además, se estableció un potencial gravitacional que simula la gravedad terrestre, utilizando una aceleración de -9.81 m/s² en el eje vertical.

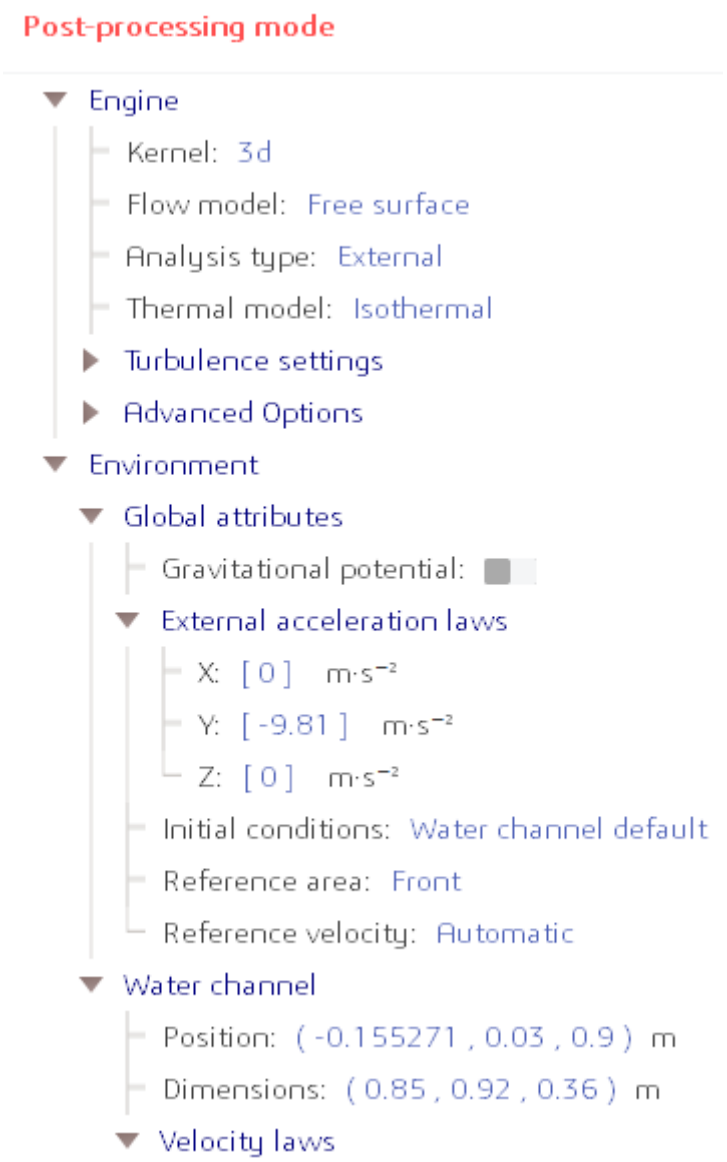


Figura 45. Configuración de entorno de simulación

Posteriormente, se ingresaron las propiedades del fluido en la sección de materiales, como se muestra en la **Figura 46**. Estas propiedades incluyeron la densidad, la temperatura de operación, la viscosidad y la conductividad térmica del fluido. El fluido utilizado en la simulación fue agua, con una densidad de 1000 kg/m³ y una temperatura de operación de 288.15 K. El modelo de viscosidad seleccionado fue el newtoniano, con una viscosidad dinámica de 0.00102 Pa·s, representando el comportamiento real del agua bajo condiciones similares.

Las propiedades térmicas del fluido, incluidas una conductividad térmica de 0.58 W/(m·K) y una capacidad calorífica específica de 4182 J/(kg·K), se definieron para proporcionar un marco completo de las características del fluido durante la simulación.

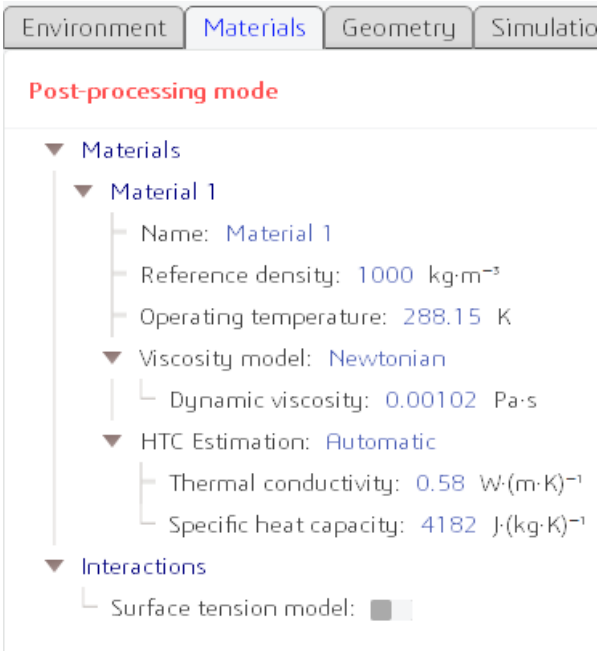


Figura 46. Datos del fluido

Como último paso, se agregó la velocidad de la rueda, la cual está representada en el eje X y expresada en [m/s], como se puede observar en la **Figura 47**.

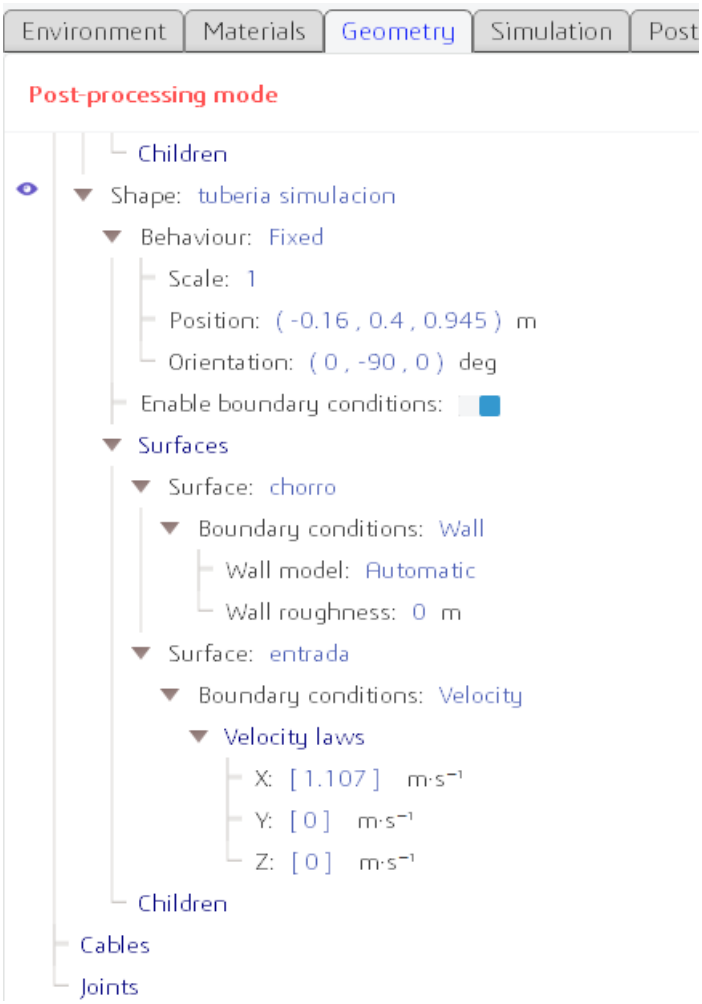


Figura 47. configuración de geometría y velocidad de chorro

Con todos los parámetros configurados, el programa estuvo listo para iniciar la simulación. Para asegurar que los resultados del estudio fueran lo más exactos y confiables posible, se generó un mallado en todo el diseño. La ejecución de la simulación se muestra en la **Figura 48**.

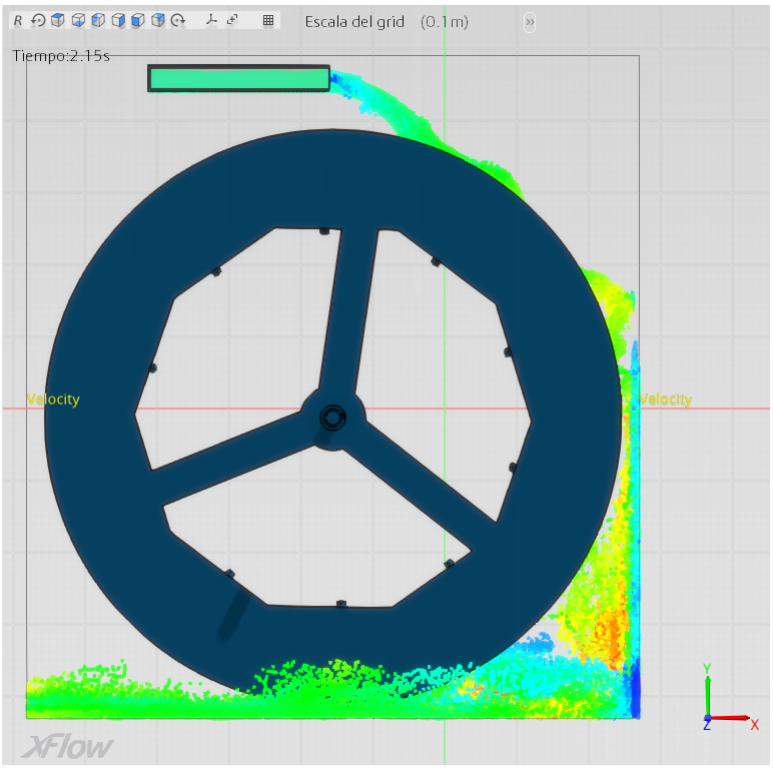


Figura 48. Simulación de rueda hidráulica

Los resultados obtenidos muestran la dinámica de la rueda hidráulica al interactuar con el flujo de agua. Una gráfica generada presenta la velocidad angular de la rueda a lo largo del tiempo, exhibiendo las oscilaciones naturales debido al impacto del flujo.

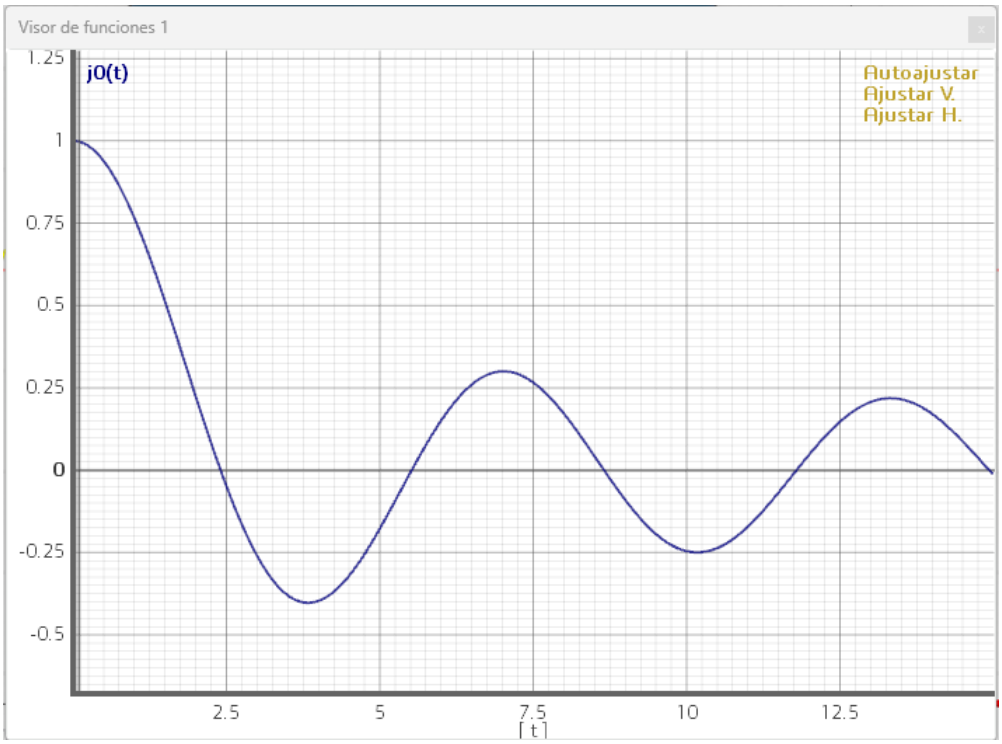


Figura 49. Soporte para ruedas hidráulicas

6.5 Análisis de costos

El costo total del proyecto está conformado por los costos directos e indirectos.

6.5.1 Costos directos

Se considera costos de material, mano de obra y transporte.

Tabla 9. Costo del material para la construcción de rueda hidráulica con cangilones articulados

Descripción	Unidad	Cantidad	Valor U.	Valor Total
Plancha 4x8 3mm (1/8)”	Unidad	2	56.50	113.00
Plancha 4x6 2mm	Unidad	1	37.75	37.75
Plancha galvanizada 1.9mm	Unidad	2	45.24	90.48
Tubo galvanizado de 50x50x2.00x6000mm GB	Unidad	2	24.69	49.38
Perno allen avellanado mm 6x15	Unidad	40	0.086	3.47
Perno allen avellanado mm 6x30	Unidad	30	0.130	3.91
Tornillos cabeza redonda 10x1	Unidad	30	0.017	0.52
Perno allen s/cbz mm6x10 inoxidable	Unidad	4	0.0178	0.71
Perno de acero inoxidable 1/2”x 1 1/2”	Unidad	8	0.565	4.52
Perno de acero inoxidable 1/2”x 1”	Unidad	4	0.478	1.91
Perno allen avellanado mm 6x15	Unidad	20	0.086	1.73
Perno allen inoxidable mm 6x16/12	Unidad	40	0.086	3.47
Tuerca acero inoxidable 1/2	Unidad	4	0.217	0.86
Waipe	Unidad	4	1.565	6.26
Disco de corte 7x 1/16”	Unidad	2	1.44	2.88
Pegatanke epoxi	Unidad	1	4.8695	4.87
Disco Norton	Unidad	2	1.2956	2.59
Rodamientos 6200.2RSC3	Unidad	20	1.00	20
Eje de 1”	Metro	1	6.86	6.86
Lija 80	Unidad	4	0.36	1.43
Lija de hierro	Unidad	4	0.63	2.50
Tubo 1 vapor CD80	Metro	0.6	12.50	7.50
Grilon 15mm	Metro	1.04	7.95	8.27
Chumacera 3/4 204-12	Unidad	4	7.5	30.00
Gasolina extra con etanol	Galones	2.034	2.1434	4.36
Pintura Bucanero sintético mix galon	Galones	1.50	26.66	40.001
Fondo codorthane washprimer 618G-2G	Galones	1	62.6087	62.6087
Diluyente Thinner laca galon - 104SM-50GL	Galones	2	5.2174	10.4348
Total				**522.27**

Tabla 10. Costo por mano de obra para rueda hidráulica con cangilones articulados

Descripción	Valor
Corte láser de placas giratorias internas	50.00
Corte láser de planchas laterales fijas	40.00
Doblado de esquinas para recipiente de agua	30.00
Armado de soporte	20.00
Unión con soldadura MIG CO2	60.00
Torneado de grilon para acoples fijos	45.00
Torneado de grilon para acoples con ruliman	55.00
Lijado, fondeado y pintado	25.00
Total	**325.00**

Tabla 11. Costo por mano de obra para rueda hidráulica con cangilones fijos

Descripción	Valor
Corte láser para placas laterales con decágono centrado	60.00
Armado de soporte	30.00
Soldadura de uniones con MIG CO2	50.00
Perforaciones para empernar cangilones	40.00
Pulir con disco de desbaste	20.00
Lijado fondeado y pintado	25.00
Total	**225.00**

Tabla 12. Costo de maquinaria

Descripción	Valor	Cantidad	Valor U.	Valor Total
Bomba de desplazamiento positivo	Unidad	1	100	100
Total				**100**

Tabla 13. Total de costos directos

Descripción	Valor
Costo de mano de obra (rueda con cangilones articulados)	325
Costo de mano de obra (rueda con cangilones fijos)	225
Costo de maquinaria	100
Costo de materiales	522.27
Total	**1172.27**

6.5.2 Costos indirectos

Tabla 14. Total de costos indirectos

Descripción	Valor
Criterio de ingenieria (10 % del costo directo)	117.22
Imprevistos (5 % del costo directo)	58.61
Total	**175.84**

6.5.3 Costo total de la construcción de prototipo de rueda hidráulica con cangilones articulados

Tabla 15. Total de costos indirectos

Descripción	**Valor**
Costos directos	1172.27
Costos indirectos	175.84
Total	**1348.11**

7. Discusión

En el análisis de los resultados obtenidos, se observan diferencias significativas en el desempeño en términos de torque y potencia, dependiendo del tipo de rueda y el caudal del fluido.

Para el caudal de 14.8 litros/min, la rueda hidráulica con cangilones articulados mostró una potencia máxima de 152.99 W a una velocidad de 133.2 rpm con una fuerza de 18.28 N. Este rendimiento indica que la rueda con cangilones articulados tiene una capacidad destacable para generar potencia a velocidades relativamente altas. Sin embargo, se observa una disminución significativa de la potencia a medida que la velocidad de giro disminuye, a pesar del incremento en la fuerza aplicada. Esto sugiere que esta rueda es más eficiente en el rango de altas velocidades y puede no ser tan efectiva a velocidades más bajas.

Con un caudal reducido de 5.67 litros/min, la potencia máxima observada fue de 6.79 W a una velocidad de 15.7 rpm con una fuerza de 6.88 N. Esta reducción en el caudal resulta en una disminución significativa de la potencia generada, lo que demuestra la dependencia crítica de la rueda con cangilones articulados del caudal para mantener un rendimiento óptimo.

En contraste, para el caudal de 14.8 litros/min, la rueda con cangilones fijos alcanzó una potencia máxima de 152.99 W a una velocidad de 133.2 rpm, con un rendimiento similar al de la rueda con cangilones articulados. Sin embargo, a velocidades más bajas, la rueda con cangilones fijos presenta un comportamiento menos eficiente en comparación con la rueda con cangilones articulados, mostrando una disminución más pronunciada en la potencia a medida que la velocidad disminuye.

Para el caudal de 5.67 litros/min, la potencia máxima registrada fue de 9.38 W a una velocidad de 31.3 rpm. Aunque la potencia máxima es menor en comparación con el caudal alto, la rueda con cangilones fijos todavía muestra un mejor rendimiento relativo bajo condiciones de caudal reducido en comparación con la rueda con cangilones articulados.

En términos generales, la rueda con cangilones articulados demuestra un mejor rendimiento a altas velocidades y caudales altos, con una capacidad de generar mayor potencia en estas condiciones. Sin embargo, su eficiencia disminuye notablemente a velocidades bajas y caudales reducidos. Por otro lado, la rueda con cangilones fijos, aunque muestra un rendimiento menos destacado a altas velocidades y caudales altos, tiende a mantener una mejor eficiencia en condiciones de caudal bajo y velocidades más bajas.

Por lo tanto, la elección entre las dos ruedas hidráulicas dependerá en gran medida

de las condiciones operativas específicas. La rueda con cangilones articulados puede ser más adecuada para aplicaciones que requieren alta potencia a altas velocidades, mientras que la rueda con cangilones fijos podría ser preferible en situaciones donde se espera un caudal bajo o variaciones en la velocidad.

8. Conclusiones

Finalizado el presente trabajo de titulación, se destacan las siguientes conclusiones:

- Se diseñó y construyó un prototipo de rueda hidráulica overshot con cangilones articulados fundamentado en la optimización de la captación de energía, el cual fue comparado con una rueda hidráulica convencional de igual geometría, logrando una mejora en el torque, potencia y eficiencia energética.
- La rueda hidráulica con cangilones articulados muestra un rendimiento notable a un caudal de 14.8 litros/min, alcanzando su potencia máxima de 152.99 W a una velocidad de 133.2 rpm. Este comportamiento demuestra que la rueda es más eficiente en condiciones de alta velocidad y caudal elevado. Sin embargo, al reducirse la velocidad, su capacidad para generar potencia disminuye significativamente. Además, cuando el caudal se reduce a 5.67 litros/min, la rueda disminuye su rendimiento, alcanzando solo 6.79 W a 15.7 rpm, lo que resalta su dependencia de un caudal elevado para mantener un rendimiento óptimo.
- La rueda con cangilones articulados es óptima para aplicaciones que demandan alta potencia en condiciones de caudal elevado y alta velocidad. No obstante, su rendimiento disminuye cuando el caudal se reduce. Por otro lado, la rueda con cangilones fijos, aunque menos eficiente a altas velocidades, ofrece un rendimiento más estable y eficiente en condiciones de caudal bajo, es decir, es más adaptable en escenarios donde el caudal y la velocidad pueden variar.

9. Recomendaciones

Referentes a las conclusiones presentadas, se proponen las siguientes recomendaciones para mejorar la investigación y posteriores trabajos.

- Al momento de realizar el cambio de ruedas en el recipiente, se debe utilizar usar las herramientas correctas para evitar dañar los los diferentes componentes que cumplen con cierta función dentro del mecanismo
- Antes de comenzar el trabajo, asegurarse de realizar un cebado correcto de la bomba para eliminar el aire atrapado y garantizar que la bomba funcione adecuadamente, evitando problemas como el funcionamiento en seco y asegurando un rendimiento óptimo del sistema.
- Para garantizar la durabilidad de las ruedas hidráulicas, que estarán en continuo contacto con el agua, se recomienda utilizar pintura bucanero sintético y fondo Codorthane Washprimer 618G-2G para pintar las piezas. Estos productos protegerán las partes expuestas, evitando el deterioro y prolongando la vida útil de los componentes.
- Se recomienda verificar el cableado de los sensores y la conexión de la bomba para el sistema automático. Esto es esencial para evitar cortocircuitos y daños a los sensores.

Estas recomendaciones pretenden mejorar la investigación, facilitar la implementación práctica de los modelos desarrollados y también su aplicación práctica y continua mejora en entornos operativos reales.

10. Bibliografía

AlphaC, M. (2023). *PROCESOS DE SOLDADURAS*. https://www.alphacmaquinaria.com/procesos-de-soldaduras/

Alternative, E. (2013). *alternative energy tutorial*. http://www.alternative-energytutorials.com/hydro-energy/waterwheel-design.html

Álvarez, J. (1985). *Ingeniería de las Ruedas Hidráulicas*. Editorial Tecnológica.

Anderson, D. (2009). *Ruedas de Agua: Energía desde los Tiempos Antiguos hasta los Días Modernos*. McGraw-Hill.

Andrea Sosa, M. L., Fabián Medina. (2022). *ESFUERZOS PRESENTES EN LAS ESTRUCTURAS* (inf. téc.). https://issuu.com/marialeon211/docs/esfuerzos_en_las_estructuras-comprimido

Ane Miren García Romero, N. M. G. (2018). *INTRODUCCIÓN A LA CIENCIA DE LOS MATERIALES Y SUS PROPIEDADES (I)*. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://ocw.ehu.eus/pluginfile.php/51171/mod_resource/content/0/Tema%206-Comportamiento%20mec%C3%A1nico%20de%20los%20materiales.pdf

Beer, F. P., & Johnston, E. R. (2012). *Mechanics of Materials* (6th). McGraw-Hill.

Budynas R., N. K. (2014). *Física Conceptos y Fundamentos y su Aplicación*. McGraw-Hill. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://ia903102.us.archive.org/33/items/MechanicalEngineeringDesign9th/Mechanical%20Engineering%20Design%209th.pdf

Cardona, Á. A. (1985). La Rueda Hidráulica. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, *38*(2), 13-38.

Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2006). *Thermodynamics: An Engineering Approach* (5th). McGraw-Hill.

Córdova. (2010). Principios de Hidráulica Aplicada. *Revista de Ingeniería Hidráulica*, *8*(2), 120-134.

Córdova, J. (2019). Diseño y Aprovechamiento de Ruedas Hidráulicas en Zonas Rurales de Baja Altura. *Revista Energía y Desarrollo Sostenible*, *12*(3), 145-156.

Coronel, L. F. E. G. (2020). *Guía técnica pedagógica de apoyo bachillerato técnico industrial especialidad: mecánica general* (inf. téc.). chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://aprendizaje.mec.edu.py/dw-recursos/system/materiales_academicos/materiales/000/013/546/original/A-2%C2%BA_CURSO-MECANICA_APLICADA_(1)_2.pdf

De Prony, G. (1821). *Méthode pour mesurer la puissance des machines motrices*. Journal de Physique.

Decker, K. (2013, 11 de agosto). *Vuelta a lo Básico: Hidroenergía Directa*. https://solar.lowtechmagazine.com/es/2013/08/back-to-basics-direct-hydropower/

Dorf, R. C., & Bishop, R. H. (2011). *Modern Control Systems* (12th). Pearson Education.

Eras, D. M. (2004). *Diseño de un sistema eficiente para accionamiento de máquinas hidráulicas de extracción de jugo de caña de azúcar.* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Loja]. https://dspace.unl.edu.ec/jspui/handle/123456789/16440

García, M. (2021). Sustentabilidad y Eficiencia en Ruedas Hidráulicas de Eje Medio. *Revista de Energías Renovables*, *9*(2), 85-96.

Gault, R. S. (1941). *Energía Hidráulica y Molinos de Agua*. Harvard University Press.

Giesecke, E., J. y Mosonyi. (1989). *Desarrollo de la Hidroelectricidad*. Butterworth-Heinemann.

Hall, A. S., Holowenko, A. R., & Laughlin, H. G. (2000). *Diseño de máquinas*. Libros McGraw-Hill.

Jiménez, P. (2020). Implementación de Sistemas Hidráulicos en Comunidades Rurales. *Ingeniería y Sociedad*, *15*(4), 200-212.

Johnson, R. (2020). *Mechanical Devices and Their Applications in Modern Engineering*. McGraw-Hill.

Killedar, J. S. (2012). *Dynamometer: Theory and Application to Engine Testing*. Estados Unidos.

Kolstad, C. (2022). *Tipos de rodamientos y componentes* (inf. téc.). https://tameson.es/pages/guia-completa-de-rodamientos-de-bolas

Kumar, S., & Bansal, R. (2017). *Theory of Machines and Mechanisms*. McGraw-Hill.

Lluscha, M. (2015). *Diseño y construcción de un ariete y de una rueda hidráulica para bombeo de agua en la granja experimental san marcos del hcpp* [Tesis de maestría, ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO]. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/969/1/T-ESPE-027593.pdf

López, J. R. (2013). *Propiedades y Ensayos* (inf. téc.). https://www.juntadeandalucia.es/averroes/centros-tic/21700290/helvia/aula/archivos/repositorio/0/11/html/props.html

López, S. (2020). Aplicaciones de la Energía Hidráulica en el Contexto Rural. *Tecnologías Limpias*, *6*(1), 33-50.

Magazine, G. E. (2024). The Design, Construction, and Use of a Small Prony Brake. *Gas Engine Magazine*. https://www.gasenginemagazine.com/community/farm-shows/the-design-construction-and-use-of-a-small-prony-brake/

McBain, J. W. (1911). Ruedas de Agua y Energía Hidráulica. *Mechanical Engineering Journal*, *42*(3), 123-132.

Molera Solá, P. (1992). *Soldadura industrial: clases y aplicaciones (Vol. 56).* https://es.scribd.com/document/273193750/Soldadura-Industrial-Clases-y-Aplicaciones

Muller, K., G. y Kauppert. (2013). La Eficiencia de las Ruedas de Agua y el Desarrollo Moderno de la Hidroelectricidad. *Renewable Energy*, *36*(5), 1374-1381.

Naranjo C., T. E., Sánchez X. (2015). Estudio de las transformaciones metalográficas y variación de las propiedades mecánicas en juntas soldadas de acero ASTM A588 y A36. *X CONGRESO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA ESPE*.

Ortiz Domínguez, U. A. (2017). *¿Cómo se mide la dureza de un material?* (Inf. téc.). https://www.uaeh.edu.mx/divulgacion-ciencia/dureza-material/index.html

Pinzón., Á. (1977). *Física Conceptos y Fundamentos y su Aplicación*. Tec-CIEN. https://books.google.com.ec/books/about/Fisica_II.html?id=KHclQAAACAAJ&redir_esc=y

Poveda. (2024). *Ficha Técnica del Cangilón Tapco Tipo CC-HD para Elevadores* (inf. téc.) (Proveedor). Poveda. Guayaquil, Ecuador.

Sant'Angelo, G. d. (1995). *Máquinas Hidráulicas y Sistemas Energéticos*. University Press.

Shigley, J., & Budynas, R. (2011). *Mechanical Engineering Design*. McGraw-Hill.

Smith A., J. B. (2018). *Eficiencia de la Rueda Hidráulica Overshot: Un Estudio en Ingeniería Hidráulica* (inf. téc.).

Timoshenko, E. (2004). *Resistencia de Materiales*. Madrid: Thompson. https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2008/1/ME46A/1/material_docente/detalle?id=161213

y K. Reavell, J. G. (2004). *Introducción a la Mecánica de Fluidos*. Wiley.

Zapata., I. J. F. M. S. (2013). *Diseño de elementos de máquinas*. https://www.academia.edu/15515505/Dise%C3%B1o_de_elementos_de_maquinas

11. Anexos

Anexo 1. Planos de ruedas hidráulicas

https://drive.google.com/drive/folders/1S392pjONjwSmPe7SEO43piGkAeeWFNWt?usp=sharing

Anexo 2. Programa Calculadora WheCalc

https://drive.google.com/drive/folders/1idnF2dpdYTC62tsqaTpwqhwRI0sEtaEq?usp=sharing

Anexo 3. Guía de prácticas

https://drive.google.com/drive/folders/13BfHJWMuJsFscUH5w0ERUVwqR3qOcrEL?usp=sharing

Anexo 4. Construcción del Proyecto

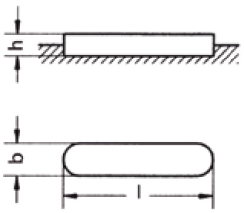
https://drive.google.com/drive/folders/17c0fxtcMLhXjJxU9tE4QrRKIoQ5Iuk_B?usp=sharing

Anexo 5. Tabla de longitud de chaveta según la norma DIN 6885 A.

OPAC COMPONENTS

CHAVETAS
KEYS • CLAVETTES • CHAVETAS

DIN 6885 A



Chaveta paralela de ajuste
Parallel keys
Clavette parallèle d'ajustage
Chaveta paralela de ajuste

Acero C45+C (F-114)
Steel C45+C (F-114)
Acier C45+C (F-114)
Aço C45+C (F-114)

Tolerancia b: h9
b Tolerance: h9
Tolérance b: h9
Tolerância b: h9

Tolerancia h: h9 o h11 según DIN 6880
h Tolerance: h9 or h11 according DIN 6880
Tolérance h: h9 ou h11 suivant DIN 6880
Tolerância h: h9 ou h11 conforme a norma DIN 6880

Resistencia mínima a la tracción: 600 N/mm²
Minimum tensile strenght: 600 N/mm²
Résistance minimum à la rupture: 600 N/mm²
Resistência mínima à tração: 600 N/mm²

- Medidas fuera de norma DIN.
  Dimensions outside DIN standard.
  Dimensions hors norme DIN
  Medidas fora da norma DIN.

INOX También disponibles en stock en acero inoxidable.
We also have stainless steel available in stock.
Également disponible sur stock en inox.
Também disponíveis em estoque em aço inoxidável.

Otras medidas bajo consulta y en stock.
Other dimensions in stock and on request.
Autres dimensions sur demande et en stock.
Outras medidas, disponíveis sob consulta e em estoque.

Las longitudes en negrita son las más utilizadas.
Bold numbers represent the most commonly used lengths.
En noir les dimensions les plus utilisées.
Os comprimentos em negrito são os mais utilizados.

Ref: ?

ejemplo
example
exemple
exemplo

Ref.= 51A - XX - XX - XXX
b h l

DIN 6885 A 8x7x50
Ref. = 51A-8-7-50

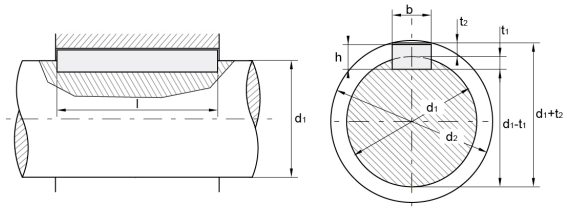
b	2	3	4	5		6		8		10		12		14		16		18		20		22	
h	2	3	4	3	5	4	6	5	7	6	8	6	8	6	9	7	10	7	11	8	12	9	14
	06	06	**08**	12	**10**	14	• **10**	18	• **12**	22	• **14**	28	• **20**	36	• **25**	45	• **30**	50	• **45**	56	• **55**	63	• **60**
	08	**08**	**10**	14	**12**	16	• **12**	20	• **14**	25	• **15**	32	• **22**	40	• **28**	50	• **32**	56	**50**	63	**56**	70	**63**
	10	**10**	**12**	16	**14**	18	**14**	22	• **15**	28	• **16**	36	• **25**	45	• **30**	56	• **35**	63	• **55**	70	• **60**	80	• **65**
	12	**12**	**14**	18	• **15**	20	• **15**	25	• **16**	32	• **18**	40	**28**	50	• **32**	63	• **36**	70	**56**	80	**63**	90	**70**
	14	**14**	• **15**	20	**16**	22	**16**	28	**18**	36	• **20**	45	• **30**	56	• **35**	70	• **40**	80	• **60**	90	• **65**	100	• **75**
	• **15**	• **15**	**16**	22	**18**	25	**18**	32	**20**	40	**22**	50	**32**	63	**36**	80	**45**	90	**63**	100	**70**	110	**80**
	16	**16**	**18**	25	**20**	28	**20**	36	**22**	45	**25**	56	• **35**	70	**40**	90	**50**	100	• **65**	110	• **75**	125	• **85**
	18	**18**	**20**	28	**22**	32	**22**	40	**25**	50	**28**	63	**36**	80	**45**	100	• **55**	110	**70**	125	**80**	140	**90**
	20	**20**	**22**	32	**25**	36	**25**	45	**28**	56	• **30**	70	**40**	90	**50**	110	**56**	125	• **75**	140	• **85**	160	• **95**
	• **22**	**22**	**25**	36	**28**	40	**28**	50	• **30**	63	**32**	80	**45**	100	• **55**	125	• **60**	140	**80**	160	**90**	180	**100**
	• **25**	**25**	**28**	40	• **30**	45	• **30**	56	**32**	70	• **35**	90	**50**	110	**56**	140	**63**	160	• **85**	180	• **95**	200	**110**
	• **28**	**28**	• **30**	45	**32**	50	**32**	63	• **35**	80	**36**	100	• **55**	125	• **60**	160	• **65**	180	**90**	200	**100**	220	• **120**
	• **30**	• **30**	**32**	50	• **35**	56	• **35**	70	**36**	90	**40**	110	**56**	140	**63**	180	**70**	200	• **95**	220	**110**	250	**125**
	• **32**	**32**	• **35**	56	**36**	63	**36**	80	**40**	100	**45**	125	• **60**	160	• **65**		• **75**		**100**		• **120**		• **130**
	• **35**	• **35**	**36**		**40**	70	**40**	90	**45**	110	**50**	140	**63**		**70**		**80**		**110**		**125**		**140**
	• **36**	**36**	**40**		**45**		**45**		**50**		• **55**		• **65**		• **75**		• **85**		• **120**		• **130**		• **150**
			45		**50**		**50**		• **55**		**56**		**70**		**80**		**90**		**125**		**140**		**160**
l			• **50**		• **55**		• **55**		**56**		• **60**		• **75**		• **85**		• **95**		• **130**		• **150**		• **170**
					56		**56**		• **60**		**63**		**80**		**90**		**100**		**140**		**160**		**180**
					• **60**		• **60**		**63**		• **65**		• **85**		• **95**		**110**		• **150**		• **170**		**200**
					• **63**		**63**		• **65**		**70**		**90**		**100**		• **120**		**160**		**180**		**220**
					• **65**		• **65**		**70**		• **75**		• **95**		**110**		**125**		• **170**		**200**		**250**
							70		• **75**		**80**		**100**		• **120**		• **130**		**180**		220		
							• **75**		**80**		• **85**		**110**		**125**		**140**		**200**				
									• **85**		**90**		• **120**		• **130**		• **150**						
									90		• **95**		**125**		**140**		**160**						
									• **95**		**100**		• **130**		• **150**		**180**						
									• **100**		**110**		**140**		**160**		• **200**						
									• **110**		• **120**		• **150**		• **180**								
									• **120**		• **125**		• **160**		• **200**								
									• **125**		• **130**		• **180**										
									• **130**		• **140**												
									• **140**		• **150**												
									• **150**		• **160**												
									• **180**		• **200**												

Anexo 6. Tabla de selección de b y h de chaveta según el catalogo OPAC

OPAC COMPONENTS

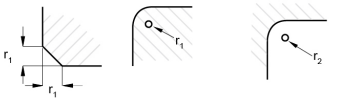
CHAVETAS
KEYS • CLAVETTES • CHAVETAS

Selección de la chaveta paralela DIN 6885
Selection criteria for parallel key DIN 6885
Élection de la clavette parallèle DIN 6885
Seleção da chaveta paralela DIN 6885



Biselado o redondeado
Beveled or squared
Biseauté ou arrondi
Biselado ou arredondado

Chavetero
Keyway
Logement
Rasgo de chaveta



ES EN FR PT

Chavetero del eje
Shaft Keyway
Logement de l'arbre
Rasgo de chaveta do eixo

Chavetero del cubo
Hub Keyway
Logement du moyeu
Rasgo de chaveta do cubo

Asiento fijo
Tight fit
Ajustement serré
Assento fixo

Asiento ligero
Loose fit
Ajustement libre
Assento ligeiro

Con juego en el lomo o apriето
With a set in the groove or blockage
Avec jeu dans la largeur de la rainure ou blocage
Com folga no dorso ou aperto

Con juego en el lomo
With a set in the groove
Avec jeu dans la largeur de la rainure
Com folga no dorso

Con aprieto
With pressure
Avec blocage
Com aperto

dif. adm. Diferencia admisible
Acceptable Difference
Écart accepté
Diferença admissível

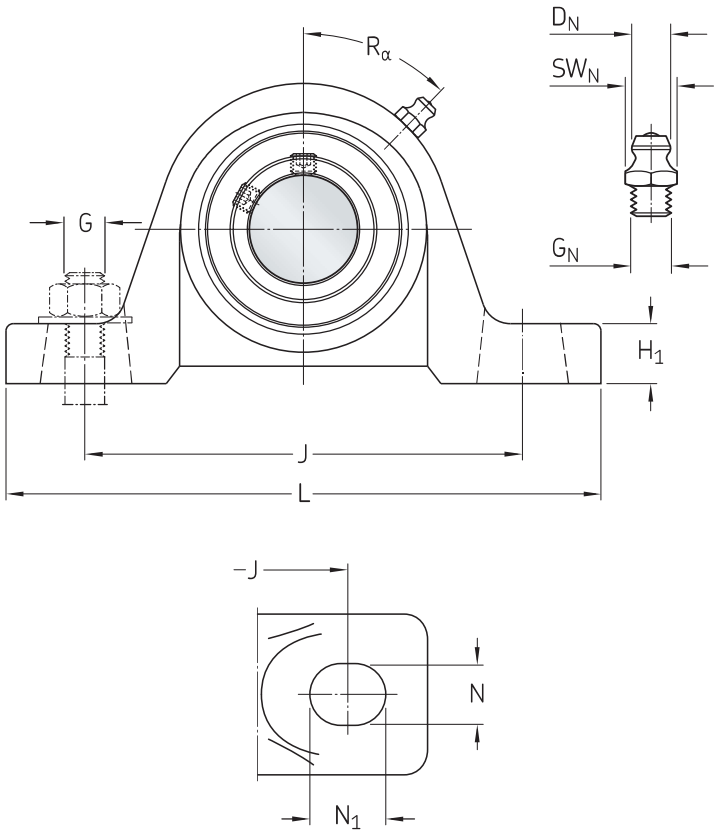
b			2	3	4	5		6		8		10		12		14		16		18		20		22		25		28		32		36		40	45	50	56	63	70	80	90	100
h			2	3	4	3	5	4	6	5	7	6	8	6	8	6	9	7	10	7	11	8	12	9	14	9	14	10	16	11	18	12	20	22	25	28	32	32	36	40	45	50
d1	>		6	8	10	12	12	17	17	22	22	30	30	38	38	44	44	50	50	58	58	65	65	75	75	85	85	95	95	110	110	130	130	150	170	200	230	260	290	330	380	440
	≤		8	10	12	17	17	22	22	30	30	38	38	44	44	50	50	58	58	65	65	75	75	85	85	95	95	110	110	130	130	150	150	170	200	230	260	290	330	380	440	500
Chavetero del eje	b*	asiento fijo P9	2	3	4	5	5	6	6	8	8	10	10	12	12	14	14	16	16	18	18	20	20	22	22	25	25	28	28	32	32	36	36	40	45	50	56	63	70	80	90	100
		asiento ligero N9	2	3	4	5	5	6	6	8	8	10	10	12	12	14	14	16	16	18	18	20	20	22	22	25	25	28	28	32	32	36	36	40	45	50	56	63	70	80	90	100
	t1	con juego en el lomo o apriето	1,2	1,8	2,5	1,9	3	2,5	3,5	3,1	4	3,7	5	3,9	5	4	5,5	4,7	6	4,8	7	5,4	7,5	6	9	6,2	9	6,9	10	7,6	11	8,3	12	13	15	17	20	20	22	25	28	31
		dif. adm.	+0,1	+0,1	+0,1	+0,1	+0,1	+0,1	+0,1	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,3	+0,3	+0,3	+0,3	+0,3	+0,3	+0,3	+0,3	+0,3
Chavetero del cubo	b*	asiento fijo P9	2	3	4	5	5	6	6	8	8	10	10	12	12	14	14	16	16	18	18	20	20	22	22	25	25	28	28	32	32	36	36	40	45	50	56	63	70	80	90	100
		asiento ligero JS9	2	3	4	5	5	6	6	8	8	10	10	12	12	14	14	16	16	18	18	20	20	22	22	25	25	28	28	32	32	36	36	40	45	50	56	63	70	80	90	100
	t2	con juego en el lomo	1	1,4	1,8	1,2	2,3	1,6	2,8	2	3,3	2,4	3,3	2,2	3,3	2,1	3,8	2,4	4,3	2,3	4,4	2,7	4,9	3,1	5,4	2,9	5,4	3,2	6,4	3,5	7,4	3,8	8,4	9,4	10,4	11,4	12,4	12,4	14,4	15,4	17,4	19,5
		dif. adm.	+0,1	+0,1	+0,1	+0,1	+0,1	+0,1	+0,1	+0,1	+0,2	+0,1	+0,2	+0,1	+0,2	+0,1	+0,2	+0,1	+0,2	+0,1	+0,2	+0,1	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,2	+0,3	+0,3	+0,3	+0,3	+0,3	+0,3	+0,3	+0,3	+0,3
		con aprieto	0,5	0,9	1,2	0,8	1,7	1,1	2,2	1,4	2,4	1,8	2,4	1,6	2,4	1,4	2,9	1,7	3,4	1,6	3,4	2	3,9	2,4	4,4	2,2	4,4	2,4	5,4	2,7	6,4	3,0	7,1	8,1	9,1	10,1	11,1	11,1	13,1	14,1	16,1	18,1
		dif. adm.	+0,1	+0,1	+0,1	+0,1	+0,1	+0,1	+0,1	+0,1	+0,2	+0,1	+0,2	+0,1	+0,2	+0,1	+0,2	+0,1	+0,2	+0,1	+0,2	+0,1	+0,2	+0,1	+0,2	+0,1	+0,2	+0,1	+0,2	+0,1	+0,2	+0,1	+0,2	+0,3	+0,3	+0,3	+0,3	+0,3	+0,3	+0,3	+0,3	+0,3
a			-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	3	-	3	-	3,5	-	4	-	4,5	-	5	-	5,5	-	5,5	-	6,5	-	7	-	8	9	10	11	13	13	14	16	18	20
d2 min.	d1 +		2,5	3,5	4	3	5	4	6	5	8	6	8	6	8	6	9	7	11	7	11	8	12	9	14	9	14	10	16	11	18	11,5	21	23	26	28	32	32	36	40	45	50
r1		min.	0,16	0,16	0,16	0,20	0,25	0,40	0,25	0,40	0,25	0,40	0,40	0,50	0,40	0,50	0,40	0,50	0,40	0,50	0,40	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,80	0,60	0,80	0,60	1,00	1,0	1,0	1,0	1,0	1,6	1,6	1,6	2,5	2,5	2,5
		max.	0,25	0,25	0,25	0,30	0,40	0,50	0,40	0,50	0,40	0,50	0,60	0,70	0,60	0,70	0,60	0,70	0,60	0,70	0,60	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	1,10	0,80	1,10	0,80	1,30	1,2	1,2	1,2	1,2	2	2	2	3	3	3
r2		max.	0,16	0,16	0,16	0,20	0,25	0,40	0,25	0,40	0,25	0,40	0,40	0,50	0,40	0,50	0,40	0,50	0,40	0,50	0,40	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,80	0,60	0,80	0,60	1,00	1,0	1,0	1,0	1,0	1,6	1,6	1,6	2,5	2,5	2,5
		min.	0,08	0,08	0,08	0,10	0,16	0,20	0,16	0,20	0,16	0,20	0,25	0,30	0,25	0,30	0,25	0,30	0,25	0,30	0,25	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,50	0,40	0,50	0,40	0,70	0,7	0,7	0,7	0,7	1,2	1,2	1,2	2	2	2

b* Se recomienda para anchuras de chaveteros entallados aternerse a la calidad ISA IT8 en lugar de IT9 (es decir P8 en lugar de P9, N8 en lugar de N9 y JS8 en lugar de JS9).
b For carved keyway widths, adhering to quality ISA IT8 instead of IT9 (P8 instead of P9, N8 instead of N9 and J8 instead of J9) is the recommended practice.*
b* Nous conseillons pour les largeurs des logements usinés d'utiliser la qualité ISA IT8 au lieu de IT9 (c'est-à-dire P8 plutôt que P9, N8 plutôt que N9 et JS8 plutôt que JS9).
b Para larguras de rasgos de chaveta entalhados, recomendamos a utilização da qualidade ISA IT8 em vez de IT9 (ou seja, P8 em vez de P9, N8 em vez de N9 e JS8 em vez de JS9).*

	6 - 28	32 - 80	90 - 400
Tolerancia de la longitud de la chaveta (l) Key Length Tolerance (l) Tolérance de la longueur de la clavette Tolerância do comprimento da chaveta (l)	-0,2	-0,3	-0,5

	6 - 28	32 - 80	90 - 400
Tolerancia de la longitud del chavetero Keyway Length Tolerance Tolérance de la longueur du logement Tolerância do comprimento do rasgo de chaveta	+0,2	+0,3	+0,5

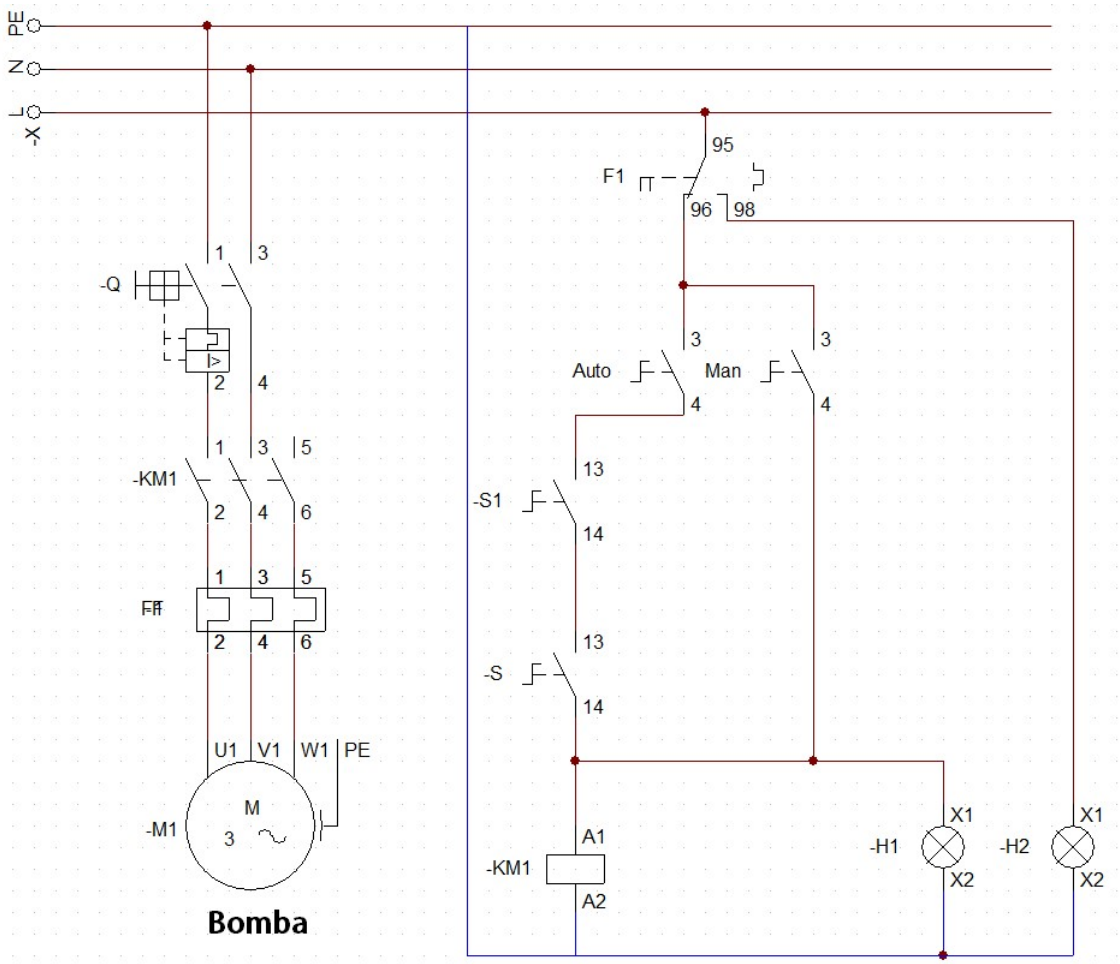
Anexo 7. Tabla de datos de chumaceras



Dimensiones

d	19.05 mm	Diámetro del agujero
d_1	≈ 28.7 mm	Diámetro del resalte del aro interior
A	34 mm	Ancho de la base
A_1	23 mm	Ancho superior
B	31 mm	Ancho del aro interior
B_4	5 mm	Distancia de la cara lateral del dispositivo de fijación al centro de la rosca
H	33.3 mm	Altura del centro del asiento esférico
H_1	13.5 mm	Altura del pie
H_2	64.5 mm	Altura total
J	95 mm	Distancia entre los tornillos de fijación
J	max. 100 mm	Distancia entre los tornillos de fijación

Anexo 8. Planos eléctricos



Anexo 9. Detalles del acero de transmisión AISI 1018

EJES

ACERO DE TRANSMISIÓN

Especificaciones Generales:

Norma: AISI 1018

Descripción: Es un acero de cementación no aleado principalmente utilizado para la elaboración de piezas pequeñas, exigidas al desgaste y donde la dureza del núcleo no es muy importante.

Aplicaciones: Levas uniones, bujes, pines, pivotes, pernos grado 3.

Largo: 6 mts

COMPOSICIÓN QUÍMICA				
%C	%Si	%Mn	%P	%S
0 – 0,20	0 – 0,25	0 – 0,70	0 – 0,04	0 – 05

PROPIEDADES MECÁNICAS			
RESISTENCIA MECÁNICA (N/mm^2)	PUNTO DE FLUENCIA (N/mm^2)	Elongación % Min.	DUREZA ROCKWELL B
410 - 520	235	20	143

DIMENSIONES
DIÁMETRO
3/8”
1/4”
5/8”
3/4”
7/8”
1”
1-1/4”
1-1/2”
1-3/4”
2”
2-1/4”
2-1/2”
2-3/4”
3”
3-1/2”
4”
4-1/2”
5”
6”

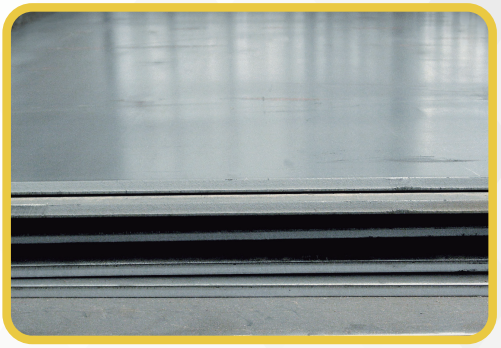
Anexo 10. Detalles de planchas de acero negro laminadas

PLANCHAS

PLANCHAS
LAMINADAS AL CALIENTE

Especificaciones Generales:

Norma:	NTE INEN 115
Espesores:	ASTM A36 - SAE J 403 1008
Espesores:	2mm a 12mm
Rollos:	Ancho 1000, 1220, 1500mm
Planchas:	4 x 8 pies y medidas especiales
Acabado:	Acero Negro



Calidad Comercial

Calidad	Composición Química							Propiedades Mecánicas			
	% C	%MN	%P	%S	%SI	%AL	%CU	Esfuerzo Máximo (Mpa)	Alargamiento %	Doblado 180°	Norma Equivalente
JIS G3131 SPHC	0,08 0,13	0,3 0,6	0,02 max	0,025 max	0,05 max	0,02 0,08	0,2 max	270 min	29 min	0= Oe	SAE 1010 ASTM A-569
SAE 1008	0,03 0,1	0,25 0,5	0,02 max	0,025 max	0,04 max	0,02 0,08	0,2 max				JIS G3132 SPHT1
SAE 1012	0,1 0,15	0,3 0,6	0,02 max	0,025 max	0,03 max	0,02 0,08	0,2 max				ASTM A-635 ASTM A-570 GRADO 33

Calidad Estructural

Norma	Composición Química							Propiedades Mecánicas				
	% C	%MN	%P	%S	%SI	%CU	OTROS	Fluencia (Mpa)	Esfuerzo Máximo (Mpa)	Alarga-miento %	Doblado 180°	Norma Equivalente
ASTM A-588M Grado A	0,19 max	0,8 1,25	0,04 max	0,05 max	0,3 0,6	0,25 0,40	Ni 0,15-0,35 Cr 0,40-0,65 V 0,02-0,10	345 min	485 min	18 min		
ASTM A-283 Grado C	0,12 0,18	0,3 0,6	0,025 max	0,03 max	0,04 max	0,2 max		205 min	380 516 max	25 min	0=1,5e	SAE 1015
JIS G-3101 5541 M	0,17 0,23	0,3 0,6	0,025 max	0,025 max	0,04 max	0,25 max		250 min	400 min 550 max	21 min		SAE 1020 ASTM A-36 ASTM A-570 GRADO 36
A 36	0,25 0,29	0,80 1,2	0,04 max	0,05 max	0,4 max	0,20 max		250 min	400 min 550 max	20 min		
A570-GR50	0,25	1,35 max	0,035 max	0,04 max				340 min	450 min 550 max	17 min	1-1/2e	

Anexo 11. Prototipo final

Anexo 12. Certificación de traducción del resumen

CERTIFICACIÓN DE TRADUCCIÓN

Loja, 11 de noviembre de 2024

Lic. Viviana Valdivieso Loyola Mg. Sc.
DOCENTE DE INGLÉS

A petición verbal de la parte interesada:

CERTIFICA:

Que, desde mi legal saber y entender, como profesional en el área del idioma inglés, he procedido a realizar la traducción del resumen, correspondiente al Trabajo de Integración Curricular, titulado: **Diseño y construcción de un prototipo de rueda hidráulica tipo overshot con cangilones articulados**, de la autoría de: **Alan Stiven Cabezas Tenesaca**, portador de la cédula de identidad número **1104178494**.

Para efectos de traducción se han considerado los lineamientos que corresponden a un nivel de inglés técnico, como amerita el caso.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad, facultando al portador del presente documento, hacer uso del mismo, en lo que a bien tenga.

Atentamente,

Firmado electrónicamente por:
VIVIANA DEL CISNE
VALDIVIESO LOYOLA

Lic. Viviana Valdivieso Loyola Mg. Sc.
1103682991

N° Registro Senescyt 4to nivel **1031-2021-2296049**
N° Registro Senescyt 3er nivel **1008-16-1454771**