



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECÁNICA
CARRERA MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

**“REPOTENCIACIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS DE LA
TURBINA KAPLAN DE FLUJO AXIAL DEL LABORATORIO DE
TURBOMAQUINARIA HIDRÁULICA DE LA FACULTAD DE
MECÁNICA”**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO EN MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

AUTORES:

CRISTHIAN GEOVANNY LÓPEZ GARCÍA

JHEFERSON IVÁN PUMA RIOFRÍO

Riobamba – Ecuador

2022



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECÁNICA
CARRERA MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

**“REPOTENCIACIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS DE LA
TURBINA KAPLAN DE FLUJO AXIAL DEL LABORATORIO DE
TURBOMAQUINARIA HIDRÁULICA DE LA FACULTAD DE
MECÁNICA”**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO EN MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

AUTORES: CRISTHIAN GEOVANNY LÓPEZ GARCÍA

JHEFERSON IVÁN PUMA RIOFRÍO

DIRECTOR: Ing. CÉSAR MARCELO GALLEGOS LONDOÑO

Riobamba – Ecuador

2022

© 2022, Cristhian Geovanny López García y Jheferson Iván Puma Riofrío

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Nosotros, CRISTHIAN GEOVANNY LÓPEZ GARCÍA Y JHEFERSON IVÁN PUMA RIOFRÍO, declaramos que el presente Trabajo de Integración Curricular es de nuestra autoría y los resultados de este son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autores asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación; El patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 08 de junio del 2022



Cristhian Geovanny López García
C.I: 060511451-1



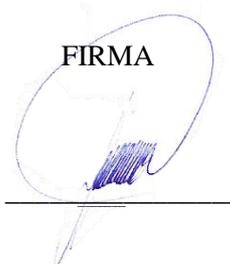
Jheferson Iván Puma Riofrío
C.I: 060462922-0

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECÁNICA
CARRERA MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El trabajo del Integración Curricular; Tipo: Proyecto Técnico, **REPOTENCIACIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS DE LA TURBINA KAPLAN DE FLUJO AXIAL DEL LABORATORIO DE TURBOMAQUINARIA HIDRÁULICA DE LA FACULTAD DE MECÁNICA**, realizado por el señores: **CRISTHIAN GEOVANNY LÓPEZ GARCÍA** y **JHEFERSON IVÁN PUMA RIOFRÍO**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

Ing. Marco Antonio Ordóñez Viñán
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

FIRMA



FECHA

2022-06-08

Ing. César Marcelo Gallegos Londoño
**DIRECTOR DE TRABAJO
DE INTEGRACIÓN CURRICULAR**



2022-06-08

Ing. Pablo Ernesto Montalvo Jaramillo
MIEMBRO DE TRIBUNAL



2022-06-08

DEDICATORIA

El presente trabajo de integración curricular, dedico a mi madre Sara Inés García Hernández quien me apoya incondicionalmente y me ha inculcado los valores a lo largo de mi preparación académica, ha sido el pilar fundamental de mi vida, a mi familia que siempre ha aportado con un granito de arena para alcanzar el éxito en mi vida personal y profesional.

Cristhian Geovanny López García

El presente trabajo de integración curricular, decido a Dios quien me acompaña y me bendice cada día, a mis padres Fernando Puma y María Riofrío, que me han inculcado valores a lo largo de mi preparación académica, han sido un apoyo incondicional, a mis hermanos Erik y Henry, que de una u otra manera me han brindado su apoyo incondicional, a mis familiares y amigos que me brindaron su apoyo y depositaron su confianza para alcanzar mi meta propuesta.

Jheferson Iván Puma Riofrío

AGRADECIMIENTO

Agradezco en primer lugar a Dios que por medio de la fe me ayudo a alcanzar todos mis objetivos desde el inicio de la carrera.

Agradezco a mi madre y a mi hermano que me han enseñado a nunca darme por vencido y afrontar los errores sin importar cual sea, agradezco profundamente por inculcarme los valores para definir la persona que soy el día de hoy y que con esfuerzo y dedicación se puede alcanzar.

A mi familia y amigos por nunca dejarme solo en los momentos más difíciles de mi vida, por brindarme su apoyo y enseñarme cada día que la unión hace la fuerza.

Cristhian Geovanny López García

Agradezco en primer lugar a Dios por brindarme salud y vida, bendiciéndome en todo momento para alcanzar mis metas propuestas desde el inicio de la carrera.

A mis padres y hermanos que me han enseñado a nunca darme por vencido, que, a pesar de los tropiezos saber levantarse con la frente en alto, que con esfuerzo y dedicación se puede alcanzar lo deseado, agradezco profundamente el apoyo incondicional que me han compartido durante mi vida institucional.

A mi familia y amigos, por los momentos, enseñanzas y experiencias compartidas en los buenos y malos momentos que han surgido en el transcurso de este tiempo de formación académica.

Así también agradezco a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en especial a mi querida Escuela de Ingeniería de Mantenimiento, que por medio de sus docentes he obtenido conocimientos necesarios para desarrollarme como profesional y como persona, un agradecimiento especial a los docentes miembros del tribunal por brindarme su apoyo en el desarrollo de este proyecto para que se desarrolle de mejor manera.

Jheferson Iván Puma Riofrío

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xiv
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xv
RESUMEN.....	xvi
SUMMARY.....	xvii
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPÍTULO I

1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA.....	2
1.1. Antecedentes.....	2
1.2. Justificación y actualidad.....	2
1.3. Planteamiento de problema.....	3
1.4. Objetivos.....	4
1.4.1. <i>Objetivo general</i>	4
1.4.2. <i>Objetivos específicos</i>	4

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Turbina hidráulica.....	5
2.2. Turbina Kaplan.....	5
2.2.1. <i>Características de la turbina Kaplan</i>	6
2.2.2. <i>Clasificación de la turbina Kaplan</i>	6
2.2.3. <i>Componentes de la turbina Kaplan</i>	7
2.2.3.1. <i>Tubo de aspiración</i>	8
2.2.3.2. <i>Cámara de alimentación</i>	8
2.2.3.3. <i>Distribuidor</i>	9
2.2.3.4. <i>Rodete de la turbina</i>	9
2.2.4. <i>Parámetros de funcionamiento de la turbina Kaplan</i>	10
2.2.4.1. <i>Velocidad específica (N_s)</i>	10
2.2.4.2. <i>Número de revoluciones, n(rpm)</i>	10
2.2.4.3. <i>Caudal de agua disponible Q (m^3/s)</i>	11

2.2.4.4.	<i>Cabeza manométrica o altura neta (Hm)</i>	11
2.2.4.5.	<i>Potencias</i>	12
2.2.4.6.	<i>Eficiencia</i>	13
2.3.	Bombas hidráulicas	13
2.3.1.	<i>Bomba axial</i>	13
2.3.2.	<i>Principales cantidades por medir</i>	14
2.3.2.1.	<i>Cantidades fundamentales</i>	14
2.3.2.2.	<i>Cantidades derivadas</i>	14
2.4.	Instrumentación del banco de pruebas	15
2.4.1.	<i>Medidor de presión</i>	15
2.4.1.1.	<i>Manómetros</i>	15
2.4.2.	<i>Medidor de caudal</i>	16
2.4.2.1.	<i>Válvula de compuerta</i>	16
2.4.3.	<i>Medidor de velocidad</i>	16
2.4.3.1.	<i>Velocidad angular</i>	16
2.4.3.2.	<i>Tacómetro</i>	17
2.4.4.	<i>Medidor de fuerza</i>	17
2.4.4.1.	<i>Fuerza</i>	17
2.4.4.2.	<i>Centro de carga</i>	18
2.5.	Descripción de datos e instrumentos utilizados para la automatización	18
2.5.1.	<i>Software LabVIEW</i>	19
2.5.2.	<i>Sensor transductor</i>	19
2.5.3.	<i>Adquisición de datos utilizando LabVIEW</i>	20
2.5.4.	<i>Arduino nano</i>	21
2.6.	Diagnóstico técnico de máquinas hidráulicas	21
2.6.1.	<i>Diagnóstico de averías en máquinas hidráulicas</i>	21
2.6.2.	<i>Detección de fallas y averías en bombas centrífugas</i>	22
2.6.2.1.	<i>La bomba está encendida pero no hay suministro de agua</i>	22
2.6.2.2.	<i>Caudal insuficiente</i>	22
2.6.2.3.	<i>Sobre carga en el motor</i>	22
2.6.2.4.	<i>Presión de la bomba insuficiente</i>	22
2.6.2.5.	<i>Falla prematura de sellos o empaques</i>	23
2.6.3.	<i>Corrosión</i>	23
2.6.3.1.	<i>Corrosión por picadura</i>	23
2.6.3.2.	<i>Control de la corrosión</i>	23
2.6.4.	<i>Cavitación</i>	24
2.6.4.1.	<i>Control de la cavitación</i>	24

2.7.	Mantenimiento de la turbina Kaplan	24
2.7.1.	<i>Mantenimiento industrial</i>	24
2.7.2.	<i>Mantenimiento turbina Kaplan</i>	25
2.7.2.1.	<i>Trabajos de lubricación.....</i>	25
2.7.2.2.	<i>Trabajos de mantenimiento resultante del servicio</i>	25
2.7.2.3.	<i>Revisiones.....</i>	25
2.7.2.4.	<i>Controles funcionales.....</i>	26
2.7.3.	<i>Actividades de mantenimiento de elementos principales de la turbina</i>	26
2.7.3.1.	<i>Turbina.....</i>	26
2.7.3.2.	<i>Rodete</i>	26
2.7.3.3.	<i>Foso de la turbina</i>	26
2.7.3.4.	<i>Tobera</i>	26
2.7.3.5.	<i>Válvula principal.....</i>	27

CAPÍTULO III

3.	REPOTENCIACIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS	28
3.1.	Contexto operacional del banco de pruebas.....	28
3.1.1.	<i>Ficha técnica y características del banco de pruebas.....</i>	28
3.2.	Estado técnico de los equipos del banco de pruebas de la turbina Kaplan	29
3.3.	Estado técnico del sistema mecánico del banco de pruebas.....	29
3.3.1.	<i>Estado inicial de los componentes mecánicos del banco de pruebas.....</i>	31
3.3.1.1.	<i>Estado inicial de la bomba axial.....</i>	31
3.3.1.2.	<i>Estado inicial de la turbina Kaplan</i>	31
3.3.1.3.	<i>Centro de carga en la bomba axial.....</i>	32
3.4.	Estado técnico del sistema electrónico del banco de pruebas	33
3.4.1.	<i>Estado inicial de los componentes electrónicos del banco de pruebas</i>	34
3.4.1.1.	<i>Transductor de presión en la bomba axial.....</i>	34
3.4.1.2.	<i>Transductor de presión turbina Kaplan.....</i>	34
3.4.1.3.	<i>Tarjeta electrónica de acoplamiento para sensores de proximidad.....</i>	35
3.4.1.4.	<i>Sensor de proximidad en la bomba axial.....</i>	35
3.4.1.5.	<i>Sensor de proximidad en la turbina Kaplan</i>	36
3.4.1.6.	<i>Panel de adquisición de datos</i>	36
3.5.	Estado técnico del sistema eléctrico del banco de pruebas	37
3.5.1.	<i>Tablero de control de velocidad.....</i>	38
3.5.2.	<i>Motor eléctrico</i>	38
3.5.3.	<i>Cableado eléctrico.....</i>	39

3.6.	Evaluación de la interfaz del software LabVIEW del banco de pruebas	39
3.6.1.	<i>Bomba axial</i>	39
3.6.2.	<i>Turbina Kaplan</i>.....	40
3.7.	Criterios para la selección de la turbina.....	41
3.7.1.	<i>Determinación de la velocidad específica(ns)</i>.....	41
3.7.2.	<i>Determinación de velocidad angular(n)</i>	42
3.7.3.	<i>Determinación de la potencia útil (Pu)</i>	43
3.7.4.	<i>Determinación del caudal requerido</i>.....	44
3.8.	Actividades de mantenimiento.....	44
3.8.1.	Mantenimiento de los elementos del banco de pruebas.....	44
3.8.1.1.	<i>Válvula de compuerta</i>	44
3.8.1.2.	<i>Tablero de control de velocidad</i>.....	47
3.8.1.3.	<i>Tanque de almacenamiento</i>	48
3.8.1.4.	<i>Unión entre la bomba y la tubería de succión</i>	49
3.8.1.5.	<i>Hélice directriz de la bomba axial</i>	51
3.8.1.6.	<i>Cañerías de nivel de fluido del banco de pruebas</i>	53

CAPÍTULO IV

4.	PROCESO DE ANÁLISIS DE RESULTADOS	55
4.1.	Pruebas de funcionamiento.....	55
4.1.1.	<i>Prueba Motor-Bomba</i>	55
4.1.2.	<i>Prueba en la unión de la bomba</i>	55
4.1.3.	<i>Pruebas de funcionamiento de los instrumentos</i>	56
4.1.3.1.	<i>Manómetros</i>.....	56
4.1.3.2.	<i>Tacómetros</i>.....	56
4.1.3.3.	<i>Base sensor de peso turbina Kaplan</i>.....	57
4.1.4.	<i>Pruebas en la Turbina</i>	58
4.2.	Actualización de la interfaz de comunicación del software LabVIEW	59
4.3.	Ensayos en el banco de pruebas de la turbina Kaplan.....	60
4.3.1.	<i>Bomba axial</i>	60
4.3.1.1.	<i>Cálculo del caudal</i>.....	61
4.3.1.2.	<i>Cabeza manométrica</i>.....	62
4.3.1.3.	<i>Potencia útil o hidráulica (Pu)</i>.....	63
4.3.1.4.	<i>Potencia de accionamiento (Pa)</i>	63
4.3.1.5.	<i>Eficiencia total (η)</i>.....	64
4.3.2.	<i>Reportes de datos</i>	64

4.3.3. Turbina Kaplan.....	67
4.3.3.1. Altura neta o salto (H_n).....	67
4.3.3.2. Caudal (Q).....	68
4.3.3.3. Potencia útil.....	69
4.3.3.4. Potencia hidráulica.....	69
4.3.3.5. Rendimiento total.....	70
4.3.4. Reportes de datos.....	70
4.4. Análisis de costos.....	73
4.4.1. Costos directos.....	73
4.4.2. Costos indirectos.....	74
4.4.3. Destino del proyecto.....	74
4.5. Elaboración de procedimientos de mantenimiento.....	75
4.5.1. Elaboración de diagrama de procesos.....	75
CONCLUSIONES.....	77
RECOMENDACIONES.....	78
BIBLIOGRAFÍA	
ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-2:	Clasificación de las turbinas según su velocidad específica.....	6
Tabla 2-2:	Revisión periódica.....	25
Tabla 1-3:	Ficha técnica del banco de pruebas de la turbina Kaplan.....	28
Tabla 2-3:	Tolerancias del estado técnico.....	29
Tabla 3-3:	Estado técnico del sistema mecánico del banco de pruebas.....	30
Tabla 4-3:	Estado técnico del sistema electrónico del banco de pruebas.....	33
Tabla 5-3:	Estado técnico del sistema eléctrico del banco de pruebas.....	37
Tabla 6-3:	Rango de velocidad específica.....	42
Tabla 1-4:	Datos y cálculos de la bomba axial, apertura de 15°-30 ° y válvulas al 50%....	65
Tabla 2-4:	Datos y cálculos de la bomba axial, apertura de 15°-60 ° y válvulas al 50%....	66
Tabla 3-4:	Datos y cálculos de la turbina Kaplan, apertura de 15°-30° y válvulas al 50%.	71
Tabla 4-4:	Datos y cálculos de la bomba axial, apertura de 15°-60 ° y válvulas al 50%....	72
Tabla 5-4:	Costos directos sistema eléctrico/electrónico.....	73
Tabla 6-4:	Costos directos del sistema mecánico/hidráulico.....	73
Tabla 7-4:	Costos indirectos de los elementos adicionales.....	74
Tabla 8-4:	Diagrama de procesos.....	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-2:	Turbina Kaplan.....	6
Figura 2-2:	Componentes de la turbina Kaplan.....	7
Figura 3-2:	Tubo de aspiración	8
Figura 4-2:	Carcasa espiral de la turbina Kaplan	8
Figura 5-2:	Distribuidor Fink	9
Figura 6-2:	Rodete de la turbina Kaplan	9
Figura 7-2:	Normas internacionales para la determinación de la cabeza manométrica	12
Figura 8-2:	Bomba axial.....	13
Figura 9-2:	Manómetro de 0-200 PSI	15
Figura 10-2:	Válvula de compuerta.....	16
Figura 11-2:	Tacómetro Turbina Kaplan	17
Figura 12-2:	Celda de carga	18
Figura 13-2:	Interfaz software LabVIEW	19
Figura 14-2:	Interpretación de datos	20
Figura 15-2:	Esquema descriptivo de la adquisición de datos	20
Figura 16-2:	Arduino nano.....	21
Figura 17-2:	Corrosión por picaduras en los álabes	23
Figura 18-2:	Cavitación en los álabes	24
Figura 1-3:	Bomba axial.....	31
Figura 2-3:	Turbina Kaplan.....	32
Figura 3-3:	Celda de carga bomba axial.....	32
Figura 4-3:	Transductores de presión en la bomba axial.....	34
Figura 5-3:	Transductor de presión de la turbina	34
Figura 6-3:	Tarjeta de acople para sensor de proximidad	35
Figura 7-3:	Sensor de proximidad en la bomba axial.....	35
Figura 8-3:	Sensor de proximidad en el tambor de freno.....	36
Figura 9-3:	Panel de adquisición de datos banco de pruebas	36
Figura 10-3:	Tablero de control y relé de sobrecarga	38
Figura 11-3:	Conexión de motor-bomba.....	38
Figura 12-3:	Estado de las conexiones y cableado eléctrico	39
Figura 13-3:	Panel frontal de la bomba axial	40
Figura 14-3:	Panel frontal de la turbina Kaplan	41
Figura 15-3:	Parte superior de la válvula	45
Figura 16-3:	Partes de la válvula extraídas	45

Figura 17-3:	Despiece de la parte superior de la válvula	46
Figura 18-3:	Mantenimiento de la válvula	47
Figura 19-3:	Sistema de control eléctrico	47
Figura 20-3:	Relé de sobrecarga.....	48
Figura 21-3:	Mantenimiento del tanque	48
Figura 22-3:	Mirilla de nivel del agua.....	49
Figura 23-3:	Acrílico nuevo del nivel de agua	49
Figura 24-3:	Unión de asbesto fracturada	50
Figura 25-3:	Hélices de la bomba axial.....	50
Figura 26-3:	Limpieza y cambio de empaques	50
Figura 27-3:	Tubo de unión del cuerpo de la bomba a la tubería.....	51
Figura 28-3:	Construcción de la unión de la bomba a la tubería.....	51
Figura 29-3:	Hélice de la bomba axial	52
Figura 30-3:	Mantenimiento en la hélice	52
Figura 31-3:	Montaje de los componentes de la hélice	53
Figura 32-3:	Visualización de las cañerías a cambiar	53
Figura 33-3:	Cañerías de nivel de fluido.....	54
Figura 1-4:	Conexión eléctrica del motor -bomba	55
Figura 2-4:	Corrección de fugas detectadas.	56
Figura 3-4:	Manómetros instalados en la bomba axial.....	56
Figura 4-4:	Tacómetro de la turbina.....	57
Figura 5-4:	Funcionamiento de la turbina	58
Figura 6-4:	Interfaz de programación banco de pruebas turbina Kaplan	59
Figura 7-4:	Diagrama de bloques	60

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfica 1-4:	Base sensor de peso.....	57
Gráfica 2-4:	Medidas para la elaboración de la base metálica.....	58
Gráfica 3-4:	Curvas características de la bomba axial 15°-30°	65
Gráfica 4-4:	Curvas características de la bomba axial 15 °-60°	66
Gráfica 5-4:	Curvas características de la turbina Kaplan 15 °-30 °	71
Gráfica 6-4:	Curvas características de la bomba axial 15°-60°	72

ÍNDICE DE ANEXOS

- Anexo A:** Rugosidad Relativa para Tubos de Materiales Comunes
- Anexo B:** Diagrama de Moody
- Anexo C:** Coeficientes de gasto, orificios y compuertas
- Anexo D:** Diseño SolidWorks, base para el sensor de peso
- Anexo E:** Sistema de adquisición de datos

RESUMEN

El presente proyecto de integración curricular tuvo como objetivo la repotenciación del banco de pruebas de la turbina Kaplan de flujo axial del Laboratorio de Turbomaquinaria Hidráulica de la Facultad de Mecánica. Para lo cual se desarrolló el diagnóstico técnico de las fallas siguiendo los lineamientos de la Norma UNE-EN 60706-3, que permitió definir los parámetros de automatización, mantenimiento preventivo y correctivo. La repotenciación se llevó a cabo mediante la aplicación de metodologías anticorrosivas de acuerdo con los lineamientos de la Norma ISO 12944, por lo que se aplicó barniz anticorrosivo al sistema hidráulico del banco de pruebas y la Norma ASTM E 165-18 que sustenta la aplicación de ensayos no destructivos bajo la metodología de líquidos penetrantes. Posteriormente se realizó la calibración y el mantenimiento correctivo y preventivo de partes y accesorios. Se ejecutaron cálculos para la comprobación de los equipos, obteniendo una velocidad específica de 733, una velocidad angular de 820,15 rpm, con una potencia útil de 16,18 kW, a un caudal de 809 l/s para una altura de 1 metro. Para la automatización se utilizó el software LabVIEW versión 2017 que facilitó la operación del sistema. Se concluye que el banco de pruebas cumple con su función requerida y que la aplicación de parámetros de automatización permite la recolección y el proceso de variables a ser medidas. Por tanto se recomienda al técnico encargado del laboratorio, revisar el manual de operaciones para la puesta en marcha y mantenimiento del equipo, además, manipular con cuidado partes, elementos y panel de control para evitar problemas en su funcionamiento

Palabras clave: <PARÁMETROS DE AUTOMATIZACIÓN>, <DIAGNOSTICO TÉCNICO DE LAS FALLAS>, <REPOTENCIACIÓN>, <METODOLOGÍAS ANTICORROSIVAS >, <LABVIEW(SOFTWARE)>.

1465-DBRA-UTP-2022



SUMMARY

This project's objective was to repower the turbine Kaplan tests bank of the axial flow of turbomachinery Hydraulics Laboratory of Mechanics Faculty. For this, the faults technical diagnosis following the Rule UNE-EN 60706-3 guidelines was developed, which allowed defining the parameters of automation, and preventive and corrective maintenance. The repowering was carried out through the application of anticorrosive methodologies according to the Rule ISO 12944 guidelines. For this reason, the anticorrosive varnish was applied to the tests bank hydraulic system, and the Rule ASTM and 165-18 sustains the application of no destructive essays by the methodology of liquids penetrating — subsequently, the calibration and the corrective and preventive maintenance of parts and accessories. Calculations were executed for the verification of the equipment, getting a speed specific of 733, a speed angular of 820.15 rpm, with a useful power of 16.18 kW, and a flow of 809 l/s for a height of 1 meter. For the automation, LabVIEW software version 2017 was used. It facilitated the system operation. It is concluded that the test banks met. It is concluded that the test banks fulfill their required function and that the application of automation parameters allows the collection and processing of variables to be measured. Therefore, the technician in charge of the laboratory recommended reviewing the operations manual for the start-up and maintenance of the equipment. In addition, to carefully handle parts, elements, and the control panel to avoid problems in its operation.

Keywords: <REPOWER> <TEST BANK> <PARAMETERS OF AUTOMATION> <ANTICORROSIVE METHODOLOGIES> <LABVIEW (SOFTWARE)>.



Lcda. Sandra Leticia Guijarro P. Mgs
C.I.: 0603366113

INTRODUCCIÓN

Para mejorar la calidad de producción en la industria ecuatoriana, la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo propone la carrera de Ingeniería de Mantenimiento, cuyo propósito es formar profesionales capaces de afrontar los desafíos e incursionar en el campo laboral, proponiendo proyectos de mantenimiento, como una herramienta eficaz, que garanticen la sostenibilidad de las empresas.

Con el avance de la tecnología, es necesario que las universidades cuenten con laboratorios de calidad totalmente equipados para garantizar el aprendizaje de los estudiantes, permitiendo mejorar las habilidades y conocimientos para su desempeño en el campo laboral.

El objetivo principal de las turbinas hidráulicas es la producción de energía eléctrica, el presente trabajo de integración curricular presenta el estudio de la turbina Kaplan, su funcionamiento se basa en dar pequeños saltos a grandes caudales. Su estructura se asemeja a la hélice de un barco, las turbinas funcionan en un solo sentido de rotación.

Al ver la necesidad de mejorar el aprendizaje de las centrales eléctricas se decidió implementar un banco de pruebas de la turbina Kaplan en el laboratorio de Turbomaquinaria Hidráulica de la Facultad de Mecánica de la ESPOCH, de tal manera que se pueda realizar los estudios necesarios para comprobar el funcionamiento adecuado de dicha turbina, obteniendo curvas características, experimentando diversas situaciones.

CAPÍTULO I

1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA

1.1. Antecedentes

La Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo cuenta con diversos laboratorios para la formación profesional de los estudiantes, varios de los mismos tienen décadas de funcionamiento sin un correcto mantenimiento, por lo que sus equipos han disminuido en su disponibilidad y operatividad, este es el caso del laboratorio de Turbomaquinaria Hidráulica, por lo que se ha visto en la necesidad de la repotenciación de los bancos de pruebas, aplicando diversas metodologías de diagnóstico técnico, permitiéndonos así establecer cuál es el estado de los mismos. La aplicación de las técnicas generará mayor fiabilidad y disponibilidad de los equipos o sistemas para llegar a un óptimo funcionamiento.

Para este estudio se considerará el banco de pruebas de la turbina Kaplan, la turbina es considerada flujo axial posee un rodete que funciona de manera similar al motor de un barco, su nombre se debe al ingeniero Viktor Kaplan (1876 – 1934), profesor de la Universidad Técnica de Bruno (Checoslovaquia). A inicios del siglo las turbinas hidráulicas solo podían trabajar para lo que están diseñadas. Pero con el avance de la tecnología, la construcción de la turbina Kaplan fue sustituyendo a la turbina Francis debido a que se puede trabajar con cargas elevadas y no solo con cargas medias como en un inicio se creía, dando así un salto a la modernización. Las turbinas Kaplan y Hélice son idóneas para trabajar de manera horizontal como vertical debido a que pueden dar pequeños saltos con grandes caudales obteniendo así un excelente rendimiento, de esta manera pueden llegar a obtener velocidades específicas n_s mayores de 450 a diferencia de las turbinas Francis que solo pueden obtener n_s de 400 para este caso el fluido no se puede conducir con precisión.

El laboratorio de Turbomaquinaria Hidráulica de la Facultad de Mecánica tiene como objetivo que los estudiantes practiquen, analicen y comprendan el funcionamiento y el comportamiento de las diferentes turbomáquinas que existen en el laboratorio.

1.2. Justificación y actualidad

La Turbomaquinaria Hidráulica es utilizada por el sector estudiantil, principalmente para el estudio y práctica de laboratorio de los estudiantes, por ende, se ve en la necesidad de habilitar el

banco de pruebas que existe en laboratorio de la Facultad de Mecánica, que con el pasar del tiempo y debido a su utilización se ha deteriorado y se encuentra inoperativa.

Con la finalidad de que los estudiantes de la facultad y la comunidad politécnica tenga la oportunidad de conocer su funcionamiento, analizar su rendimiento, determinar el caudal, obtener gráficas de comportamiento, se propone habilitar el banco de pruebas de la turbina Kaplan y dejarlo funcionando En el banco de pruebas existen algunos componentes útiles y otros obsoletos, que serán sustituidos por otros operativos.

La turbina Kaplan se caracteriza por sus álabes orientables y eso hace que el caudal de fluido gire las hélices de adentro hacia afuera en dirección axial con respecto al eje de rotación de la hélice el cual es similar a la hélice de un barco. La importancia de este tipo de turbina radica en su gran caudal para pequeños saltos de altura, es por ello por lo que se presenta un estudio para este tipo de turbina basándose en condiciones específicas de caudal y altura de esta manera se puede realizar un análisis tanto teórico como técnico. Para ello se requiere las características principales del banco de prueba lo cual servirá para poder determinar los valores de velocidad específica, número de revoluciones. potencia de operación y el caudal de trabajo. (FERNÁNDEZ, 2015 pág. 1)

1.3. Planteamiento de problema

La Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, cuenta con el laboratorio de Turbomaquinaria Hidráulica, donde existen diferentes bancos de pruebas que por el momento se encuentran inoperativos entre ellos el banco de pruebas de la turbina Kaplan.

Durante la primera inspección realizada se determinó que la turbina Kaplan del laboratorio de Turbomaquinaria Hidráulica de la Facultad de Mecánica presenta averías en la válvula de cierre, fugas en la bomba axial, desconfiguración en la interfaz del software LabVIEW y presencia de corrosión en la línea de succión, línea de descarga y en el tanque de almacenamiento, además ciertos puntos se encuentra en malas condiciones eléctricas, electrónicas y mecánicas, estos factores intervienen de manera directa en el rendimiento del banco de pruebas, dificultando el aprendizaje estudiantil.

Se propone realizar la repotenciación del banco de pruebas, aplicando diversas técnicas de diagnóstico técnico, se incluirá un manual de mantenimiento en donde se detallará con exactitud los pasos necesarios a seguir para ejecutar una correcta técnica de mantenimiento predictivo, la aplicación de las técnicas generará mayor fiabilidad y disponibilidad a los equipos o sistemas para llegar un óptimo funcionamiento, para que de esta manera las futuras generaciones de estudiantes

puedan beneficiarse, al contar con un laboratorio funcional y poder adquirir conocimiento y habilidades necesarias para hacer frente a la problemática de las industrias en la actualidad.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Repotenciar el banco de pruebas de la turbina Kaplan de flujo axial del laboratorio de Turbomaquinaria Hidráulica de la Facultad de Mecánica.

1.4.2. Objetivos específicos

Evaluar el estado técnico actual del banco de pruebas mediante métodos de diagnóstico técnico y definir parámetros de automatización y mantenimiento del banco de pruebas de la turbina Kaplan.

Ejecutar procedimientos técnicos de mantenimiento para alcanzar la repotenciación del banco de pruebas del laboratorio de Turbomaquinaria Hidráulica.

Implementar métodos anticorrosivos, técnicas de automatización y procedimientos para realizar el mantenimiento del banco de pruebas del laboratorio de Turbomaquinaria Hidráulica.

Realizar las pruebas para garantizar el óptimo funcionamiento y analizar los resultados de las pruebas de funcionamiento del banco de pruebas de la turbina Kaplan.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Turbina hidráulica

Una máquina hidráulica es un dispositivo que puede convertir la energía hidráulica en energía mecánica; las turbinas pueden ser motrices(turbina) como generatrices(bombas). En la máquina hidráulica, el agua permite que los álabes giren alrededor del eje de simetría produciendo energía eléctrica, en algunos casos las turbinas hidráulicas pueden llegar a tener un rendimiento muy alto que incluso puede llegar hasta el 90%. (FERNANDÉZ, 2015 pág. 2)

Existen tres principales tipos de turbinas, dependiendo del caudal de agua y de la diferencia de altura son: la turbina Francis, la turbina Pelton y la turbina Kaplan la cual es base de nuestro estudio a desarrollar.

Para el caso de este análisis se realizará el estudio previo de sus componentes, funcionamiento, características y los regímenes de rendimiento de la turbina Kaplan.

2.2. Turbina Kaplan

La turbina Kaplan fue diseñada por el Dr. Víctor Kaplan (1876-1934) a inicios del siglo XX, su diseño se asemeja a las hélices de un barco. En la figura 2-1 se puede visualizar la posición horizontal como vertical, es de tipo axial en la que el caudal del agua hace que los álabes de la hélice giren de adentro hacia afuera con respecto al eje de rotación. Existe la posibilidad de ajustar el ángulo de las palas, obteniendo de esta manera un excelente rendimiento con pequeños saltos, pero también con grandes variaciones en el caudal. (ARROYO, 2016 pág. 1)

Con velocidades específicas alrededor de 400, el fluido no puede orientarse con precisión y es porque en la construcción de turbinas cada vez lo hacen más rápidas, específicamente para velocidades mayores a 450 rpm, las cuales pueden ser la turbina de Hélice y la turbina Kaplan, que son turbinas que están diseñadas para operar con esos parámetros de velocidad. En la turbina Kaplan los álabes son orientables, por lo que tienen la particularidad de ser irreversibles, es decir, que no pueden trabajar como bomba-turbina debido a que tiene un único sentido de rotación. (FERNÁNDEZ, 2015 pág. 2)

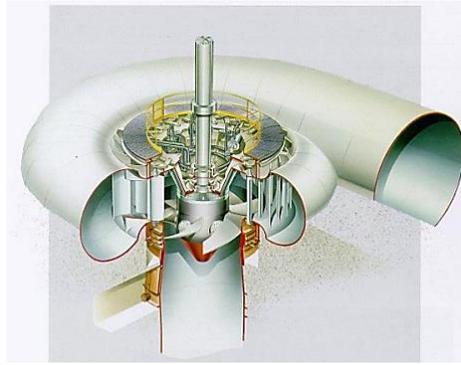


Figura 1-2:Turbina Kaplan

Fuente: Charmilles, 2014

2.2.1. *Características de la turbina Kaplan*

- La turbina Kaplan puede ser fabricada con eje horizontal, inclinada o con eje vertical.
- La turbina Kaplan puede trabajar con rendimientos hasta un 90%.
- La orientación de los álabes cumple una función principal, lo cual permite que pueda adaptarse al caudal requerido. Esta característica le permite trabajar a la turbina con rendimientos muy altos. (PLANAS, 2018)
- Estas turbinas son construidas con doble regulación o son simple regulación. La doble regulación permite un mejor aprovechamiento de caudal, pero hace que sea más cara que la Francis. (PLANAS, 2018)

2.2.2. *Clasificación de la turbina Kaplan*

En la tabla 2-1, muestra la clasificación en función de la velocidad específica del rotor y de las características de salto en: turbina hélice ultra rápida, turbina Kaplan lenta, turbinas Kaplan rápida, turbina Kaplan ultra rápida.

Tabla 1-2:Clasificación de las turbinas según su velocidad específica

Velocidad [rpm]	Tipo de turbina	Altura de salto[m]
400a 500	Hélice ultra rápida	Hasta 15
270 a 500	Kaplan Lenta	50 a 15
500 a 800	Kaplan rápida	15 a 5
800 a 1100	Kaplan ultra rápida	<=5

Fuente: (TORRES, 2015 pág. 25)

Realizado por: López Cristhian & Puma Iván 2021

Se les considera a las turbinas Kaplan, de hélice ajustable, porque el agua que circula logra mantener la velocidad específica alta, con un rendimiento elevado, característica que es importante para el desempeño de la turbina y poder manejar cargas superiores a caudal medio, logrando así ser más voluminosas que las turbinas Francis.

2.2.3. Componentes de la turbina Kaplan

La turbina Kaplan son similares a la turbina Francis, tienen componentes que cumplen la misma función y características. Los componentes principales son:

- Tubo de aspiración
- Cámara de alimentación
- Álabes del distribuidor
- Álabes móviles
- Difusor

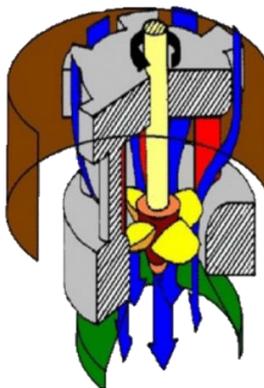


Figura 2-1:Componentes de la turbina Kaplan

Fuente: (Olivera, 2018 pág. 18)

En la figura 2-2, cada color representa las partes principales de la turbina Kaplan, los nombres se detallan a continuación:

- La parte gris, representa al distribuidor
- La parte café representa a la cámara de alimentación
- La parte roja representa a los álabes móviles del distribuidor
- La parte azul representa al flujo del agua
- La parte amarilla es la turbina Kaplan, donde están los álabes móviles que se asemejan a hélice de un barco
- La parte verde representa al difusor o conocida también como tubo de aspiración

2.2.3.1. *Tubo de aspiración*

En la figura 2-3 se ve puede apreciar el tubo de aspiración, es un conducto recto o acodado que sale del rodete que generalmente conduce al canal de fuga, donde en este punto puede recuperar la energía cinética a la salida del rodete, además posee la particularidad de ensancharse de manera progresiva. (VELÁSQUEZ, 2016)



Figura 3-2:Tubo de aspiración

Fuente: (Olivera, 2018 pág. 26)

2.2.3.2. *Cámara de alimentación*

También conocida como carcasa y se puede visualizar en la figura 2-4. Su función es facilitar la variación de la cantidad de movimiento del agua que fluye a la corona de los álabes directrices. Es considerada la parte fija de la estructura de la máquina y tiene la forma de un espiral. En ella se convierte la energía de presión del agua en energía cinética, ocasionando que el fluido circule por el distribuidor. (GUILLÉN SALAZAR, 2011)

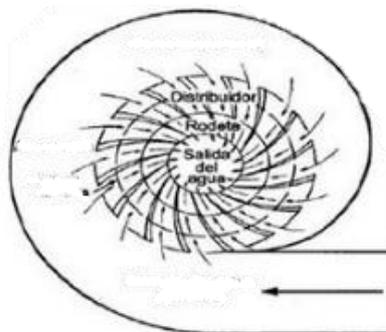


Figura 4-2:Carcasa espiral de la turbina Kaplan

Fuente: (Olivera, 2018 pág. 21)

2.2.3.3. Distribuidor

Es el componente que regula el gasto de admisión y además hace que el agua gire según sea la necesidad, en la figura 2-5 se ve la estructura del distribuidor Fink. Los álabes del distribuidor se ajustan de acuerdo con las necesidades de la potencia. En el mercado, el distribuidor Fink es el más corriente de las turbinas hidráulicas, consta de dos bielas que son movidas por servomotores de aceite lo cual hacen giran los anillos donde pivotan las bielas. (GUILLÉN SALAZAR, 2011)

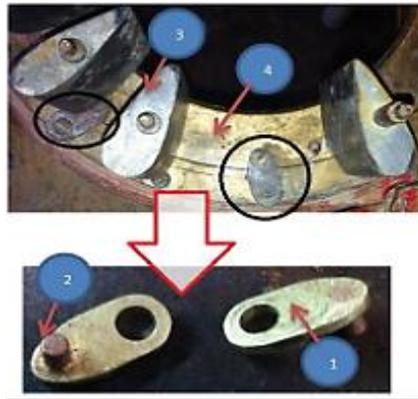


Figura 5-2:Distribuidor Fink

Fuente: (VELÁSQUEZ, 2016)

2.2.3.4. Rodete de la turbina

El rodete es el elemento básico de una turbina, está equipado por álabes que permiten intercambiar la energía del agua con la máquina, a diferencia de las turbinas de hélice son más costosas. La figura 2-6 representa al rodete con palas incrustadas que hacen que se aparezca a la hélice de un barco, y se los puede encontrar dependiendo los saltos de altura para lo cual estan diseñados , en las que puede ser de 2 a 4 palas cuando son de pequeña altura y de 5 a 9 cuando se trata de saltos mayores. (TORRES, 2015)

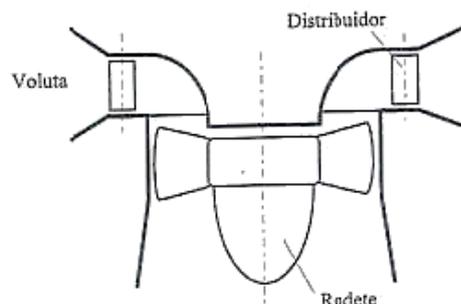


Figura 6-2:Rodete de la turbina Kaplan

Fuente: (PALMA, 2018 pág. 7)

2.2.4. Parámetros de funcionamiento de la turbina Kaplan

Se considera como parámetros funcionales de la turbina, a las características principales que se le ha otorgado a la turbina Kaplan durante el diseño.

2.2.4.1. Velocidad específica (N_s)

Es considerada como el número de revoluciones, para la elección adecuada de la turbina se debe tener en cuenta la altura y el caudal, de acuerdo con los valores de velocidad específica se puede determinar cuál es la idónea. Mediante la siguiente ecuación se puede encontrar el valor exacto:

$$n_s = \frac{n}{H} \sqrt{\frac{P}{\sqrt{H}}} \quad (1)$$

$$n_s = \frac{n\sqrt{P}}{H^{5/4}}$$

Donde

n_s =Velocidad específica en rpm

n =Velocidad angular

P =Potencia de diseño de la turbina en CV

H =Carga de diseño de la turbina en m

2.2.4.2. Número de revoluciones, n (rpm)

El número de revoluciones se encuentran en todas las máquinas rotativas, para este caso, generadores síncronos que están excitadas por medio de un rotor de corriente directa. Existe relación directa con la frecuencia de la corriente alterna y el número de revoluciones de la máquina.

Como son máquinas rotativas, están constituidas por un par de polos (p), con (n) revoluciones por minuto, la bobina del estator será cortada ($\frac{pn}{60}$) por flujos magnéticos de polos, además, en nuestro medio se trabaja con una frecuencia de 60 Hz y se lo puede encontrar mediante la siguiente ecuación:

$$n=f\frac{60}{p} \quad (2)$$

$$n=(60)\frac{60}{p}$$

$$n=\frac{3600}{p}$$

2.2.4.3. Caudal de agua disponible Q (m^3/s)

El caudal es un parámetro que se modifica de acuerdo con la experimentación y se lo puede medir por medio de instrumentos.

$$Q=C_q * A_o * \sqrt{2gh_v} \quad (3)$$

$$Q=\frac{P_a}{\rho * g * H} \quad (4)$$

Donde:

h_v : altura diferencial(mca)

A_o : área del orificio (m^2)

C_q : Coeficiente de gasto

A_d : área de la tubería de descarga (m^2)

m: relación de áreas.

2.2.4.4. Cabeza manométrica o altura neta (H_m)

Es la altura que va a ser aprovechada por la turbina. Está definida por la sumatoria de los incrementos de altura que absorbe la turbina en forma de presión, altura cinética y en altura geodésica (TORRES, 2015 pág. 11)

$$\frac{P_s}{\delta} + \frac{V_s^2}{2g} + Z_s + H_m = \frac{P_D}{\delta} + \frac{V_D^2}{2g} + Z_D \quad (5)$$

$$H_m = \Delta P + \frac{V_D^2 - V_s^2}{2g} + \Delta Z$$

Donde:

ΔP : Diferencia de presiones entre la succión y descarga(mca)

V_D : Velocidad a la descarga(m/s)

V_S : Velocidad a la succión(m/s)

ΔZ : Diferencia de altura entre la succión y descarga (m)

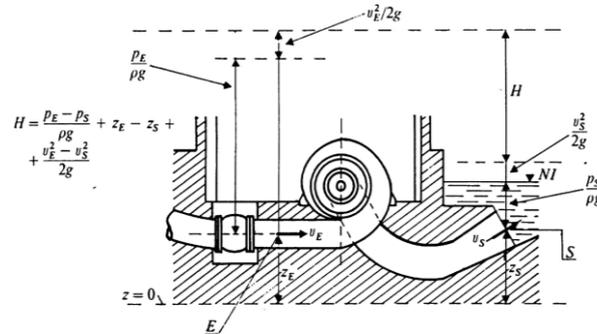


Figura 7-2: Normas internacionales para la determinación de la cabeza manométrica

Fuente: (TORRES, 2015 pág. 12)

2.2.4.5. Potencias

- Potencia útil o hidráulica, (P_u). Es conocida como potencia al freno, potencia en el eje o potencia restituida. Esta potencia se lo puede encontrar en el eje del rotor de la turbina.

$$P_u = \frac{\gamma * Q * H_m}{75} \quad (6)$$

Donde:

P_u : potencia útil

Q : caudal real (m^3/s)

γ : peso específico (kg/m^3)

H_m : cabeza nanométrica(mca)

- Potencia de accionamiento, (P_a). Es la potencia que es producida por el rozamiento del fluido con las paredes de la bomba.

$$P_a = F * d * n \quad (7)$$

Donde:

P_a = Potencia de accionamiento

F =fuerza medida por la celda de caga(kg)

N = Número de revoluciones(rpm)

d = brazo del motor

2.2.4.6. Eficiencia

- Eficiencia total n_{tot} . En ello se detallan todas las pérdidas de la turbina.

$$n_t = \frac{P_u}{P_a} * 100 \quad (8)$$

2.3. Bombas hidráulicas

Una bomba hidráulica es una máquina generadora, en la que se produce la transformación de energía mecánica en energía hidráulica. La bomba hidráulica es utilizada para impulsar cualquier tipo de líquidos.

2.3.1. Bomba axial

En la figura 2-8 se puede observar el modelo de la bomba axial, es considerada como una turbomáquina, permite la transmisión de energía mecánica del rotor al fluido a su paso por los álabes en sentido axial. También son conocidas como bombas de paletas o de hélice, debido a la forma del impulsor. Se utiliza para mover grandes caudales con poca altura y baja presión. Las bombas de flujo axial generalmente tienen dos o seis impulsores, lo que permite trabajar con elementos que contienen agua. En el rotor de la bomba axial se puede modificar la inclinación, que mejora su rendimiento en condiciones reales. (TORRES, 2015 pág. 34)



Figura 8-2:Bomba axial

Fuente: (FERNÁNDEZ, 2008 pág. 3)

2.3.2. Principales cantidades por medir

En el laboratorio de turbomaquinaria hidráulica, se puede obtener la lectura de los principales parámetros y cantidades que intervienen en las mediciones de una práctica de laboratorio, entre ellas tenemos las siguientes.

2.3.2.1. Cantidades fundamentales

- **Caudal, Q (l/min).** - se entiende por caudal a la cantidad de fluido que circula por unidad de tiempo en un determinado sistema.
- **Altura neta, H(m).** - se considera a la energía o altura puesta a disposición de la turbina y se relaciona con la altura de Euler. Se lo puede medir por medio de niveles de agua que se encuentran instalados en el banco de pruebas. (GARCÍA PÉREZ, 2011 pág. 28)

$$H=H_u+H_{e-s} \quad (9)$$

- **Potencia, P (W).** - es el trabajo que entrega la turbina al eje del generador. (GARCÍA PÉREZ, 2011 pág. 31)
- **Número de revoluciones, n (rpm).** Expresa la velocidad angular e indica la cantidad de rotaciones por minuto que gira un cuerpo.

2.3.2.2. Cantidades derivadas

- **Rendimiento, η (%).** - es la eficiencia energética de la máquina.
- **Par o momento, M (N.m).** - son las fuerzas de un sistema, de igual intensidad, modulo, pero de sentidos contrarios. Para este caso, el momento que ejerce el rotor se lo puede medir por medio del freno.
- **Velocidad específica, Ns.** - es el parámetro más importante para el cálculo de bombas, debido a que con este parámetro se puede determinar qué tipo de bomba es. Se lo puede medir por medio del tacómetro que se encuentra ubicado en el banco de pruebas tanto en la bomba axial como en la turbina.

Mediante la lectura de datos se puede definir el funcionamiento óptimo de la máquina, también, se lo puede realizar mediante la utilización de instrumentos instalados en la máquina, que permitan la adquisición de datos de manera precisa.

2.4. Instrumentación del banco de pruebas

La instrumentación es el conjunto de tecnologías que miden magnitudes físicas como químicas, con el propósito de obtener información para el análisis e interpretación de los sistemas de control. En el banco de pruebas de la turbina Kaplan se puede encontrar varios instrumentos que son utilizados para la adquisición de datos.

2.4.1. Medidor de presión

Se entiende por medidores de presión a los dispositivos que tiene la finalidad de medir la presión de fluidos ya sea de líquidos o gases. La presión es la fuerza por unidad de superficie y puede ser expresado en:

- Pascal (Pa),
- Atmosferas(atm),
- Kilogramo por centímetro cuadrado (kg/cm^2), y
- Libra por pulgada cuadrada(psi).

2.4.1.1. Manómetros

La figura 2- representa al manómetro en escala de PSI. El manómetro es un instrumento que mide la presión de un gas o líquido, agua, gas o aire. Dependiendo del campo de aplicación, pueden ser de dos tipos: analógicos o digitales.



Figura 9-2:Manómetro de 0-200 PSI

Fuente: Promesa,2020

2.4.2. *Medidor de caudal*

Son instrumentos utilizados para medir el caudal o gasto volumétrico, suelen ser instalados en la línea que transporta el fluido. El caudal es la determinación del volumen de un fluido por unidad de tiempo, y puede ser expresado en m^3/s .

2.4.2.1. *Válvula de compuerta*

La válvula de compuerta, figura 2-10, se utiliza para cortar el flujo de un sistema hidráulico, tiene un mecanismo en forma de disco. El disco se coloca en el centro del tubo, a través de una barra conectada con un actuador en el exterior de la válvula. La rotación del actuador da vuelta al disco paralelo o perpendicular al flujo. (Zhang, 2015)



Figura 10-2: Válvula de compuerta

Fuente: (Zhang, 2015)

En los diversos bancos de pruebas del laboratorio de Turbomaquinaria Hidráulica se puede encontrar varios tipos de válvulas, pero en el caso del banco de pruebas de la turbina Kaplan se encuentra dos válvulas tipo compuerta, por lo que se diferencia de las demás.

2.4.3. *Medidor de velocidad*

Son aquellos instrumentos que permiten el registro de movimientos rotacionales.

2.4.3.1. *Velocidad angular*

Es una medida de la velocidad de rotación, definido como el ángulo de giro por unidad de tiempo, y en el Sistema Internacional es el radian por segundo (rad/s).

$$\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \quad (10)$$

Donde:

$\Delta\theta$: Variación del ángulo

Δt : Variación del tiempo

2.4.3.2. Tacómetro

En el banco de pruebas se encuentran instalados instrumentos como el de la figura 2-11. Para medir la velocidad de giro del eje se utiliza un instrumento denominado tacómetro. Se puede medir en revoluciones por minuto (RPM). (GUILLÉN SALAZAR, 2011 pág. 76)

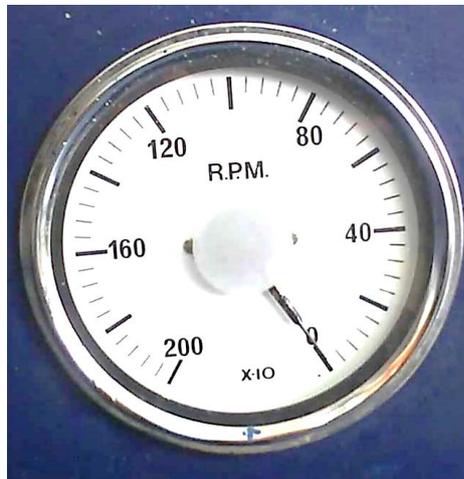


Figura 11-2: Tacómetro Turbina Kaplan

Fuente: (GUILLÉN SALAZAR, 2011 pág. 76)

2.4.4. Medidor de fuerza

Permiten medir la fuerza del sistema y su unidad de medida es: N, kgf, lbf.

2.4.4.1. Fuerza

Es una magnitud física vectorial capaz de deformar objetos, cambiar su velocidad o vencer su inercia. La fuerza puede definirse como toda acción capaz de modificar el estado de reposo de un cuerpo. (GUILLÉN SALAZAR, 2011 pág. 78)

$$F = m \cdot a \quad (11)$$

2.4.4.2. Centro de carga

En el banco de pruebas se encuentra instalados centro de carga , figura 2-12, instrumento utilizado para medir fuerzas o para calcular el peso de los objetos. Posee un mecanismo, al colocar las pesas, existe una deformación indicando el valor de la fuerza mediante la interpretación de datos en el software.

Es un instrumento de medición que actúa en el tambor de freno, reduce y controla la velocidad del fluido que ingresa a la cámara de distribución de la turbina, que será golpeada por las hélices para mover y generar energía.



Figura 12-2:Celda de carga

Fuente: (GUILLÉN SALAZAR, 2011 pág. 137)

2.5. Descripción de datos e instrumentos utilizados para la automatización

La automatización se refiere a la tecnología, mediante la aplicación de sistemas mecánicos, electrónicos y de bases computacionales. Puede operar y controlar la producción, se refiere a un sistema que obedece las órdenes humanas por medio de un conjunto de elementos tecnológicos.

La adquisición de datos se los realiza por medio de la propiedad física de un objeto que se desea medir. Cuando se habla de propiedad física se refiere al cambio de temperatura, la presión de una cámara, la fuerza aplicada a un objeto. Un eficaz sistema de adquisición de datos puede medir todas las propiedades o fenómeno que ocurren en el sistema. (GUILLÉN SALAZAR, 2011 pág. 24)

2.5.1. *Software LabVIEW*

LabVIEW es la abreviatura de Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench. Es un software que utiliza la programación por medio de lenguaje y un entorno gráfico donde se crean aplicaciones sencillas, para el desarrollo de sistemas de pruebas automatizadas de investigación, validación y producción.

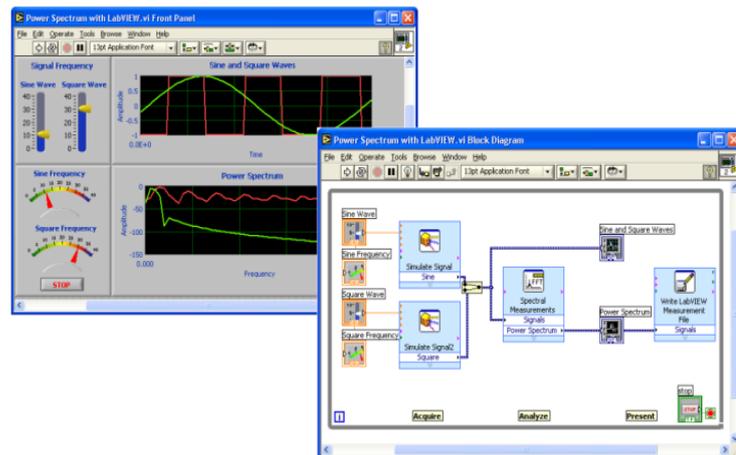


Figura 13-2: Interfaz software LabVIEW

Fuente: Engineer Ambitiously, 2021

Esta herramienta está enfocada en el control de instrumentos electrónicos que eran utilizados en los sistemas de instrumentación. En la figura 2-13 se visualiza las ventanas dentro de la interfaz del software LabVIEW, la primera ventana tiene el diagrama real de un instrumento que contiene un panel de control. Y en la segunda ventana contiene todo el circuito interno del elemento. Las ventanas mencionadas, en el programa lo podemos encontrar como panel frontal y el diagrama de bloques. (GUILLÉN SALAZAR, 2011 pág. 25)

LabVIEW trabaja de dos maneras, en diseñar y ejecutar. Para el diseño se realiza toda la programación de los controladores e indicadores, y para la ejecución se basa en mostrar el funcionamiento. Las aplicaciones creadas mediante el software LabVIEW toman el nombre de Instrumentos Virtuales (VI), se los conoce así por su apariencia y funcionalidad que se asemejan a la de una herramienta real. (GUILLÉN SALAZAR, 2011 pág. 26)

2.5.2. *Sensor transductor*

Es un tipo de dispositivo que convierte la propiedad física en una señal eléctrica medible, como la tensión, corriente, valores de resistencia. Los transductores son los encargados de convertir la

señal para la adquisición de datos (DAQ). Existen transductores para diferentes aplicaciones, como medición de la temperatura, la presión o flujo de fluidos. (CUADROS ACOSTA, 2021)

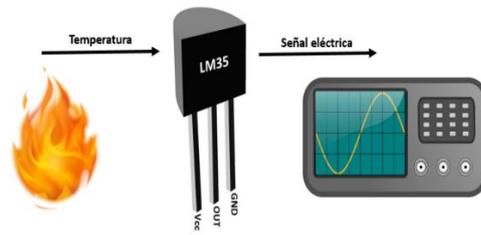


Figura 14-2: Interpretación de datos

Fuente: (CUADROS ACOSTA, 2021)

2.5.3. Adquisición de datos utilizando LabVIEW

En la figura 2-14 se visualiza el proceso de adquisición de datos, para obtener o generar información de manera automatizada. Utilizando una combinación de hardware y software establecidos por un computador para proponer un sistema de medida flexible.

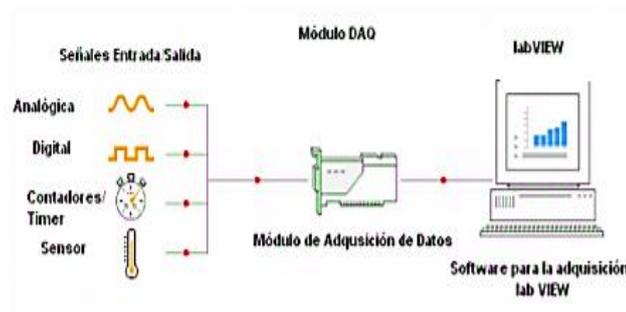


Figura 15-2:Esquema descriptivo de la adquisición de datos

Fuente: (ALCÍVAR, 2010 pág. 19)

La Figura 2-15 representa al esquema descriptivo del proceso de adquisición de datos en el que se pueden distinguir claramente los pasos ejecutados antes de que la señal censada llegue a la computadora. El sensor registra el fenómeno físico (presión, caudal, velocidad, temperatura), será interpretada por el módulo de adquisición que digitalizará la señal para enviarla al computador, donde se visualizará, analizará y se almacenará según se lo requiera.

En la etapa de acondicionamiento, los datos son modificados de manera que la señal de los niveles sea compatible con módulo de adquisición de datos. Una vez que las señales eléctricas analógicas han sido convertidas en digitales, se envían a través del bus de datos a la memoria del computador, lo cual será utilizado para procesar los datos mediante el software LabVIEW.

2.5.4. *Arduino nano*

La placa de Arduino nano es compatible con protoboards, tiene 14 pines de entrada/ salida, conexión mini USB además de ello posee un botón de reinicio del sistema.

La placa de Arduino nano se utilizará para la lectura de datos de fuerza, emitidos por los sensores de efecto Hall, mismos que se encuentran instalados en el banco de pruebas, uno en el centro de carga de la bomba axial y el otro en el centro de carga de la turbina Kaplan, por medio de esta placa se puede leer e interpretar datos de fuerza en tiempo real.

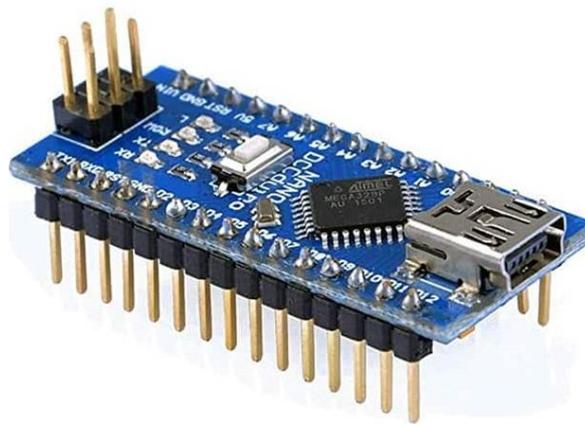


Figura 16-2: Arduino nano
Fuente: (arduino.cl)

2.6. Diagnóstico técnico de máquinas hidráulicas

2.6.1. *Diagnóstico de averías en máquinas hidráulicas*

A pesar de que las máquinas hidráulicas se consideran uno de los elementos más fiables desde el punto de vista de la operación, están expuestos a sufrir averías (MATILDE, 2011). Las causas que pueden provocar una avería en un grupo hidroeléctrico pueden ser varias:

- Equipos trabajando en condiciones alejadas de las de diseño, por ejemplo, turbinas y turbinas-bombas en funcionamiento con cargas demasiado bajas o turbinas operando a sobrecargas, con pares motores sumamente altas en comparación a los de diseño, lo que puede ocasionar el fallo de cojinetes en procesos transitorios.
- Problemas derivados de las inspecciones diarias de mantenimiento, que pueden dar lugar a la aparición de problemas no existentes, como pueden ser desequilibrios provocados por la soldadura, para reparar zonas afectadas de erosión por cavitación.

2.6.2. Detección de fallas y averías en bombas centrífugas

El mayor número de fallas y averías en las bombas son ocasionadas por la inadecuada operación y puesta en marcha de los equipos; a continuación, se enumerará las averías y sus posibles soluciones, además de los parámetros a verificar para detectar la causa del fallo antes que se produzca la avería. (Bombas.Centrifugas.net, 2011)

2.6.2.1. La bomba está encendida pero no hay suministro de agua

- Comprobar que la tubería en la línea de succión se encuentre completamente llena y sin aire en la misma o en el cuerpo de la bomba. Es necesario verificar el estado de la válvula para prevenir fallos, ya que no debe poseer obstrucciones y la válvula debe abrir y cerrar adecuadamente.
- Verificar el sentido de giro del motor.

2.6.2.2. Caudal insuficiente.

- Una de las causas más frecuentes para que el caudal disminuya, es la presencia de aire en la tubería de aspiración o a través del sello. Es necesario realizar una inspección meticulosa para revelar posibles daños en la tubería o en los elementos de conexión.
- Desmontar el sello y verificar posibles daños.
- Obstrucción en el impulsor. Si los impulsores de la bomba son cerrados, es preciso abrir la tapa de la voluta e inspeccionar los conductos.

2.6.2.3. Sobre carga en el motor

- Si el equipo trabaja fuera de los rangos de operación, la posible solución es estrangular la válvula de descarga para detener el caudal de la bomba.
- Daños en el impulsor, el daño en los álabes del impulsor puede ocasionar desbalanceo y vibraciones que afectan el normal funcionamiento del motor.

2.6.2.4. Presión de la bomba insuficiente.

- Verificar posibles daños en el impulsor, los daños en los álabes ocasionan una disminución de la capacidad de la bomba.
- Entrada de aire en la tubería de succión o fuga excesiva en el área de impulsión.

2.6.2.5. *Falla prematura de sellos o empaques.*

- Desbalanceo ocasionado por el impulsor, los rodamientos o desalineación.
- Selección inadecuada de los materiales para el sello o empaquetadura. Es importante seleccionar adecuadamente el material de los sellos para garantizar la durabilidad y solucionar posibles fugas. Además, se recomiendan sellos mecánicos de caucho de etileno, propileno y dieno. (EPDM).
- Falta de lubricación. Verificar que la bomba no esté funcionando en vacío; si no es lubricada por el mismo fluido verificar los anillos o tomas de lubricación y constatar su correcto funcionamiento.

2.6.3. *Corrosión*

La corrosión es la degradación que sufre el material a causa de la acción del medio ambiente que lo rodea.

2.6.3.1. *Corrosión por picadura.*

La figura 2-16 representa la corrosión por picadura, es una forma de corrosión localizada y produce pequeños agujeros en forma de canales cilíndricos de manera que se propagan hacia el interior del material, es de igual peligrosidad que la corrosión intergranular y fisurante.

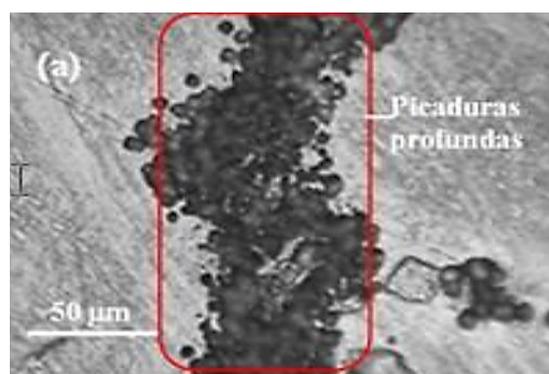


Figura 17-2: Corrosión por picaduras en los álbes

Fuente: (REYES, 2019 pág. 8)

2.6.3.2. *Control de la corrosión*

La corrosión no se la puede eliminar, pero si se la puede controlar o prevenir por métodos muy diferentes, entre los más comunes se tiene:

- Recubrimientos
- Protección anódica y catódica
- Control del medio

2.6.4. Cavitación

Se observa en la figura 2-17 el fenómeno que se produce cuando la presión del fluido en una determinada zona desciende por debajo de los valores de la presión de vapor del fluido.



Figura 18-2: Cavitación en los álabes

Fuente: (GARCÍA PÉREZ, 2011 pág. 119)

2.6.4.1. Control de la cavitación

La cavitación se lo puede prevenir de acuerdo con los siguientes pasos

- Utilizar filtros de respiradero en el tanque
- Mantener una temperatura adecuada del fluido

2.7. Mantenimiento de la turbina Kaplan

2.7.1. Mantenimiento industrial

Se entiende por mantenimiento al conjunto de acciones realizadas a un elemento con el propósito de devolverlo a un estado en el que pueda cumplir su función requerida o para lo que está diseñado y de esta manera eliminar paros imprevistos y garantizar un óptimo funcionamiento de las turbomaquinarias (UNE-EN-13306, 2018)

2.7.2. *Mantenimiento turbina Kaplan*

2.7.2.1. *Trabajos de lubricación*

En una turbina existen muchas partes móviles, por lo que algunas necesitan lubricación para disminuir el desgaste. Entre ellas están la bomba axial, turbina, motor, rodamientos, volante de regulación de los álabes de la bomba axial, válvulas de compuerta.

2.7.2.2. *Trabajos de mantenimiento resultante del servicio*

Para eliminar sedimentos y partículas contaminantes como la arena en la tubería anular se recomienda lavar la tubería abriendo la válvula de vaciado. Para lograr limpiar el cilindro de agua de posibles cuerpos extraños, se debe cerrar la alimentación de agua y lavar la tubería y el cilindro abriendo la válvula.

2.7.2.3. *Revisiones*

La tabla 2-2 describe actividades que se debe realizar al banco de pruebas cada cierto tiempo de funcionamiento

Tabla 2-1:Revisión periódica

Actividad	Descripción
Someter la turbina a una revisión completa Cada 800 horas de funcionamiento.	
Revisar el rodete de posibles fisuras y superficies desgastadas.	Es necesario dedicar atención principalmente a los álabes. Si se encuentran fisuras no se debe continuar utilizando el rodete.
Inspeccionar el estado de la pintura, posibles fallas y/o corrosión en la superficie en contacto especialmente con agua, la superficie de la tubería anular y del foso de la turbina.	Las partes que se encuentran con presencia de corrosión es necesario desoxidar y proteger con pintura de acuerdo con las instrucciones de conservación.

Realizado por: López C & Puma I

2.7.2.4. Controles funcionales

Es recomendable controlar mensualmente el funcionamiento de los sistemas de seguridad como interruptores, pulsadores de arranque, relé de sobrecarga sensores, transductores, medición de velocidad, medición de presión medición de fuerza, niveles de llenado del tanque, etc.

- Se debe controlar el selle hermético de los empaques que son los encargados de controlar posibles fugas al momento de transportar el fluido que circulan por medio de los ductos galvanizados por lo menos una vez cada semestre.
- Anualmente se debe controlar el funcionamiento y hermetismo de las válvulas de compuerta, del volante de regulación de los álabes de la bomba axial.

2.7.3. Actividades de mantenimiento de elementos principales de la turbina

2.7.3.1. Turbina

Verificar que la maquina se encuentre sin paso de energía, para proceder al desmontaje de la carcasa y todos los componentes de la tobera.

2.7.3.2. Rodete

- Realizar una inspección visual de las condiciones generales del rodete, para ello se recomienda verificar el desgaste de cada componente.
- Revisar los candados, tornillos y tuercas entre la flecha y el rodete.
- Aplicar pintura anticorrosiva a todo el rodete.

2.7.3.3. Foso de la turbina

- Desincrustar el sarro del foso de la turbina y de la tapa superior para aplicar pintura anticorrosiva.

2.7.3.4. Tobera

- Desmontar el conjunto flecha-aguja, así como el capuchón.
- Desincrustar el sarro de todos los componentes para realizar inspecciones visuales para verificar si el capuchón de la tobera presenta ralladuras y desprendimiento de material.

- Realizar una limpieza general de la tornillería y aplicar pintura esmalte al exterior de los componentes de la tobera.

2.7.3.5. Válvula principal

- Desmontar la válvula principal.
- Desmontar el cilindro de mando de la válvula para posteriormente desarmarla para su mantenimiento.
- Aplicar pintura primaria anticorrosiva a las partes internas de la válvula y pintura esmalte en las partes externas.

CAPÍTULO III

3. REPOTENCIACIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS

3.1. Contexto operacional del banco de pruebas

La turbina Kaplan es considerada de reacción hacia adentro, hace que el fluido cambie de presión a medida que éste se mueve. El estudio del banco de pruebas se basa en conocer y analizar los principios de funcionamiento, el comportamiento de la turbina, la relación de torque, la potencia y la velocidad de rotación que se genera en su eje con las diferentes variaciones de presión y caudal, al cambiar la apertura de los álabes del distribuidor y la válvula de control de caudal.

3.1.1. Ficha técnica y características del banco de pruebas

La tabla 3-1, representa las características y especificaciones técnicas de la turbina, motor eléctrico y bomba axial.

Tabla 1-3:Ficha técnica del banco de pruebas de la turbina Kaplan

Banco de pruebas: Turbina Kaplan			
Marca	ARMFIELD	# de código	FAME-LT-TK01
Modelo	Kaplan vertical	Año de fabricación	
Fecha de adquisición	1980	Costo de adquisición (USD)	78,28
Fabricante o vendedor	ARMFIELD	# de parte de la maquina	
Turbina con el tipo de voluta Kaplan Velocidad especifica: 135 rpm Diámetro nominal del rotor: 8" Número de aletas del rotor: 4 Número de álabes directrices: 16 Diámetro de tubería de entrada: 344mm Diámetro de tubería de salida: 271mm			
Motor			
Marca	Brook Crompton	# de serie	K739E
Tipo de bomba	Axial	Frame	C200LH
Modelo		Año de fabricación	
Fecha de adquisición	1980	Fabricante o vendedor	ARMFIELD
RPM	1740/1145	Potencia	22/15kW
Voltaje	220v	Frecuencia	60 Hz
Número de fases	3	Amperaje	84/56 A
Tipo de motor	Corriente alterna		

Elaborado por: López C & Puma I, 2021

3.2. Estado técnico de los equipos del banco de pruebas de la turbina Kaplan

Para detectar los fallos del equipo, se desarrollaron tablas que detallan las condiciones técnicas en que se encuentra los equipos del banco de pruebas, el sistema mecánico (tabla 3-3), el sistema electrónico (tabla 3-4), el sistema eléctrico (tabla 3-5), de manera que se pueda establecer el principio de funcionamiento del equipo, este método se denomina diagnóstico técnico

La base del diagnóstico técnico incluye medir parámetros que caracterizan el estado de los componentes, de esta manera se puede establecer su condición actual y su posible tiempo de funcionamiento restante. En el diagnóstico técnico se utilizan metodologías, equipos de diagnóstico para determinar el estado de cada componente sin necesidad de desarmarlo, además de ello deducir los recursos para su funcionamiento

Al realizar la inspección técnica y visual, se determinó el estado técnico del equipo dentro de un rango de valoración, se interpreta en la tabla 3-2, estos estados son: bueno, regular, malo o muy malo. Se debe emplear el siguiente procedimiento:

- Multiplicamos la cantidad de aspectos obtenidos como buenos por 1.
- Multiplicamos la cantidad de aspectos obtenidos como regulares por 0,80.
- Multiplicamos la cantidad de aspectos obtenidos como malos por 0,60.
- Multiplicamos la cantidad de aspectos obtenidos como muy malos 0,40.
- Se suma todos los productos.
- El resultado se divide para la cantidad de aspectos evaluados.
- El resultado se multiplica por 100 y se obtiene el indicador en valor de porcentaje

Tabla 2-3:Tolerancias del estado técnico

Nomenclatura	Estado	%
B	Bueno	90-100
R	Regular	70-89
M	Malo	50-69
MM	Muy malo	0-49

Realizado por: López C & Puma I

3.3. Estado técnico del sistema mecánico del banco de pruebas

Mediante el diagnóstico realizado, se determinó las condiciones en las que se encuentra el sistema mecánico en un rango de valoración, se describe en la tabla 3-3.

Tabla 3-1: Estado técnico del sistema mecánico del banco de pruebas.

Estado técnico del sistema mecánico del banco de pruebas de la turbina Kaplan							
Marca	ARMPFIELD		Responsable del mantenimiento: Practicantes				
Código Técnico:	FAME-LT-TK01		Significado:				
Código del activo físico:	10633		Significado:				
Manuales		PLANOS		REPUESTOS			
Si	NO	SI	NO	SI	NO		
x			x		x		
Descripción				ESTADO			
				B	R	M	MM
Estado de la carcasa (Motor-Bomba, Turbina)				x			
Estado del anclaje (Motor-Bomba, Turbina)				x			
Estado de las válvulas (engranajes, rodamientos)						x	
Estado del centro de carga				x			
Estado de las tuberías					x		
Estado de las hélices (Bomba, Turbina)				x			
Estado del eje (Motor-Bomba)				x			
Estado del sistema de lubricación					x		
Estado técnico							
ESTADO	#	FACTOR				TOTAL	
		1	0,8	0,6	0,4		
BUENO	5	x				5	
REGULAR	2		x			1,6	
MALO	1			x		0,6	
MUY MALO	0					0	
TOTAL	8	Σ Total				7,2	
		$ET = \frac{\Sigma \text{Total}}{\# \text{ de aspectos evaluados}} \times 100$				90	
ESTADO	%		Tipo de mantenimiento				
Bueno	90-100		Revisión			x	

Realizado por: López C & Puma I

3.3.1. Estado inicial de los componentes mecánicos del banco de pruebas

3.3.1.1. Estado inicial de la bomba axial

La bomba axial, figura 3-1, es una turbomáquina que permite la transferencia de energía del rotor a través de los álabes en dirección axial. La hélice del impulsor puede ser de 2 a 6 aspas, por lo que también pueden ser llamadas bombas de hélice.

La bomba axial tiene la particularidad de mover grandes caudales con pequeñas alturas a baja presión. La bomba axial facilita el paso del fluido, esto se logra por la forma y disposición del impulsor que está colocado en el mismo ducto.



Figura 1-3:Bomba axial

Realizado Por: López C & Puma I

3.3.1.2. Estado inicial de la turbina Kaplan

En la figura 3-2 se observa la turbina Kaplan de eje vertical, su rodete de hélice es de cuatro aspas, el fluido recorre la voluta y entra al rodete a través de los álabes regulables, además existen dos álabes que se encuentran sobrepuestos al eje.

- El fluido es impulsado por la bomba axial en un circuito cerrado de funcionamiento.
- El conducto del impulsor es de acrílico transparente, en el cual se puede apreciar el comportamiento del fluido a medida que se cambia el ángulo de inclinación de las aspas, también se puede visualizar la formación de turbulencia y cavitación.
- El torque de salida de la turbina se mide con un sensor de peso, se encuentra conectado al sistema del tambor y la banda de fricción.
- El caudal se lo puede medir mediante la placa orificio, instalada en la tubería antes del ingreso a la turbina.

- La presión de entrada y salida se toman directamente en los manómetros instalados en el banco de pruebas.
- Para medir la velocidad del eje principal se tiene instalado un tacómetro, por medio de una banda entre la polea del tacómetro y el eje.
- La turbina está montada sobre tres columnas de concreto armado, el eje de la turbina es guiado sobre dos rodamientos.



Figura 2-3:Turbina Kaplan

Realizado Por: López C & Puma I

3.3.1.3. Centro de carga en la bomba axial

Para el caso de la bomba axial, figura 3-3, existe un brazo en donde se colocan las pesas para medir la fuerza de tensión al momento del arranque.



Figura 3-1:Celda de carga bomba axial

Realizado por: López C & Puma I

3.4. Estado técnico del sistema electrónico del banco de pruebas

Mediante el diagnóstico realizado, se determinó las condiciones en las que se encuentra el sistema electrónico en un rango de valoración, se describe en la tabla 3-4.

Tabla 4-3 Estado técnico del sistema electrónico del banco de pruebas.

Estado técnico del sistema electrónico del banco de pruebas de la turbina Kaplan							
Marca:	ARMFIELD		Responsable del mantenimiento: Practicantes				
Código Técnico:	FAME-LT-TK01		Significado:				
Código del activo físico:	10633		Significado:				
Manuales		PLANOS		REPUESTOS			
Si	NO	SI	NO	SI	NO		
x			x		x		
Descripción				ESTADO			
				B	R	M	MM
Estado de los transductores de presión				x			
Estado de los acelerómetros					x		
Estado del sensor de caudal				x			
Estado del panel de control				x			
Estado del dinamómetro				x			
Estado de los instrumentos de medida (presión)					x		
Estado de los instrumentos de medida (tacómetro)				x			
Estado de los instrumentos de medida (dinamómetro)				x			
Estado técnico							
ESTADO	#	FACTOR				TOTAL	
		1	0,8	0,6	0,4		
BUENO	6	x				6	
REGULAR	2		x			1,6	
MALO	0			x		0	
MUY MALO	0					0	
TOTAL	8	Σ Total				7,6	
		$ET = \frac{\Sigma \text{Total}}{\# \text{ de aspectos evaluados}} \times 100$				95	
ESTADO	%		Tipo de mantenimiento				
Bueno	90-100		Revisión			x	

Realizado por: López C & Puma I

3.4.1. Estado inicial de los componentes electrónicos del banco de pruebas

3.4.1.1. Transductor de presión en la bomba axial

En el banco de pruebas se encuentran instalados transductores de presión en la línea de succión y descarga, utilizados para la toma de datos, ver figura 3-4.



Figura 4-3: Transductores de presión en la bomba axial

Realizado Por: López C & Puma I

Mediante el diagnóstico realizado a los sensores de presión, que se encuentran ubicados en la línea de succión y descarga de la bomba axial, uno de ellos se encuentra descalibrado por lo que es necesario desmontarlo para su previo análisis.

3.4.1.2. Transductor de presión turbina Kaplan

En el cuerpo de la turbina se encuentran instalados dos transductores de presión, en la línea de succión de la bomba y la línea de succión de la turbina, son de iguales características, soportan una capacidad de 100 Gv a una presión de 125 PSI, a un voltaje de 10 Vcc, ver figura 3-5, lo que facilita la programación y la toma de datos.



Figura 5-3: Transductor de presión de la turbina

Realizado Por: López C & Puma I

3.4.1.3. Tarjeta electrónica de acoplamiento para sensores de proximidad

Para que el sensor de proximidad funcione se requiere de una tarjeta electrónica de acoplamiento, instalada en el módulo de adquisición de datos, ver figura 3-6, esta tarjeta requiere de una alimentación de 12 V, además, un módulo de adquisición de datos de la National Instruments NI-9241 que detecta señales de 5V para ser enviados y analizados en el software.



Figura 6-3:Tarjeta de acople para sensor de proximidad

Realizado Por: López C & Puma I

3.4.1.4. Sensor de proximidad en la bomba axial

En la figura 3-7 se visualiza el área donde se encuentra instalado el sensor de proximidad. El sensor emite una señal lumínica que indica que se encuentra energizado, mediante las pruebas realizadas se puede deducir que el sensor se encuentra en buen estado.



Figura 7-3:Sensor de proximidad en la bomba axial

Realizado Por: López C & Puma I

3.4.1.5. Sensor de proximidad en la turbina Kaplan

El sensor de proximidad de la turbina se encuentra ubicado junto al tambor del freno, cubierto por una base metálica que lo protege de algún daño, ver figura 3-8. En el diagnóstico realizado se determinó que el sensor no se encuentra operativo y es necesario remplazarlo.



Figura 8-3: Sensor de proximidad en el tambor de freno

Realizado Por: López C & Puma I

3.4.1.6. Panel de adquisición de datos

En el panel de adquisición de datos, se encuentran tarjetas electrónicas, ver figura 3-9, permiten la emisión de datos para ser analizados por el software y determinar los parámetros de funcionamiento.



Figura 9-3: Panel de adquisición de datos banco de pruebas

Realizado Por: López C & Puma I

3.5. Estado técnico del sistema eléctrico del banco de pruebas

Mediante el diagnóstico realizado, se determinó las condiciones en las que se encuentra el sistema eléctrico en un rango de valoración, se describe en la tabla 3-5

Tabla 5-3 Estado técnico del sistema eléctrico del banco de pruebas.

Estado técnico del sistema eléctrico del banco de pruebas de la turbina Kaplan							
Marca:	ARMPFIELD		Responsable del mantenimiento: Practicantes				
Código Técnico:	FAME-LT-TK01		Significado:				
Código del activo físico:	10633		Significado:				
Manuales		PLANOS		REPUESTOS			
Si	NO	SI	NO	SI	NO		
x			x		x		
Descripción				ESTADO			
				B	R	M	MM
Estado del contactor de sobrecarga						x	
Estados bornes de conexión				x			
Estado del cableado de los instrumentos					x		
Estado del tablero de control				x			
Estado de los cables de alimentación				x			
Estado de bandas					x		
Estado técnico							
ESTADO	#	FACTOR				TOTAL	
		1	0,8	0,6	0,4		
BUENO	3	x				3	
REGULAR	2		x			1,6	
MALO	1			x		0,6	
MUY MALO	0					0	
TOTAL	6	Σ Total				5,2	
		$ET = \frac{\Sigma \text{Total}}{\# \text{ de aspectos evaluados}} \times 100$				86,666667	
ESTADO	%		Tipo de mantenimiento				
Regular	70-89		Revisión			x	

Realizado por: López C & Puma I

El sistema eléctrico, genera y transporta energía para que el banco de pruebas funcione, durante la inspección se determinaron y encontraron las siguientes fallas:

3.5.1. *Tablero de control de velocidad*

En la figura 3-10 se muestra el tablero de control y el relé de sobrecarga, protege al motor eléctrico en caso de que ocurra una sobretensión o un fallo de fase. Mediante la inspección realizada se determinó que se encuentra en un estado aceptable, su capacidad es 30A (amperios) por lo que no es necesario su reemplazo.



Figura 10-3: Tablero de control y relé de sobrecarga

Realizado Por: López C & Puma I

3.5.2. *Motor eléctrico*

En la figura 3-11 se observa el sistema motor-bomba, el cual se encuentra en correctas condiciones físicas y funcionales, el motor tiene un arranque en triángulo a 208 V y sus bornes de conexión se encuentran en buen estado, existe agentes adversos como el polvo, humedad que podrían afectar el funcionamiento del motor por lo que se realizó la limpieza de este.



Figura 11-3: Conexión de motor-bomba

Realizado Por: López C & Puma I

3.5.3. Cableado eléctrico

Las conexiones eléctricas se encuentran operativas. Sin embargo, en la figura 3-12 se observa que las canaletas en donde se encuentra el cableado son pequeñas por lo que es necesario cambiarlas por unas de (25x30) mm para que no exista cables colgados.



Figura 12-3: Estado de las conexiones y cableado eléctrico

Realizado Por: López C & Puma I

3.6. Evaluación de la interfaz del software LabVIEW del banco de pruebas

3.6.1. Bomba axial

Se realizó un análisis inicial a la interfaz del software LabVIEW de la bomba axial, el panel frontal (figura 3-13) tiene las siguientes características:

- Diagrama representativo de la bomba axial.
- Fecha y hora de la práctica.
- Control de texto donde se ingresa el número de grupo y el número de la práctica.
- Control de texto donde se ingresa el grado de apertura de los álabes del rotor.
- Indicador de presión de 0 a 12 mH₂O.
- Indicador de presión de -3 a 3 mH₂O.
- Indicador de presión diferencial a 0 a 1 psi.
- Indicador de fuerza de 0 a 60 kg.
- Indicador de caudal en l/s.
- Indicador de velocidad angular de 0 a 2200rpm.
- Botón de STOP

Existe un procedimiento a seguir, para garantizar el funcionamiento del banco de pruebas:

- Dentro de la interfaz existe un push button, permite seleccionar la plantilla de acuerdo con la apertura de la válvula de succión, al 50% o al 100% de apertura.
- Existe un indicador circular, muestra la presión del manómetro de 0 a 12 mH₂O, si la presión es la correcta indica una señal verde y si existe una sobrepresión indicará una luz roja, a su vez sonará una alarma indicando peligro.
- Existe un OK button, es utilizado para adquirir datos y almacenarlos antes de que se imprima el reporte.

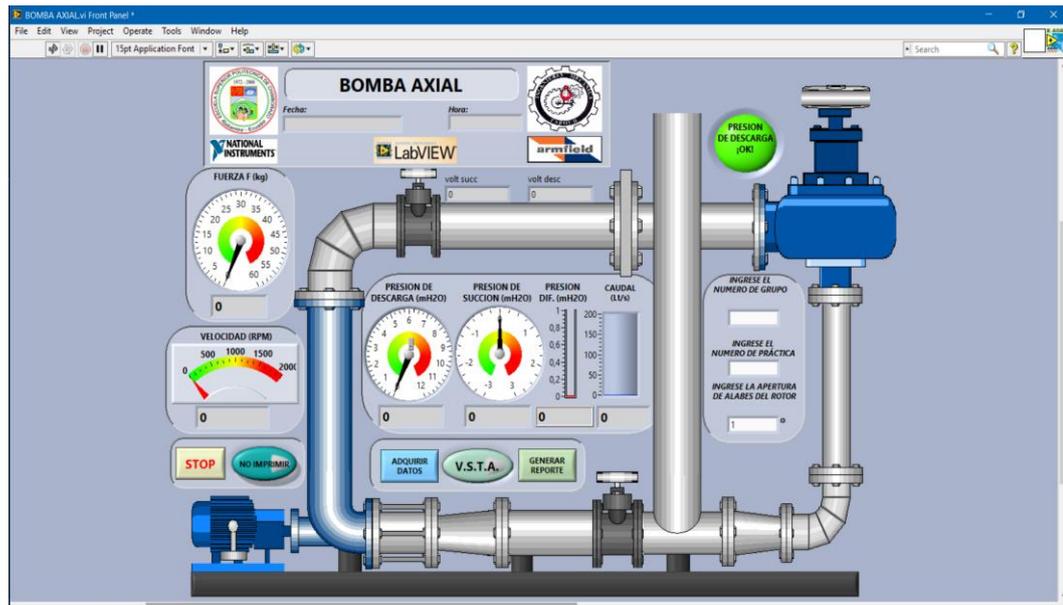


Figura 13-3:Panel frontal de la bomba axial

Fuente: (GUILLÉN SALAZAR, 2011 pág. 124)

3.6.2. Turbina Kaplan

Se realizó un análisis inicial a la interfaz del software LabVIEW de la turbina Kaplan, el panel frontal (figura 3-14) tiene las siguientes características:

- Diagrama representativo de la turbina Kaplan.
- Control de texto donde se ingresa el número de grupo y el número de la práctica.
- Control de texto donde se ingresa la apertura de los álabes del rotor de la bomba axial y de la turbina Kaplan.
- Indicador de presión de 0 a 12 mH₂O.
- Indicador de presión de -3 a 3 mH₂O.
- Indicador de fuerza muestra la lectura de 0 a 250 Newtons.
- Indicador de caudal en l/s.

- Indicador de velocidad angular de 0 a 3000rpm.

Existe un procedimiento a seguir para garantizar el funcionamiento del banco de pruebas:

- Un button OK, se presiona para adquirir los datos y almacenarlos antes de imprimir el reporte.

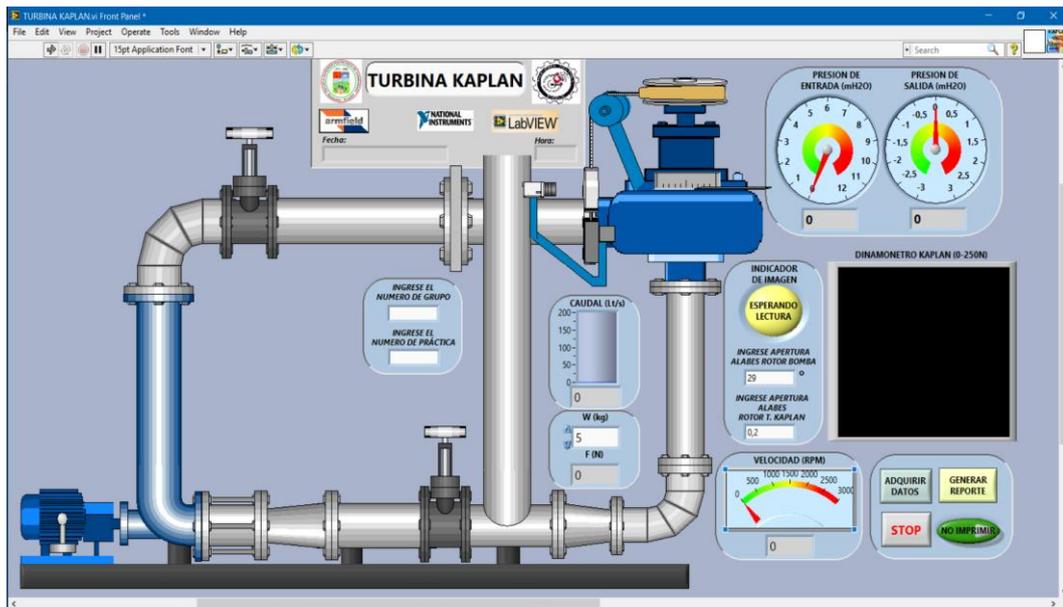


Figura 14-3:Panel frontal de la turbina Kaplan

Fuente: (GUILLÉN SALAZAR, 2011 pág. 127)

3.7. Criterios para la selección de la turbina

3.7.1. Determinación de la velocidad específica (n_s).

Basándonos en las dimensiones conocidas del rotor, de la ecuación (1) se puede despejar la velocidad específica de la turbina:

$$n_s = \frac{n\sqrt{P}}{H^{5/4}}$$

Donde

n_s =Velocidad específica en rpm

n =Velocidad angular

P =Potencia de diseño de la turbina en CV

H =Carga de diseño de la turbina en m

Se conoce los siguientes datos, los cuales se encuentran en la placa de características del equipo:

$$n = 135 \text{ rpm}$$

$$H = 1 \text{ m}$$

$$P = 22 \text{ kW} = 29,5025 \text{ CV}$$

$$n_s = \frac{135 \sqrt{29,5025}}{(1)^{5/4}}$$

$$n_s = 733 \text{ rpm}$$

Tabla 6-3: Rango de velocidad específica

Tipo de turbina	Velocidad específica (rpm)
Pelton con un inyector	$5 < N_s < 30$
Pelton con varios inyectores	$30 < N_s < 50$
Francis lenta	$50 < N_s < 100$
Francis normal	$100 < N_s < 200$
Francis rápida	$200 < N_s < 300$
Francis Extra rápidas	$300 < N_s < 500$
Kaplan	$500 < N_s < 1200$

Fuente: (LOSSADA, 2014)

Realizado por: López C & Puma I

Mediante el cálculo realizado, se comprobó que la turbina Kaplan se encuentra dentro de los parámetros establecidos, en un rango de $500 < N_s < 1200$, tabla 3-6, indica que la turbina seleccionada es la correcta para el estudio y análisis.

3.7.2. Determinación de velocidad angular (n)

Una vez conocida la velocidad específica (n_s), el siguiente paso a seguir es encontrar el coeficiente de velocidad periférica (k_u), mediante la ecuación (12)

$$k_u = 0,79 + 1,61 \cdot 10^{-3} \cdot n_s \quad (12)$$

$$k_u = 0,79 + 1,61 \cdot 10^{-3} \cdot (733)$$

$$k_u = 1,97$$

Para el cálculo de las revoluciones, tener en cuenta la altura de la entrada de fluido, se reemplaza los valores en la ecuación (13).

$$n = \frac{60k_u \sqrt{2gH}}{\pi D_M} \quad (13)$$

$$n = \frac{60(1,97) \sqrt{2(9,81)(1)}}{0,2032\pi}$$

$$n = 820,15 \text{ rpm}$$

3.7.3. Determinación de la potencia útil (P_u)

De la ecuación (1), se despeja la potencia útil y se reemplaza los valores conocidos, se obtiene valores en caballos de vapor (CV).

Datos

$$1 \text{ CV} = 0,736 \text{ kW}$$

$$1 \text{ kW} = 1,36 \text{ CV}$$

$$n_s = \frac{n\sqrt{P}}{H^{5/4}}$$

$$P_u = \left(\frac{n_s \cdot H^{5/4}}{n} \right)^2$$

$$P_u = \left(\frac{(733) \cdot (1,50)^{5/4}}{820,15} \right)^2$$

$$P_u = 2,20 \text{ CV}$$

$$P_u = 1619,2 \text{ W}$$

3.7.4. *Determinación del caudal requerido*

A partir de la ecuación (6), se puede despejar el caudal y reemplazar los datos, de esta manera poder obtener el caudal en unidades l/s.

$$P_u = \frac{\gamma * Q * H_m}{75}$$

Donde:

P_u : potencia útil (J/s)

Q: caudal real (m³/s)

γ : peso específico (kg/m³)

H_m : cabeza manométrica (mca)

$$Q = \frac{P}{\gamma * g * H}$$

$$Q = \frac{1619,2}{1000 * 9,8 * 1,5} * \frac{1000}{1} * \frac{60}{1}$$

$$Q = 6608,9 \text{ l/min}$$

3.8. **Actividades de mantenimiento**

Antes de aplicar el mantenimiento al banco de pruebas se realizó un análisis a cada equipo, de esa manera tener un diagnóstico físico técnico de los elementos: instrumentos y equipos. Algunos de los equipos se encuentran en malas condiciones, se aplicará mantenimiento correctivo.

3.8.1. *Mantenimiento de los elementos del banco de pruebas*

Mediante la inspección realizada al banco de pruebas de la turbina Kaplan, se encontraron tuberías corroídas, hélice directriz corroídas, sensores descalibrados y mal funcionamiento de algunos de los elementos que se detallan a continuación.

3.8.1.1. *Válvula de compuerta*

En el sistema hidráulico se encuentran dos válvulas principales, ubicadas en la línea de succión y

en la línea de descarga, la válvula de la línea de succión se encuentra obstruida y no permite la apertura o el cierre del disco. Se desmontó la parte superior de la válvula de manera que facilite el acceso al mantenimiento, en la figura 3-15 se puede observar el estado de los componentes antes de ser extraídos.



Figura 15-3 Parte superior de la válvula

Realizado Por: López C & Puma I

Con ayuda de una prensa hidráulica se desmontó la cremallera y los pasadores que sostienen al volante, para desmontar el tornillo sin fin y los rodamientos destruidos, ver figura 3-16, en la misma se visualiza los componentes extraídos.



Figura 16-3:Partes de la válvula extraídas

Realizado Por: López C & Puma I

Además, se realizó la actividad de remoción de la grasa antigua, para este proceso se utilizaron las siguientes herramientas:

- Alicates
- Alicate de presión
- Extractor de pasadores tipo hexagonal
- Martillo de goma
- Una varilla de 3/4 lisa (para la extracción completa del pasador del tornillo sin fin).
- Una varilla de 3/16 lisa (para la extracción del pasador del volante).
- Removedor de pernos (W40)

Se realizó la limpieza a la parte superior de la válvula, ver figura 3-17, se aplicó la metodología de tintas penetrantes la cual consiste en ensayos no destructivos, en el que se determinó el grado de desgaste de las crestas de la cremallera y del tornillo sin fin, se comprobó que las crestas se encuentran en buen estado.



Figura 17-3: Despiece de la parte superior de la válvula

Realizado Por: López C & Puma I

Realizado la limpieza de la válvula, se reemplazó los rodamientos deteriorados por unos nuevos en la serie CBM-51104. Se armó el cabezal de la válvula, ver figura 3-18, con la ayuda de la prensa hidráulica se colocó la cremallera, el tornillo sin fin y los rodamientos nuevos.

Se realizó actividades de lubricación en la cremallera, el tornillo sin fin y los rodamientos, garantizando que no exista fricción entre las partes móviles de la válvula, la grasa utilizada es de base automotriz para rodamientos de rueda DRK.



Figura 18-3: Mantenimiento de la válvula

Realizado Por: López C & Puma I

3.8.1.2. Tablero de control de velocidad

La figura 3-19 representa la parte eléctrica, se puede visualizar el tablero principal y el tablero de control de velocidad, misma que es controlada por medio de un selector, la selección de la velocidad se da en tiempos diferentes en el que se puede seleccionar el caudal, siendo alto y bajo.



Figura 19-3 Sistema de control eléctrico

Fuente: López C & Puma I

Se encontraron partículas contaminantes como polvo, principalmente en el relé de sobrecarga que se encuentra en el tablero de control de velocidad, ver figura 3-20, por lo que se realizó tareas de limpieza para evitar posibles daños en el equipo



Figura 20-3:Relé de sobrecarga

Realizado por: López C & Puma I

3.8.1.3. *Tanque de almacenamiento*

Mediante la inspección, se determinó que el tanque de almacenamiento de agua se encontraba corroído, ver figura 3-21b, el tanque es de 12 pulgadas de diámetro, su corto diámetro dificulta realizar las actividades de mantenimiento.



Figura 21-3:Mantenimiento del tanque

Realizado Por: López C & Puma I

Dentro de la constitución del tanque de almacenamiento, se encuentran cañerías de 3/8in que se conectan a la línea de descarga de la turbina y cumplen con la función de aligerar el fluido al tanque de almacenamiento, se lo puede observar en la figura 3-21.

En el exterior del tanque de almacenamiento se encuentra la mirilla de nivel de 3/4in de diámetro y permite visualizar la cantidad de agua, la mirilla se encontraba con presencia de óxido producto de la estanqueidad del agua, ver figura 3-22.



Figura 22-3: Mirilla de nivel del agua

Realizado Por: López C & Puma I

La mirilla fue remplazada por otra en material acrílico, ver figura 3-23, con el cambio de la mirilla se observa fácilmente la cantidad de agua faltante para llegar al límite del tanque.



Figura 23-3: Acrílico nuevo del nivel de agua

Realizado Por: López C & Puma I

Cabe recalcar que la parte exterior del tubo de acrílico se encuentra la numeración en centímetros(cm), lo cual tiene como función la interpretación de lectura sobre el nivel de llenado del fluido en todo el sistema hidráulico.

3.8.1.4. Unión entre la bomba y la tubería de succión

Se realizó la prueba de funcionamiento para determinar posibles fallas dentro del sistema hidráulico del banco de pruebas, se evidenció que en la unión entre la bomba y la tubería de succión existía un goteo constante de fluido, figura 3-24.



Figura 24-3: Unión de asbesto fracturada

Realizado Por: López C & Puma I

Se desmontó la unión, para ello se utilizó herramientas como: llaves mixtas N°31mm, removedor W40 para aflojar los pernos que sujetaban las bridas, además existía presencia de sarro en las hélices de la bomba axial, ver figura 3-25.



Figura 25-3: Hélices de la bomba axial

Realizado Por: López C & Puma I

Se aplicó barniz anticorrosivo marca wesco de serie SKU W4-CFG, en la tubería de succión y se reemplazó los empaques, para garantizar el sellado entre superficie y el transporte sin que exista pérdidas de fluido.



Figura 26-3: Limpieza y cambio de empaques

Realizado Por: López C & Puma I

En la tubería que une el cuerpo de la bomba axial con la línea de succión, existe particiones de tubos de diferentes diámetros que cumplen la función de transportar el fluido en dirección axial, ver figura 3-26, se limpió y se aplicó barniz anticorrosivo, para garantizar un óptimo transporte del fluido (ver figura 3-27).



Figura 27-3:Tubo de unión del cuerpo de la bomba a la tubería

Realizado Por: López C & Puma I

Se construyó una nueva unión en acero inoxidable en las siguientes dimensiones, un diámetro de 290mm, una altura de 350mm y un espesor de 8mm, ver figura 3-28, el cual garantiza el transporte de fluido de acuerdo con las especificaciones de presión y caudal.

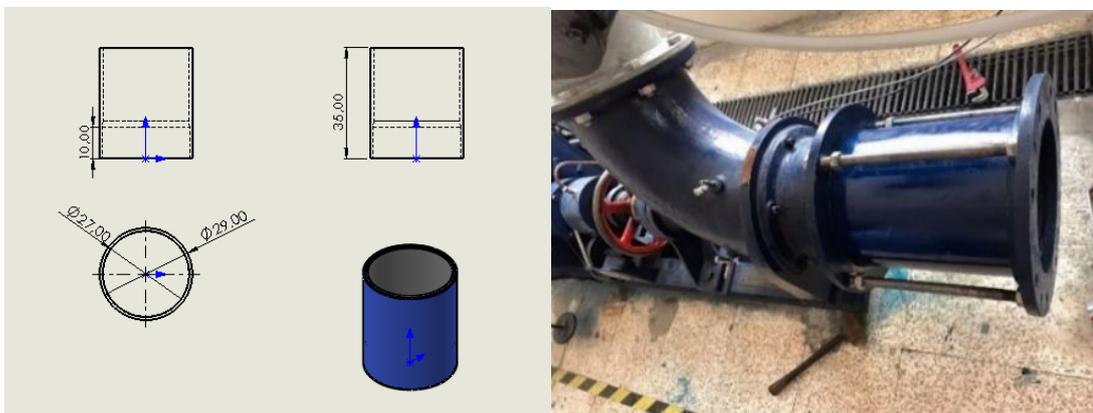


Figura 28-3:Construcción de la unión de la bomba a la tubería

Realizado Por: López C & Puma I

3.8.1.5. Hélice directriz de la bomba axial

La hélice directriz de la bomba axial, figura 3-29, está compuesta por álabes orientables y un casco que sujeta los álabes de la hélice, el cual se encontraba desalineado.



Figura 29-3:Hélice de la bomba axial

Realizado Por: López C & Puma I

Se desmontó el casco y se determinó que el material predominante en la estructura de la hélice es bronce, debido al material de la hélice se realizó una limpieza profunda utilizando lijas #280.

Las actividades realizadas son las siguientes (ver figura 3-30):

- Limpieza y control de corrosión de la estructura de la hélice (casco, álabes, estructura interna, acople de sujeción de las hélices) y cuerpo de la bomba.
- Lubricación del eje de la hélice.
- Reemplazo de pernos de sujeción.



Figura 30-3:Mantenimiento en la hélice

Realizado Por: López C & Puma I

El siguiente paso fue el montaje de todos los componentes de la hélice, ver figura 3-31, hay que tener cuidado de que no exista abolladuras al momento del montaje debido a la fragilidad del material, para el montaje del acople tener en cuenta la numeración marcada en los puntos de la

unión, el mismo procedimiento se aplicó en el montaje del casco, posteriormente se cambió los pernos de sujeción del casco.

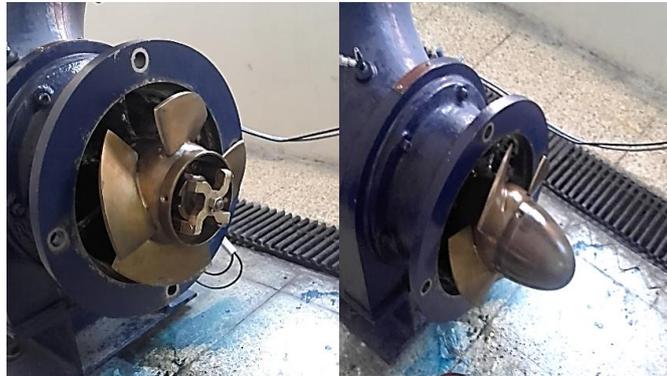


Figura 31-3: Montaje de los componentes de la hélice

Realizado Por: López C & Puma I

3.8.1.6. Cañerías de nivel de fluido del banco de pruebas

En la figura 3-32 se visualiza las cañerías conectadas con los instrumentos de medición para obtener la lectura de datos que emiten los sensores.



Figura 32-3: Visualización de las cañerías a cambiar

Realizado Por: López C & Puma I

Las cañerías del banco de pruebas se han deteriorado con el tiempo, se remplazó por unas industriales en un diámetro de $\frac{1}{2}$ in, llegan a soportar presiones alrededor de los 150 PSI garantizando durabilidad, las cañerías que fueron cambiadas son las siguientes:

- Cañerías de los manómetros de presión en la línea de succión y descarga de la bomba axial.
- Cañería del sensor de caudal en la línea de descarga de la turbina
- Cañería de nivel de desfogue del tanque de almacenamiento.

- Cañería del manómetro de la línea de succión de la turbina.
- Mirilla de nivel vertical del llenado del tanque de almacenamiento.



Figura 33-3:Cañerías de nivel de fluido

Realizado Por: López C & Puma I

Las actividades de mantenimiento antes mencionadas tuvieron un lapso de 2 meses, en el cual se dio solución a los problemas suscitados dejándolo operativo y funcional, y listo para realizar las pruebas de funcionamiento y la toma de datos, previos al análisis e interpretación de los parámetros de funcionamiento.

CAPÍTULO IV

4. PROCESO DE ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Pruebas de funcionamiento

Después de haber realizado el mantenimiento preventivo y correctivo al banco de pruebas, se llenó el tanque de almacenamiento, para encenderlo y verificar que no existan fugas.

4.1.1. *Prueba Motor-Bomba*

Se energizó el motor y se comprobó que el arranque y la secuencia de giro es la correcta, ver figura 4-1, es posible continuar con los ensayos de laboratorio. La conexión del motor trifásico es en triángulo con un voltaje entre fases de 220 V.



Figura 1-4: Conexión eléctrica del motor -bomba

Realizado Por: López C & Puma I

4.1.2. *Prueba en la unión de la bomba*

Se encontró fugas en la unión de la brida, para corregir el problema fue necesario desacoplar la unión y aplicar la pega Sikabond AT Metal en la unión de la tubería, en la figura 4-2 se detalla el antes y el después de corregir la fuga.



Figura 2-4: Corrección de fugas detectadas.

Realizado Por: López C & Puma I

4.1.3. Pruebas de funcionamiento de los instrumentos

4.1.3.1. Manómetros

Se revisó que los manómetros permitan la lectura de datos, sin que exista oscilación de las agujas, ver figura 4-3, para obtener la lectura de presión se debe de abrir las llaves de paso que dirige el fluido hacia los instrumentos, actualmente se encuentran instalados cuatro manómetros, los cuales permiten la lectura de presión tanto en la bomba axial como en la turbina Kaplan, su unidad de medida es metros de agua (mH₂O).



Figura 3-4: Manómetros instalados en la bomba axial

Realizado Por: López C & Puma I

4.1.3.2. Tacómetros

Se revisó que permitan la lectura de datos, de manera que no exista oscilación de las agujas, ver figura 4-4, los tacómetros utilizan una correa que gira a medida que la polea y el eje del motor giran, actualmente se encuentran instalados dos tacómetros tanto en la bomba axial como en la turbina Kaplan.

Estos instrumentos permiten la lectura de velocidad en revoluciones por minuto(rpm), velocidad que es marcada al momento de poner en marcha el banco de pruebas, además para complementar a la lectura de datos se encuentran instalados sensores de proximidad, que son los encargados de enviar la señal para ser interpretados en el software.

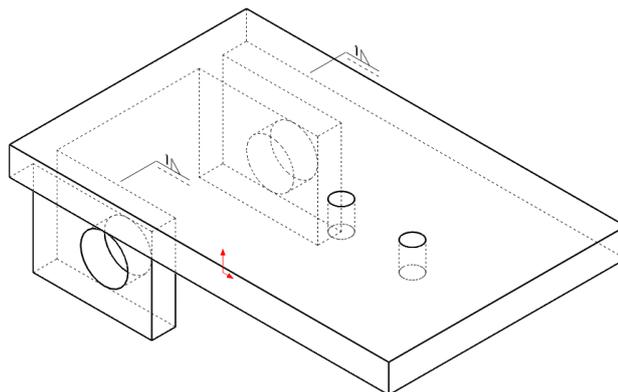


Figura 4-1: Tacómetro de la turbina

Realizado Por: López C & Puma I

4.1.3.3. Base sensor de peso turbina Kaplan

Para tomar los datos de fuerza se presentó la necesidad de implementar un sensor de peso de 20Kg, se construyó la base donde va a ser ubicado el sensor de peso, la base metálica es sujeta por pernos.

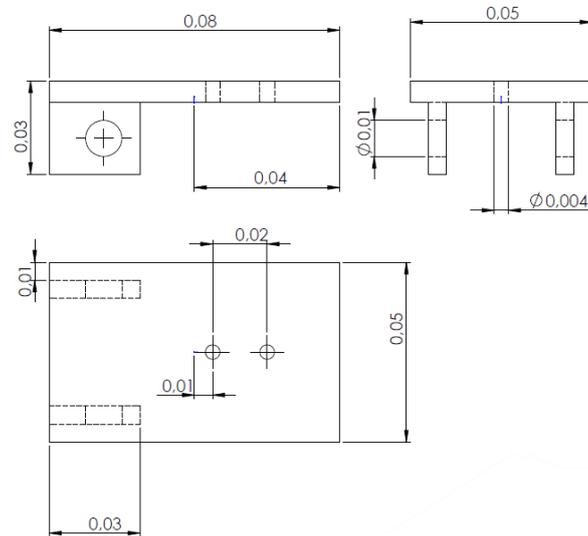


Gráfica 1-4: Base sensor de peso

Realizado por: López C & Puma I

El prototipo fue diseñado en el software SOLIDWORKS, gráfica 4-1, para su construcción se tomó en cuenta los datos de la gráfica 4-2 los cuales se detallan a continuación:

- Alto 30mm
- Ancho: 50 mm
- Largo 80mm
- Diámetros: 10 y 4 mm



Gráfica 2-4: Medidas para la elaboración de la base metálica

Fuente: López C & Puma I

4.1.4. Pruebas en la Turbina

En la turbina Kaplan, figura 4-5, se revisó que el flujo de agua sea suficiente para mover los álabes del rotor, se comprobó que el mecanismo de orientación de los álabes del distribuidor se encuentre trabajando correctamente, también se revisó que no exista fugas en las uniones de la turbina con la tubería de succión y descarga.



Figura 5-4: Funcionamiento de la turbina

Realizado Por: López C & Puma I

4.2. Actualización de la interfaz de comunicación del software LabVIEW

Anteriormente existía dos interfaces, figura 3-13 y 3-14, se mejoró la interfaz de programación del software LabVIEW, de manera que abarque todo el sistema de programación en una sola ventana, figura 4-6.

Tener en cuenta que los drivers de programación tienen que ser compatibles con la CDAQ-9172, por lo que se utilizó la versión del software LabVIEW 2017, la interfaz de programación consta de bloques que se ejecutan al mismo tiempo que los sensores.

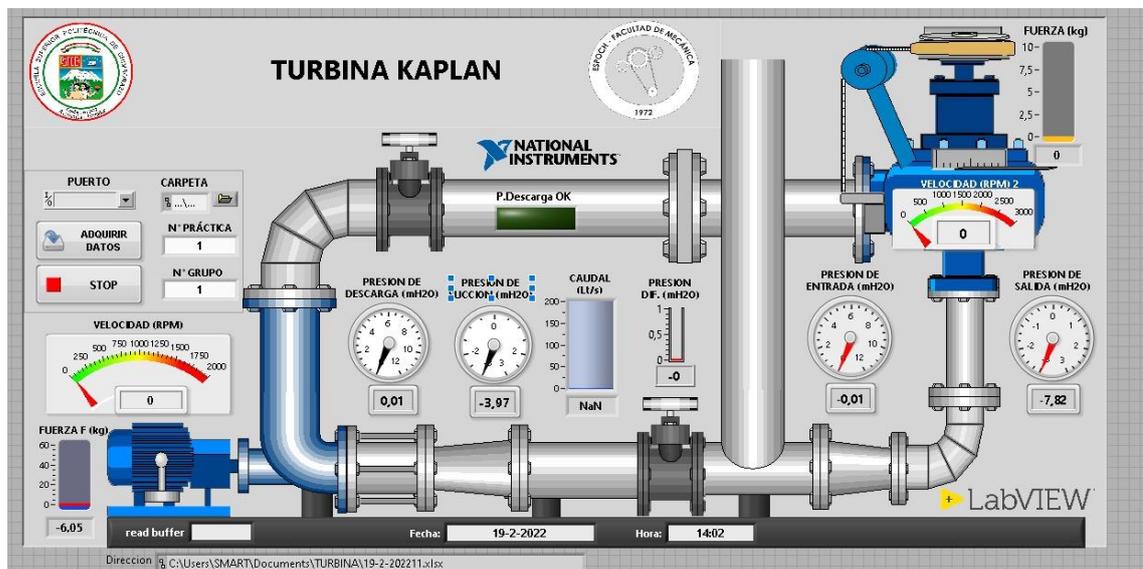


Figura 6-4: Interfaz de programación banco de pruebas turbina Kaplan

Realizado por: López C & Puma I

El programa LabVIEW se compone de un panel frontal y un diagrama de bloques. El panel frontal es la interfaz interactiva del usuario, simula el panel del instrumento. El panel frontal contiene botones, pulsadores, gráficas y otros controles que permiten monitorear, registrar y controlar parámetros de funcionamiento.

El diagrama de bloques, ver figura 4-7, es la programación donde se define la funcionalidad que contiene el código de fuente, sección donde se realiza la implementación del programa, con el propósito de controlar o realizar cualquier proceso de todo el panel frontal.

Los bloques de programación fueron realizados de manera secuencial, cada bloque se ejecuta al mismo tiempo, lo que permite que la toma de datos sea más dinámica, además el diagrama contiene funciones y estructuras incorporadas en las bibliotecas del software LabVIEW.

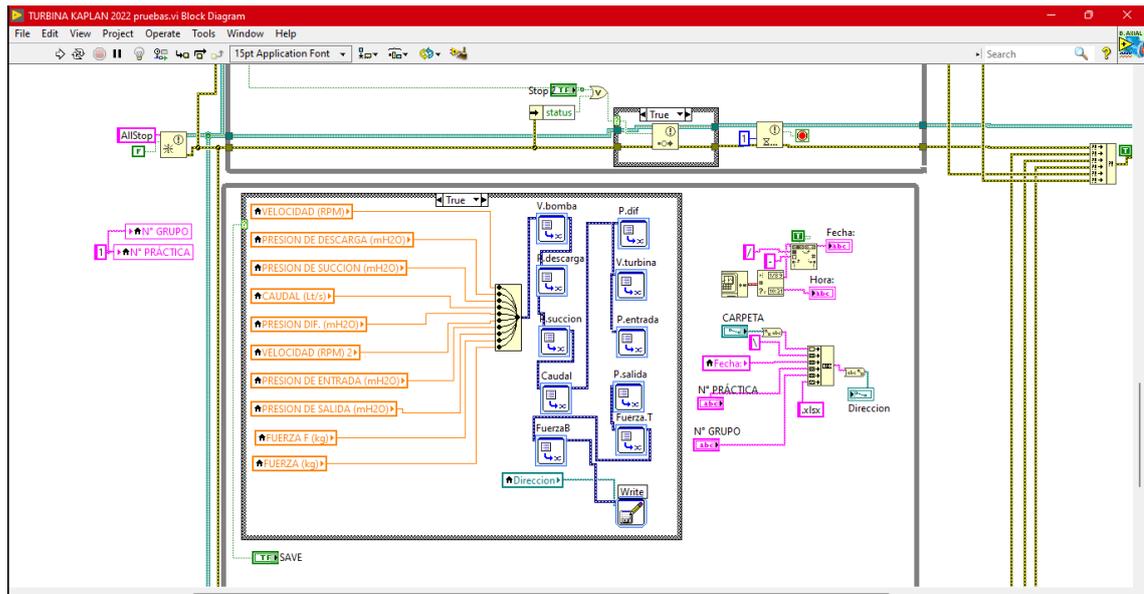


Figura 7-4: Diagrama de bloques

Realizado por: López C & Puma I

4.3. Ensayos en el banco de pruebas de la turbina Kaplan

Después de haber terminado con el mantenimiento de todos los componentes del banco de pruebas y la programación, se ha realizado pruebas de funcionamiento.

4.3.1. Bomba axial

Para realizar el cálculo se tomará en cuenta datos específicos, proporcionados por la placa de características del equipo, datos como:

Diámetros de succión	$D_s = 11'' = 0,271\text{m}$
Diámetros de descarga	$D_d = 14'' = 0,344\text{m}$
Brazo del motor	$d = 0.365\text{m}$

Así como también se tiene datos obtenidos desde la programación de LabVIEW

Presión de descarga	$P_d = 4,9361\text{ mca}$
Presión de succión	$P_s = -,3189\text{ mca}$
Altura diferencial	$h_v = 0,8682\text{ m}$
Velocidad del motor de la bomba	$N_M = 1184,6\text{rpm}(1200\text{rpm})$
Fuerza ejercida por el barco del motor	$F = 36,552\text{N}$

Con los datos obtenidos, el siguiente paso es realizar el cálculo de los parámetros de funcionamiento del banco de pruebas.

4.3.1.1. Cálculo del caudal

Para realizar el cálculo del caudal utilizaremos la ecuación (3)

$$Q=C_q*A_o*\sqrt{2gh_v}$$

Donde:

h_v : altura diferencial(mca)

A_o : área del orificio (m^2)

C_q : Coeficiente de gasto

A_d : área de la tubería de descarga (m^2)

m : relación de áreas.

Para realizar el cálculo de caudal se necesita variables como el Coeficiente de Gasto (C_q), que depende de la relación de áreas m y el número de Reynolds Re .

$$m=\frac{A_o}{A_d} \quad (14)$$

De la ecuación (14) se obtiene, la relación entre áreas

$$m=\frac{D_o^2}{D_e^2}$$

$$m=\frac{(0,271)^2}{(0,344)^2}$$

$$m=0,620$$

Para el cálculo del número de Reynolds se debe encontrar la rugosidad relativa para el hierro galvanizado (ecuación 15), teniendo en cuenta el diámetro de la tubería de las tablas que se encuentran en los anexos (anexo 1).

$$\text{Rugosidad Rel}=\frac{\varepsilon}{D} \quad (15)$$

$$\text{Rugosidad Rel} = \frac{0,15}{344}$$

$$\text{Rugosidad Rel} = 0,000436$$

En el diagrama de Moody (anexo 2) se puede encontrar el factor de rozamiento y el número de Reynolds de acuerdo con el diámetro de la tubería especificada.

$$F = 0,016$$

$$\text{Re} = 2,2 \times 10^6$$

Utilizando el anexo 3 se puede determinar el Coeficiente de Gasto (Cq) obteniendo un valor de:

$$Cq = 0,82$$

Una vez obtenidos los valores se procede a reemplazar en la ecuación (3)

$$Q = C_q * A_o * \sqrt{2gh_v}$$

$$Q = (0,82) * \frac{\pi}{4} (0,271)^2 * \sqrt{2(9,81)(0,4244)}$$

$$Q = 0,136 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q = 136,48 \text{ L/s}$$

4.3.1.2. Cabeza manométrica

A partir de la ecuación (5), se puede encontrar la cabeza manométrica o también conocida como la altura neta.

$$\frac{P_s}{\delta} + \frac{V_s^2}{2g} + Z_s + H_m = \frac{P_D}{\delta} + \frac{V_D^2}{2g} + Z_D$$

Donde:

ΔP = diferencia de presiones entre la succión y descarga (mca)

V_D = velocidad de descarga (m/s)

V_S = velocidad de succión (m/s)

ΔZ = diferencia de alturas entre la succión y descarga (m)

$$H_m = \Delta P + \frac{V_D^2 - V_S^2}{2 * g} + \Delta Z$$

$$H_m = [4.9361 - (-0.3189)] + \frac{(1.8726)^2 - (3.2244)^2}{2 * 9.8} + 70$$

$$H_m = 5,603 \text{ mca}$$

4.3.1.3. Potencia útil o hidráulica (P_u)

A partir de la ecuación (6), se obtiene los siguientes datos

$$P_u = \frac{\gamma * Q * H_m}{75}$$

$$P_u = \frac{1000 * 0,136 * 5,603}{75}$$

$$P_u = 10,19 \text{ (CV)}$$

$$P_u = 7504,23 \text{ W}$$

4.3.1.4. Potencia de accionamiento (P_a)

A partir de la ecuación (7), se obtiene los siguientes datos

$$P_a = F * d * N$$

$$P_a = 0.001396 F * d * N$$

$$P_a = 0.001396 * 36.552 * 0.365 * 1184.6$$

$$P_a = 22.063 \text{ CV}$$

$$P_a = 16238,24 \text{ W}$$

4.3.1.5. Eficiencia total (η_t)

A partir de la ecuación (8), se obtiene los siguientes datos

$$\eta_t = \frac{P_u}{P_a} * 100$$

$$\eta_t = \frac{7504,23}{16238,24} * 100$$

$$\eta_t = 46,21\%$$

Realizado el cálculo de la bomba axial, a continuación, se presenta los reportes de datos que describen los resultados obtenidos durante los ensayos en el laboratorio de Turbomaquinaria Hidráulica

4.3.2. Reportes de datos

Los reportes de datos se realizaron variando la apertura de las válvulas de succión y descarga, para este caso los reportes se realizaron a una apertura de las válvulas al 50 %

VSTA: válvula de succión totalmente abierta

VDTA: válvula de descarga totalmente abierta

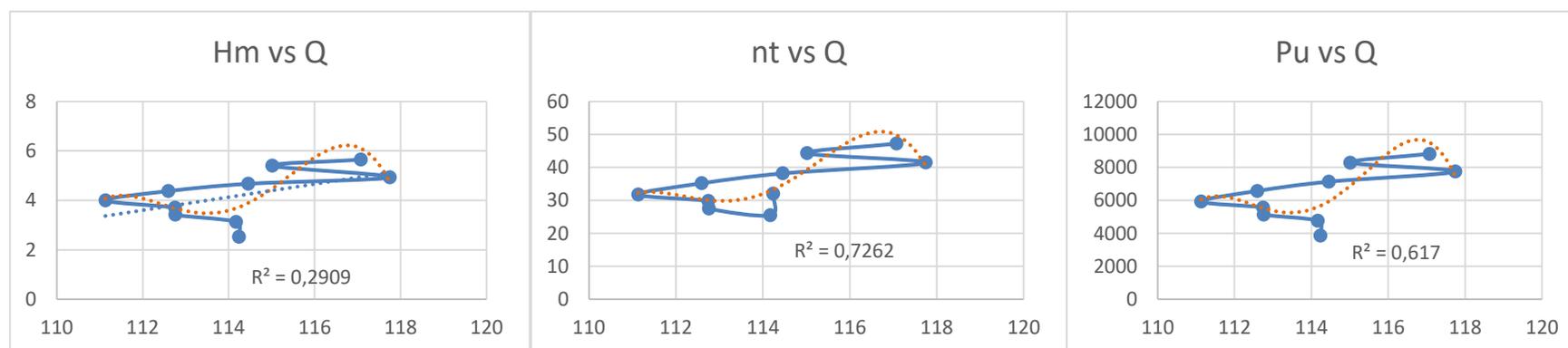
Apertura de los álabes del rotor a 15°.

Apertura de los álabes del distribuidor a 30° y 60°

Tabla 1-4: Datos y cálculos de la bomba axial, apertura de 15°-30 ° y válvulas al 50%.

Apertura de los álabes del rotor	APERTURA		PRESIONES		REV.	PRES. DIF.	CAUDAL			POTENCIAS				η_i %
	Succión	Descarga	Ps	Pd	N	h_v	Q	Vs	Vd	W	Pa	Hm	Pu	
			mca	mca	RPM	mca	Lt/s	m/s	m/s	kg	CV	mca	CV	
15	-50%	-50%	0,2513	1,9596	765	0,424422	114,24	1,22912718	1,980501	3,15	12,045346	2,531217	3855,42	32,008
	-50%	-50%	0,2504	2,5537	1185	0,423919	114,17	1,22839877	1,979328	3,15	18,658477	3,1260814	4758,665	25,504
	-50%	-50%	0,2498	2,8483	1185	0,413518	112,76	1,213235	1,954894	3,155	18,688094	3,418183	5139,084	27,499
	-50%	-50%	0,252	3,1333	1185	0,413434	112,75	1,21311117	1,954695	3,15	18,658477	3,7010526	5563,798	29,819
	-50%	-50%	0,2535	3,4362	1185	0,401683	111,13	1,19574707	1,926716	3,15	18,658477	3,9990174	5925,679	31,759
	-50%	-50%	0,2533	3,809	1185	0,412304	112,59	1,21145203	1,952021	3,15	18,658477	4,3751353	6568,152	35,202
	-50%	-50%	0,2523	4,1002	1185	0,426056	114,46	1,23149016	1,984309	3,15	18,658477	4,6712811	7128,735	38,206
	-50%	-50%	0,2518	4,3579	1185	0,450931	117,75	1,26693091	2,041415	3,155	18,688094	4,9366453	7750,511	41,473
	-50%	-50%	0,2514	4,8275	1185	0,430231	115,02	1,23750991	1,994008	3,155	18,688094	5,4006153	8282,042	44,317
	-50%	-50%	0,2521	5,0699	1185	0,445797	117,08	1,25969818	2,029761	3,15	18,658477	5,6469045	8815,003	47,244

Realizado por: López C & Puma I



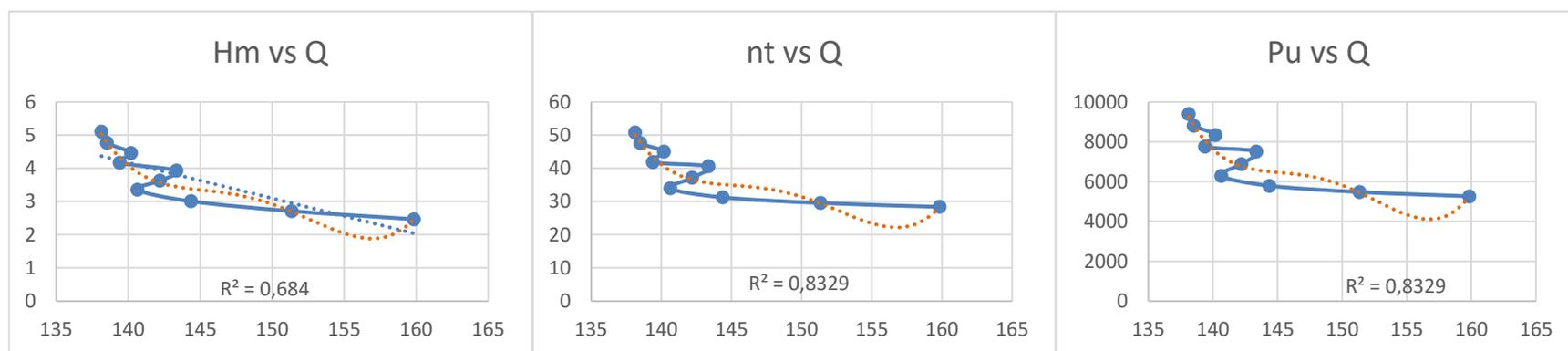
Gráfica 3-4: Curvas características de la bomba axial 15°-30°

Realizado por: López C & Puma I

Tabla 2-4: Datos y cálculos de la bomba axial, apertura de 15°-60 ° y válvulas al 50%.

Apertura de los álabes del rotor	APERTURA		PRESIONES		REV.	PRES. DIF.	CAUDAL			POTENCIAS				n _t
	Succión	Descarga	Ps	Pd	N	h _v	Q	V _s	V _d	W	Pa	Hm	Pu	
			mca	mca	RPM	mca	Lt/s	m/s	m/s	kg	CV	mca	CV	%
15	-50%	-50%	0,2459	1,7729	1185	0,830889	159,84	1,71976495	2,771069	3,125	18,510394	2,4676267	5258,89	28,41
	-50%	-50%	0,2451	2,042	1185	0,744964	151,35	1,62841571	2,623878	3,125	18,510394	2,7126431	5473,983	29,572
	-50%	-50%	0,2471	2,3586	1185	0,677879	144,37	1,55336548	2,502949	3,125	18,510394	3,0078065	5789,873	31,279
	-50%	-50%	0,2467	2,7138	1185	0,643406	140,65	1,51335243	2,438475	3,125	18,510394	3,3534777	6288,992	33,975
	-50%	-50%	0,2461	2,9829	1185	0,657656	142,2	1,53001963	2,465331	3,125	18,510394	3,6272788	6877,387	37,154
	-50%	-50%	0,2452	3,2842	1185	0,668372	143,36	1,54243499	2,485336	3,125	18,510394	3,9325783	7516,744	40,608
	-50%	-50%	0,2463	3,5373	1185	0,632021	139,4	1,49990342	2,416805	3,125	18,510394	4,1740155	7758,234	41,913
	-50%	-50%	0,2451	3,8215	1185	0,639266	140,2	1,50847648	2,430619	3,125	18,510394	4,4615029	8339,984	45,056
	-50%	-50%	0,2455	4,1371	1185	0,624028	138,52	1,49038988	2,401476	3,125	18,510394	4,77235	8814,094	47,617
	-50%	-50%	0,2463	4,4723	1185	0,620638	138,14	1,48633612	2,394944	3,125	18,510394	5,1056932	9404,1	50,804

Realizado por: López C & Puma I



Gráfica 4-1: Curvas características de la bomba axial 15 °-60°

Realizado por: López C & Puma I

4.3.3. Turbina Kaplan

Se realizó las pruebas de funcionamiento al banco de pruebas, donde para realizar el cálculo se seleccionó el punto máximo de eficiencia cuando la válvula se encuentra totalmente abierta, a una apertura de 29° los álabes del distribuidor de la bomba axial a 10 Kg de carga mecánica. También se tomará en cuenta datos específicos proporcionado por la placa de características del banco de pruebas, datos como:

Número específico de revoluciones	135
Cabeza neta de diseño	1,5ft
Diámetro tubería de succión	0,344m
Diámetro tubería de descarga	0,271m
Velocidad de la turbina	1080rpm
Número de aspas del rotor	4
Número de aspas del distribuidor	16

Así como también se tiene datos obtenidos desde la programación de LabVIEW

Lectura del sensor en la presión de succión	He= 6,4483 mca
Lectura del sensor en la presión de descarga	Hs= 0,5286 mca
Altura diferencial	h _v =0,1098
Velocidad	N=1040,7 rpm
Fuerza medida con el sensor	F=26,85N

4.3.3.1. Altura neta o salto (Hn)

A partir de la ecuación (5), se obtiene los siguientes datos que corresponden a la altura neta

$$\frac{P_e}{\gamma} + \frac{V_e^2}{2g} + Z_s + H_n = \frac{P_s}{\gamma} + \frac{V_s^2}{2g} + Z_D$$

$$H_n = \frac{P_e}{\gamma} - \frac{P_s}{\gamma} + \frac{V_e^2}{2g} - \frac{V_s^2}{2g} + Z_e - Z_s$$

$$H_n = H_e - H_s + \frac{V_e^2}{2g} - \frac{V_s^2}{2g} + Z_e - Z_s$$

Donde:

$H_e = P_e/\gamma$: lectura del sensor de entrada (mca)

$H_s = P_s/\gamma$: lectura del sensor de salida (mca)

V_e : velocidad de entrada (m/s)

V_s : velocidad de salida (m/s)

γ : Peso específico (kg/m³)

A_e : área de la tubería de entrada (m²)

A_s : área de la turbina de salida (m²)

Z_e-Z_s : 0,83 (constante de diseño) (m)

4.3.3.2. Caudal (Q)

A partir de la ecuación (3), se obtiene los siguientes datos

$$Q=C_q * A_o * \sqrt{2gh_v}$$

Para el cálculo del caudal en la turbina, el C_q analizado en la bomba axial es el mismo que utiliza la turbina Kaplan, $C_q = 0,82$

$$Q=0,82 * \frac{\pi}{4} * (0,344)^2 * \sqrt{2 * 9,8 * 0,1098}$$

$$Q=0,112 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q= 112 \text{ L/s}$$

A través de la ecuación (16), lo cual se basa en la ecuación de la continuidad

$$Q=A_e * V_e = A_s * V_s \quad (16)$$

Donde

D_e : 0,333 (m)

D_s : 0,2794 (m)

$$Q=A_e * V_e$$

$$Q=A_s * V_s$$

$$V_e = \frac{0,112}{\frac{\pi}{4} * (0,344)^2}$$

$$V_s = \frac{0,112}{\frac{\pi}{4} * (0,271)^2}$$

$$V_e = 1,20 \frac{m}{s}$$

$$V_s = 1,94 \frac{m}{s}$$

Una vez obtenidos los valores de caudal y velocidad se procede al reemplazar en la ecuación (5)

$$H_n = H_e - H_s + \frac{V_e^2}{2g} - \frac{V_s^2}{2g} + Z_e - Z_s$$

$$H_n = 6,4483 - 0,528 + \frac{(1,20)^2}{2 \cdot 9,8} - \frac{(1,94)^2}{2 \cdot 9,8} + 0,83$$

$$H_n = 6,631 \text{ m}$$

4.3.3.3. Potencia útil

Reemplazando los valores en la ecuación (17), se obtiene

$$P_u = 0,001396 \cdot N \cdot \left(W - \frac{F}{9,8} \right) \cdot d \quad (17)$$

$$P_u = 0,001396 \cdot N \cdot T$$

Dónde

$$W_1 = \left(W - \frac{F}{9,8} \right)$$

$$T = W_1 \cdot d$$

d: longitud de brazo (d=0,25) m

N: número de rpm

F: lectura en el sensor de fuerza

$$P_u = 0,001396 \cdot 1040,7 \cdot \left(25 - \frac{26,85}{9,8} \right) \cdot 0,25$$

$$P_u = 8,08 \text{ CV}$$

$$P_u = 5950,56 \text{ W}$$

4.3.3.4. Potencia hidráulica

Reemplazando los valores en la ecuación (6), se obtiene

$$P_a = \frac{\gamma * Q * H_m}{75}$$

$$P_a = \frac{1000 * 0,112 * 6,631}{75}$$

$$P_a = 9,90 \text{ CV}$$

$$P_a = 7288,08 \text{ W}$$

4.3.3.5. Rendimiento total

Reemplazando los valores en la ecuación (8), se obtiene

$$\eta_t = \frac{P_u}{P_a} * 100$$

$$\eta_t = \frac{5950,56}{7288,08} * 100$$

$$\eta_t = 81,64\%$$

Luego de realizar los cálculos correspondientes a la turbina Kaplan, a continuación, se presenta los reportes de datos, donde se detallan los resultados obtenidos durante los ensayos realizados en el laboratorio de Turbomaquinaria Hidráulica

4.3.4. Reportes de datos

Los reportes de datos se los realizó variando la apertura de las válvulas de succión y descarga, para este caso los reportes se los realizó a una apertura de las válvulas al 50 %

VSTA: válvula de succión totalmente abierta

VDTA: válvula de descarga totalmente abierta

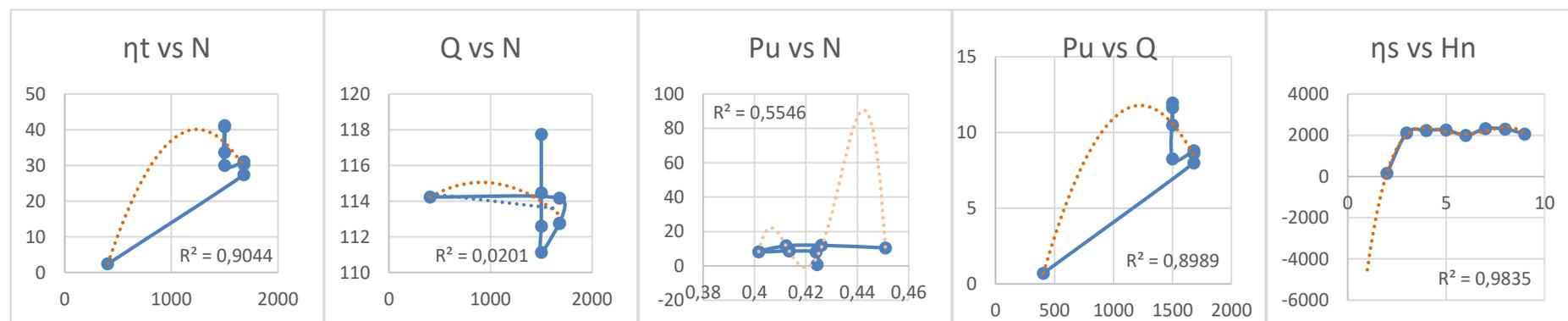
Apertura de los alabes del rotor a 15°.

Apertura de los alabes del distribuidor al 30° y 60°

Tabla 3-4: Datos y cálculos de la turbina Kaplan, apertura de 15°-30° y válvulas al 50%.

APERTURA			PESO - VELOCIDAD			ALTURAS				PRESIO N DIF.	CAUDA L	SALTO NETO	POTENCIAS		REND. TOTAL	VELOC. ESPECIF.
Álabes bomba axial	Álabes distribuidor	Alabes rotor	W	F	N	Pe	Ps	He	Hs	hv	Q	Hn	Pu	Pa	η_t	η_s
grados	grados	posición	Kg	N	rpm			mca	mca	mca	Lt/s	mca	CV	CV	%	
15	40	30	2,48	24,328	405	1,371	1,433	0,00137	0,00143	0,424422	114,2362	1,9108	0,7014	2910,5	2,40997	150,97733
	35		6,8	66,708	1680	1,787	1,662	0,00178	0,00166	0,423919	114,1685	1,9097	7,9780	2907,1	27,4434	2113,6976
	30		7,32	71,809	1680	1,993	1,704	0,00199	0,00170	0,413518	112,7591	1,8827	8,5881	2830,5	30,3412	2232,4992
	25		7,49	73,476	1680	2,193	1,679	0,00219	0,00167	0,413434	112,7476	1,8867	8,7875	2830,2	31,0490	2258,2689
	20		7,87	77,204	1500	2,405	1,674	0,00240	0,00167	0,401683	111,1338	1,8213	8,2440	2744,5	30,0391	1993,3053
	15		11,1	108,89	1500	2,666	1,682	0,00266	0,00168	0,412304	112,5934	1,8801	11,627	2822,6	41,1945	2323,2026
	10		11,4	111,83	1500	2,870	1,661	0,00287	0,00166	0,426056	114,4558	1,9164	11,941	2924,6	40,8328	2298,8960
	5		10	98,1	1500	3,050	1,654	0,00305	0,00165	0,450931	117,7497	1,9817	10,475	3111,3	33,6691	2064,7982

Realizado por: López C & Puma I



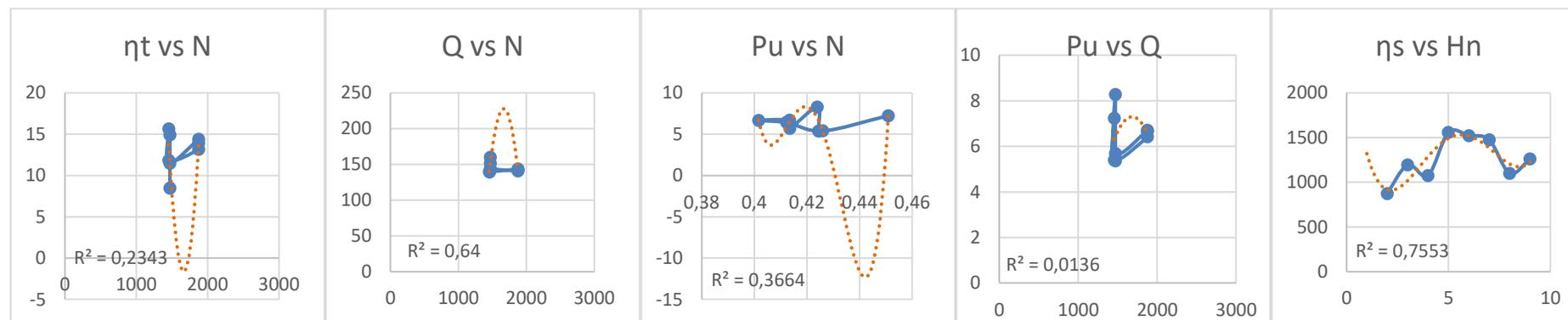
Gráfica 5-4: Curvas características de la turbina Kaplan 15°-30°

Realizado por: López C & Puma I

Tabla 4-1: Datos y cálculos de la bomba axial, apertura de 15°-60 ° y válvulas al 50%.

APERTURA			PESO - VELOCIDAD			ALTURAS				PRESION DIF.	CAUDAL	SALTO NETO	POTENCIAS		REND. TOTAL	VELOC. ESPECIF.
Alabes bomba axial	Alabes distribuidor.	Alabes rotor	W	F	N	Pe	Ps	He	Hs	hv	Q	Hn	Pu	Pa	η_t	η_s
grados	grados	posición	Kg	N	rpm			mca	mca	mca	Lt/s	mca	CV	CV	%	
15	40	60	5,22	51,2082	1470	1,24103	1,92866	0,001241	0,001929	0,424422	159,8365	2,97415	5,35877	6338,37	8,454491	871,257097
	35		8,06	79,0686	1470	1,42939	1,85087	0,001429	0,001851	0,423919	151,3464	2,74951	8,27426	5548,38	14,91295	1194,29927
	30		5,54	54,3474	1470	1,65104	1,77077	0,001651	0,001771	0,413518	144,3712	2,57422	5,68727	4955,23	11,47731	1075,13542
	25		5,12	50,2272	1875	1,89967	1,81006	0,0019	0,00181	0,413434	140,6523	2,48419	6,70422	4658,77	14,39055	1556,66019
	20		5,08	49,8348	1875	2,08802	1,83888	0,002088	0,001839	0,401683	142,2014	2,52165	6,65184	4781,1	13,91279	1521,82901
	15		4,9	48,069	1875	2,29892	1,81577	0,002299	0,001816	0,412304	143,3553	2,54994	6,41615	4873,96	13,16415	1473,93003
	10		5,31	52,0911	1455	2,4761	1,77578	0,002476	0,001776	0,426056	139,4023	2,455	5,39553	4563,11	11,82425	1099,8036
	5		7,12	69,8472	1455	2,67504	1,60533	0,002675	0,001605	0,450931	140,1991	2,47434	7,23469	4625,33	15,64145	1261,09911

Realizado por: López C & Puma I



Gráfica 6-4: Curvas características de la bomba axial 15°-60°

Realizado por: López C & Puma I

4.4. Análisis de costos

4.4.1. Costos directos

Para el desarrollo de este proyecto técnico se realizó un financiamiento de:

Tabla 5-4:Costos directos sistema eléctrico/electrónico

Eléctrico/ Electrónico				
Elemento	Especificaciones	Unidad	Costo Unitario	Costo Total
Actualización software LabVIEW	Actualización y calibración	1	\$600,00	\$600,00
Celda de carga	20Kg	2	\$15,00	\$30,00
Placa Arduino Nano + Cable USB	Conjunto	1	\$15,00	\$15,00
Placas de comunicación sensor de carga + Cable Utp Flexible 4 Pares Multifibra 70/30 Cat5e	Conjunto +6 metros	2	\$14,00	\$28,00
Sensor de Velocidad de Rotación ST420	Incluye comunicación	1	\$20,00	\$20,00
Cable de comunicación Arduino	Metros	2	\$7,00	\$14,00
Cable de 7 hilos #6 AWG	20 metros	20	\$2,40	\$48,00
Canaleta Plástica Dexson Dxn10211	Sin División Pvc 60x40	4	\$4,25	\$17,00
Manguera anillada corrugada	6m x 2" diámetro	6	\$0,80	\$4,80
Total				\$776,80

Realizado por: López C & Puma Ivan

Tabla 6-4:Costos directos del sistema mecánico/hidráulico

Sistema Mecánico/Hidráulico				
Elemento	Especificaciones	Unidad	Costo Unitario	Costo Total
Plancha metálica	90x35x8	1	\$150,00	\$150,00
Grasa DRK LIYHIUMPLEX HT2		1	\$8,00	\$8,00
Rodamiento CBM 51104	Par	2	\$2,50	\$5,00
Manguera industrial de 125Psi	Metros	20	\$2,00	\$40,00

Silkabond	Adhesivo para metales	1	\$19,50	\$19,50
Sellador de silicona Rtv1200	Transparente	1	\$3,75	\$3,75
Lijas 100-160 y teflón	Pliego	1	\$2,25	\$2,25
Acoples de manguera 3/8	Bronce	4	\$3,80	\$15,20
Abrazaderas para manguera	Acero inoxidable	6	\$0,90	\$5,40
Pintura Anticorrosiva Azul oscuro	Litro	2	\$10,00	\$20,00
Barniz Anticorrosivo	Galón	1	\$11,00	\$11,00
Pintura Anticorrosiva negro	Litro	1	\$10,00	\$10,00
Total				\$290,10

Realizado por: López C & Puma I

4.4.2. Costos indirectos

Dentro de los costos indirectos se tiene un financiamiento de:

Tabla 7-4:Costos indirectos de los elementos adicionales

Descripción	Especificaciones	Cantidad	Costo Unitario	Costo Total
Internet	Horas	10	\$0,60	\$6,00
Transporte				\$50,00
Impresiones	5	104	\$0,15	\$78,00
Empastados		2	\$10,00	\$20,00
CD		2	\$4,00	\$8,00
Total				\$162,00

Realizado por: López C & Puma I

4.4.3. Destino del proyecto

El proyecto fue realizado en el Laboratorio de Turbomaquinaria de la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, con fines educativos

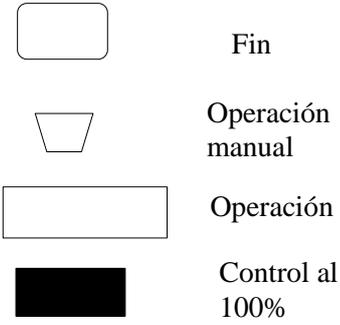
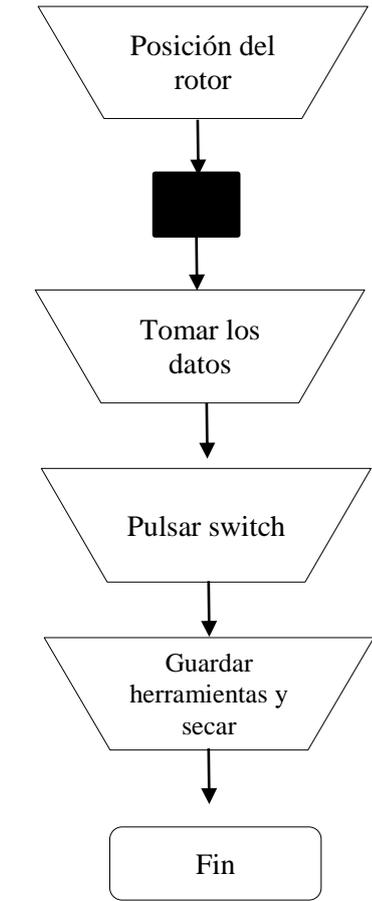
4.5. Elaboración de procedimientos de mantenimiento

4.5.1. Elaboración de diagrama de procesos

Tabla 8-4: Diagrama de procesos

Funcionamiento	Proceso	Descripción	Control		
<p>Es de carcasa espiral y de eje vertical. La energía que absorbe el fluido la transforma en energía mecánica. El fluido es impulsado a través de la tubería por medio de la bomba axial, formando así un circuito que permite un estudio amplio de las características de estas máquinas hidráulicas.</p> <p>Es una máquina de reacción de flujo axial. Su rodete es en forma de hélice con álabes regulables. Estas turbinas se usan para grandes caudales con saltos pequeños.</p>	<pre> graph TD A[Conectar la alimentación] --> B[Pulsar el switch] B --> C[Posición de los álabes] C --> D[Girar los álabes] D --> E[Colocar un peso] E --> F[Tomar datos y lecturas] F --> G[Ángulos de los álabes] G --> H[Cambiar el peso] H --> I[] </pre>	Conectar el motor a la fuente trifásica, así como los instrumentos para la práctica correspondiente	<p>Verificar que el banco esté conectado a la fuente(220V). Llenar el tanque reservorio hasta el nivel indicado. Las válvulas de admisión y escape deben estar completamente abiertas.</p>		
		Pulsar el switch de encendido			
		Seleccionar la posición de los álabes del rotor de la bomba axial			
		Girar los álabes del distribuidor a 10° y los álabes del rotor a la posición de 0,2			
		Colocar un peso de 5kg en la balanza			
		Tomar datos de presiones, número de revoluciones, altura en el manómetro inclinado y lectura en el dinamómetro			
		Cambiar el ángulo de los álabes del distribuidor en un			
		Seguridad			
		<ul style="list-style-type: none"> • Antes de conectar el dispositivo a la fuente de alimentación, verifique el voltaje correspondiente. Desenchufe el dispositivo antes del mantenimiento. Los estudiantes deben procesar documentos 			

en presencia del asistente de laboratorio. No dejar caer líquidos en partes eléctricas. En partes pintadas, de acrílico o PVC no usar solventes fuertes. Engrasar los rodamientos para evitar sobrecalentamientos. Antes de encender el equipo tener la precaución de sujetar la porta pesas debido a que salta en el arranque. Se debe de tener cuidado con las partes móviles. El equipo requiere del arranque por lo menos un estudiante en el tablero de encendido y otro para sujetar el porta pesas. El resto puede anotar las lecturas de los instrumentos de medida



rango de 5° hasta 45°	
Cambiar el peso a 10 y 15 Kg respectivamente	
Cambiar la posición del rotor a 0,3 y seguir variando en un rango de 0,1 hasta la posición 0,6	Después de variar los parámetros como girar los álabes y de colocar las pesas
	o variar el rango de posición del rotor, tomar los datos
Tomar los datos correspondientes	
Pulsar el switch de apagado y desconectar la alimentación	
Ubicar las herramientas utilizadas en el lugar asignado y secar las piezas de la turbina Kaplan	
Realizar los cálculos de acuerdo con la guía de laboratorio	

Fuente: (MENDOZA, 2014 pág. 98)

Realizado por: López C & Puma I

CONCLUSIONES

Al analizar el estado técnico del banco de pruebas de la turbina Kaplan, se pudo determinar que, debido al poco control de mantenimiento, el motor y la bomba se encontraba operando de manera regular, además el software de adquisición de datos LabVIEW tenía paneles diferentes para analizar el comportamiento de la bomba axial y la turbina.

Para alcanzar la repotenciación del banco de pruebas se ejecutaron procedimientos técnicos de mantenimiento como: ensayos no destructivos, actividades preventivas (limpieza, lubricación, calibración, pintura y aplicación de barniz anticorrosivo en la tubería y los alabes de la bomba axial), actividades correctivas (reemplazo de sensores, cañerías, unión bomba y rodamientos), obteniendo resultados satisfactorios.

Después de haber realizado los cálculos, la adquisición e instalación de los sensores de presión, velocidad y fuerza, se realizó las pruebas necesarias de arranque para verificar y garantizar la funcionalidad de estos.

Las pruebas realizadas al banco de pruebas han demostrado que el rendimiento obtenido es alrededor del 49%, que es un valor satisfactorio para microturbinas, porque al considerar las pérdidas menores de rendimiento volumétrico y mecánico, se está considerando que la turbina es pequeña.

RECOMENDACIONES

Aplicar mantenimiento preventivo y programas de mantenimiento predictivo, para mantener al equipo en buen estado de funcionamiento y brindar un servicio de calidad, que cumpla con las expectativas de la institución.

Cuando ya no se vaya a realizar prácticas de laboratorio, se debe realizar un diagnóstico general de la turbina, para evaluar el grado de desgaste alcanzado. Estos deben incluir: la inspección de la turbina, condición de rodetes, condición de los álabes, para garantizar un rendimiento óptimo y tiempos de funcionamiento más prolongados.

BIBLIOGRAFÍA

ALCÍVAR, Karla; et al. *Investigacion de los equipos de adquisición de datos NI USB 6009 para su implementación y uso en los Laboratorios de Telecomunicaciones de la FET de UCSG.* 2010.

ARDUINO, Electronics. *Ingenieria MCI electronics.* Santiago de Chile, 2017 . [En línea] Disponible en: <https://arduino.cl/arduino-nano/>.

ARROYO, Rosa. *Turbinas Kaplan.* [En línea] 2016. [Citado el: 16 de 11 de 2021.] Disponible en: <https://temariosformativosprofesionales.files.wordpress.com/2014/03/turbinas-kaplan.pdf>.

Bombas.Centrifugas. *Bombas.Centrifugas.* [En línea] 3 de Mayo de 2011. [Citado el: 20 de Diciembre de 2021.] <https://www.bombascentrifugas.net/deteccion-de-fallas-y-averias-en-bombas-centrifugas/>.

CHARMILLES, Ateliers. *Turbines Hydrauliques.* Sao Paulo-Brasil : Fascicule, 2014, págs. 210-215.

CUADROS ACOSTA, Iván. *Electrónica, Transductores.* Madrid-España : Geek, 2021.

FERNÁNDEZ, Pedro. *Bombas Centrifugas y Volumétricas: Bombas Centrifuga: Alabes, Grado de reaccion Y Cavitación.* Santander-España : Redsauce, 2008. págs. 33-48.

FERNANDÉZ, Pedro. *Turbinas hidráulicas: Clasificación, Turbinas Hidraulicas: Turbinas Kaplan y bulbo.* Santander-España : Redsauce, 2015. págs. 1-16; 93-120.

GARCÍA PÉREZ, Mario Alberto. 2011. *Turbomáquinas-Turbinas Hidráulicas.* (Trabajo de titulación), Universidad Nacional de Callao, Bellavista-Perú. [En línea] 2011. [Citado el: 15 de 12 de 2021]. Disponible en: https://unac.edu.pe/images/documentos/organizacion/vri/cdcitra/Informes_Finales_Investigación/2011/Noviembre/IF_GARCIA%20PEREZ_FIEE.pdf.

GUILLÉN SALAZAR, Anita Cecilia & MARCALLA IZA, Alex Manuel. 2011. *Automatización de las turbomáquinas del Laboratorio de Fluidos de la Facultad de Mecánica. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba-Ecuador.* [En línea] 2011. [Citado el: 23 de 11 de 2021.] Disponible en: <http://dspace.esoch.edu.ec/handle/123456789/825>.

LOSSADA, Edgar. *Generación de Potencia: Turbinas Hidraulicas.* Ojeda-Venezuela. [En línea] 2014. [Citado el: 05 de 12 de 2021.] Obtenido de: <https://slidetodoc.com/universidad-alonso-de-ojeda-facultad-de-ingenieria-escuela-2/>.

MATILDE, Santa. ASING SERVICIOS DE INGENIERÍA. *Ensayos en Centrales Hidroeléctricas;*Madrid-España. [En línea] 01 de 12 de 2011. [Citado el: 14 de 12 de 2021.] Disponible en: https://www.asing.es/ensayos_centrales_hidroelectricas.php.

MENDOZA, Denys & MIRANDA, Diego. *Implementación de un plan de mantenimiento predictivo mediante la técnica de analisis vibracional para los motores y bombas del Laboratorio de Turbomaquinaria de la Facultad De Mécanica,* Tesis de grado,riobamba-ecuador. [En línea] 2014. [Citado el: 09 de 01 de 2022.] Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/3133/1/25T00222.pdf>.

PALMA, Cristian & PEÑA, Daniela. *Diseño de una turbina tipo Kaplan para la generación de energía hidráulica.* Universidad Católica de Colombia. [En línea] 2018. [Citado el: 12 de 12 de 2021.] Disponible en: <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/22838/1/TRABAJO%20DE%20GRADO%20-%20DISE%C3%91O%20DE%20TURBINA%20KAPLAN.pdf>.

PÉREZ MARBELLO, Ramiro. *Manual de practicas de laboratorio,*. Medellin-Colombia. [En línea] 2015. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/21725/3353962.2005.Parte%206.pdf?sequence=3&isAllowed=y>.

PLANAS, Oriol. *Energía Solar: Turbina Kaplan,* California, United States. [En línea] 2018. Disponible en: <https://solar-energia.net/energias-renovables/energia-hidraulica/turbinas-hidraulicas/kaplan>.

REYES, Jorge;et al. *Efecto de la implosion de burbujas sobre el desgaste por cavitación de bombas centrífugas que trasiegan fluidos amoniacaes.* México: Disnonible en: https://www.researchgate.net/figure/Figura-5-Comportamiento-de-la-corrosion-por-picaduras-en-el-alabe-a-muestra-3-b_fig2_334327523, 2019. págs. 327-337.

TecnoMantenimiento. *Lavamagazine. Turbinas Kaplan,* España. [En línea] 2021. [Citado el: 15 de 03 de 2022.] Disponible en: <https://tecnomantenimiento.com/turbina-kaplan/>.

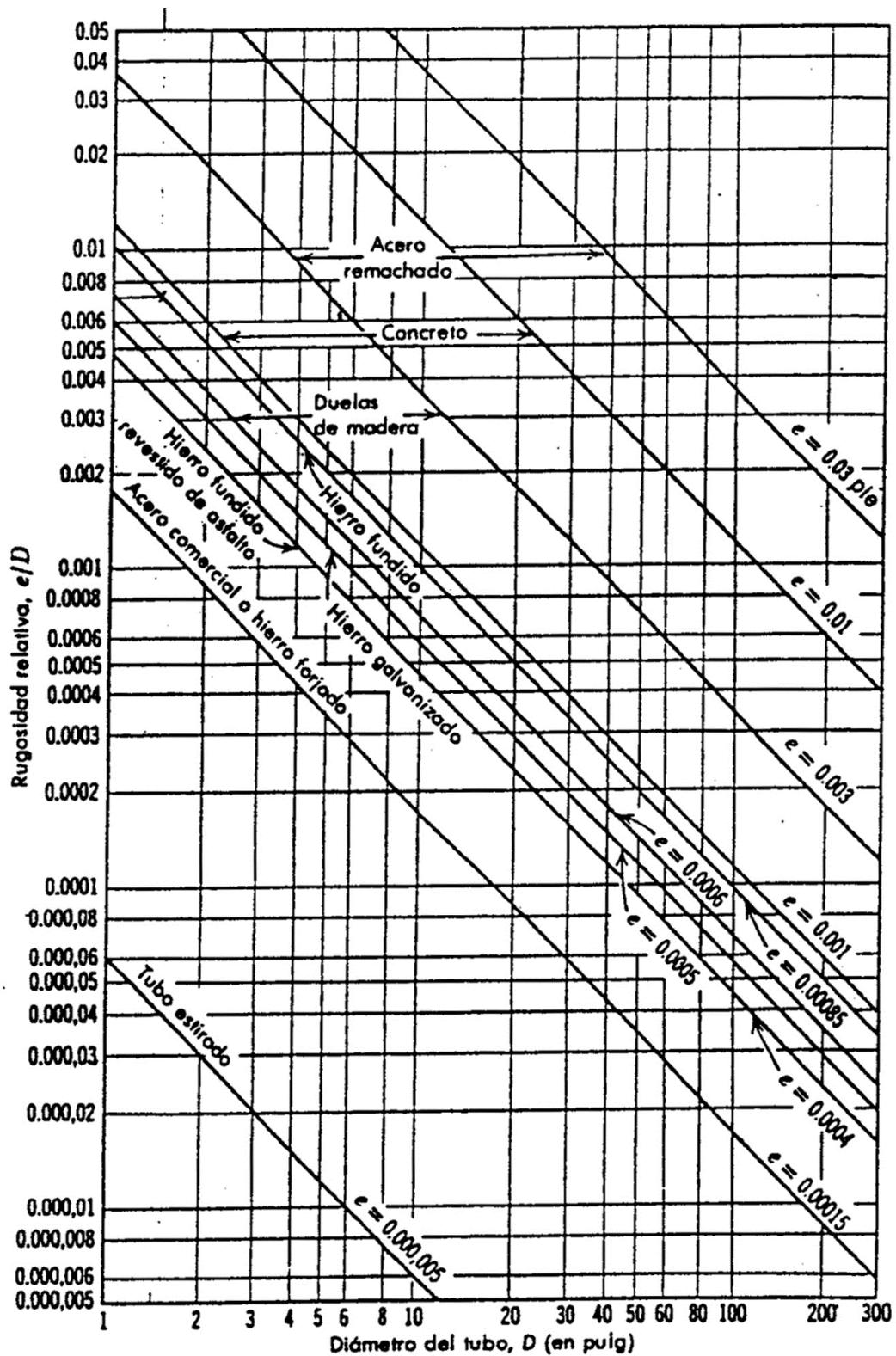
TORRES, Santiago. & ALVARADO Carlos. *Repotenciacion del banco de pruebas de la turbina Hélice de eje horizontal del laboratorio de turbomaquinaria hidráulica de la Facultad de Mecánica. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba-Ecuador.* [En línea] 2015. [Citado el: 18 de 11 de 2021.] Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/4560/1/15T00634.pdf>.

UNE-EN-13306. *Terminología del mantenimiento:Mantenimiento.* Madrid : Normalización Española, 2018. págs. 13-18.

VELÁSQUEZ, Belman. *Reconstrucción de turbina hidráulica marca Leffel en el Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica del centro de investigación de Ingeniería FIUSAC.* Guatemala. [En línea] 2016. [Citado el: 15 de 03 de 2022.] Disponible en: <https://docplayer.es/79197583-Universidad-de-san-carlos-de-guatemala-facultad-de-ingenieria-escuela-de-ingenieria-mecanica.html>.

ANEXOS

Anexo A: Rugosidad Relativa para Tubos de Materiales Comunes



Rugosidades de Tuberías Usuales

Material	ϵ (mm)
Acero Remachado	1 - 10
Concreto	0,3 - 3
Hierro Fundido	0,26
Hierro Galvanizado	0,15
Acero Comercial	0,045

Dimensiones de Tuberías Normalizadas de Acero

Diámetro Nominal (pulgadas)	Diámetro Exterior (cm)	Diámetro Interior (cm)	Espesor de Pared (cm)	Número de Catálogo
1/8	1,029	0,683	0,173	40
1/8	1,029	0,546	0,241	80
1/4	1,372	0,925	0,224	40
1/4	1,372	0,767	0,302	80
3/8	1,715	1,252	0,231	40
3/8	1,715	1,074	0,320	80
1/2	2,134	1,580	0,277	40
1/2	2,134	1,387	0,373	80
3/4	2,667	2,093	0,287	40
3/4	2,667	1,885	0,391	80
1	3,340	2,664	0,338	40
1	3,340	2,431	0,455	80
1 1/4	4,216	3,505	0,356	40
1 1/4	4,216	3,246	0,485	80
1 1/2	4,826	4,089	0,368	40
1 1/2	4,826	3,810	0,508	80
2	6,033	5,250	0,391	40
2	6,033	4,925	0,554	80
2 1/2	7,303	6,271	0,516	40
2 1/2	7,303	5,900	0,701	80
3	8,890	7,793	0,549	40
3	8,890	7,366	0,762	80
3 1/2	10,16	9,012	0,574	40
3 1/2	10,16	8,545	0,808	80
4	11,43	10,226	0,602	40
4	11,43	9,718	0,856	80
5	14,13	12,819	0,655	40
5	14,13	12,225	0,953	80
6	16,83	15,405	0,711	40
6	16,83	14,633	1,097	80
8	21,91	20,272	0,818	40
8	21,91	19,368	1,270	80
10	27,31	25,451	0,927	40
10	27,31	24,287	1,509	80
12	32,39	30,323	1,031	40
12	32,39	28,890	1,748	80

Anexo B: Diagrama de Moody

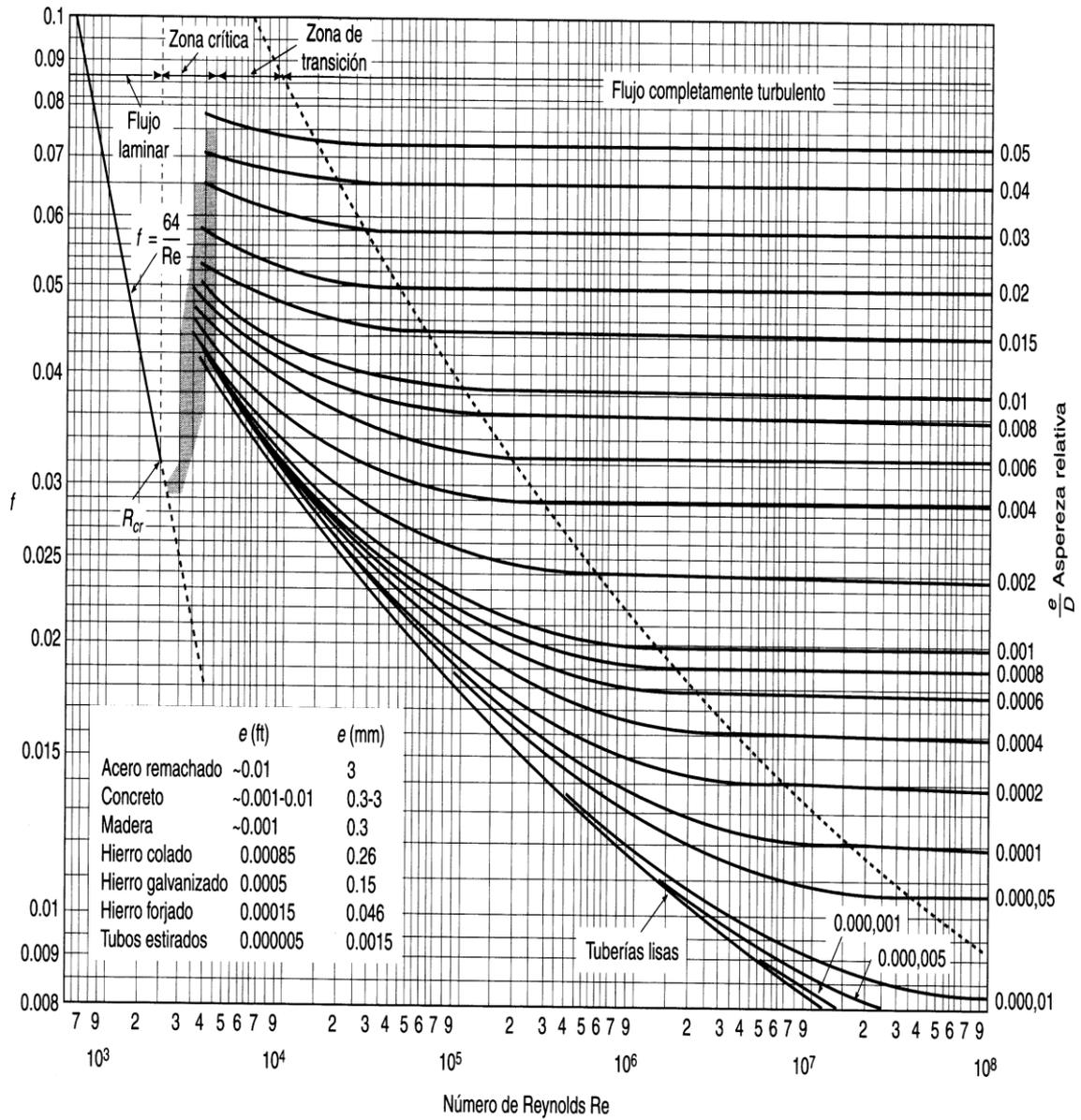


Diagrama de Moody. (De L.F. Moody, *Trans. ASME*, vol. 66, 1944.)

Anexo C: Coeficientes de gasto, orificios y compuertas

orificios de pared gruesa

TABLA 6.2. Coeficientes de gasto para diferentes tipos de orificios de pared gruesa

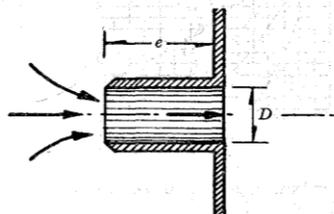
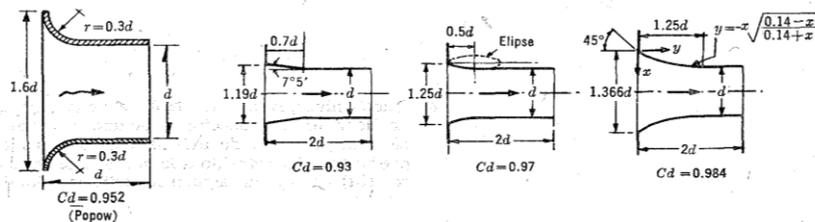
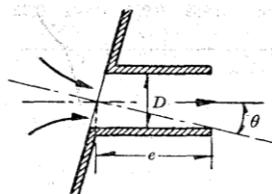
a) Tubo corto.

Para $\theta = 0^\circ$ (Domínguez, Eytelwein y Schurinu).

$e/d \leq 0.5$	1	1.5	2.0	2.5	3	5	
C_d	0.60	0.75	0.78	0.79	0.80	0.82	0.79
e/d	.12	25	36	50	60	75	100
C_d	0.77	0.71	0.68	0.64	0.60	0.59	0.55

Para $e/D = 3$ el coeficiente C_d , según Weisbach, se obtiene de los siguientes valores en función de θ :

θ	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°
C_d	0.82	0.80	0.78	0.76	0.75	0.73	0.72

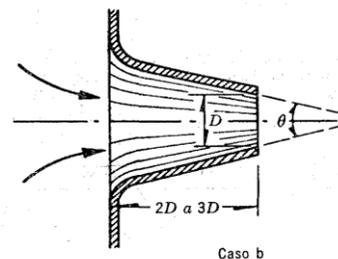
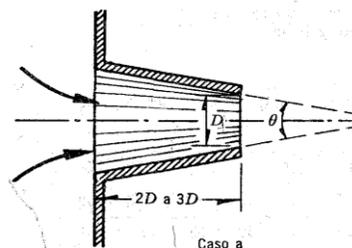


b) Tubos cilíndricos reentrantes (tubos de Borda)

	C_d	C_o	C_o
$e > 3D$	0.71	0.71	1.00
$e < 3D$	0.51	0.97	0.53

221 222

orificios y compuertas

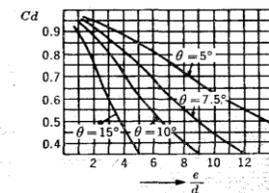
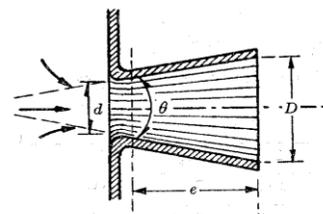


c) Tubos convergentes para aristas agudas y redondeadas, respectivamente.

θ	0°	4°	8°	12°	16°	30°
C_d (Caso a)	0.82	0.916	0.942	0.95	0.941	0.92
C_d (Caso b)	0.96	0.96	0.959	0.955	0.941	0.92

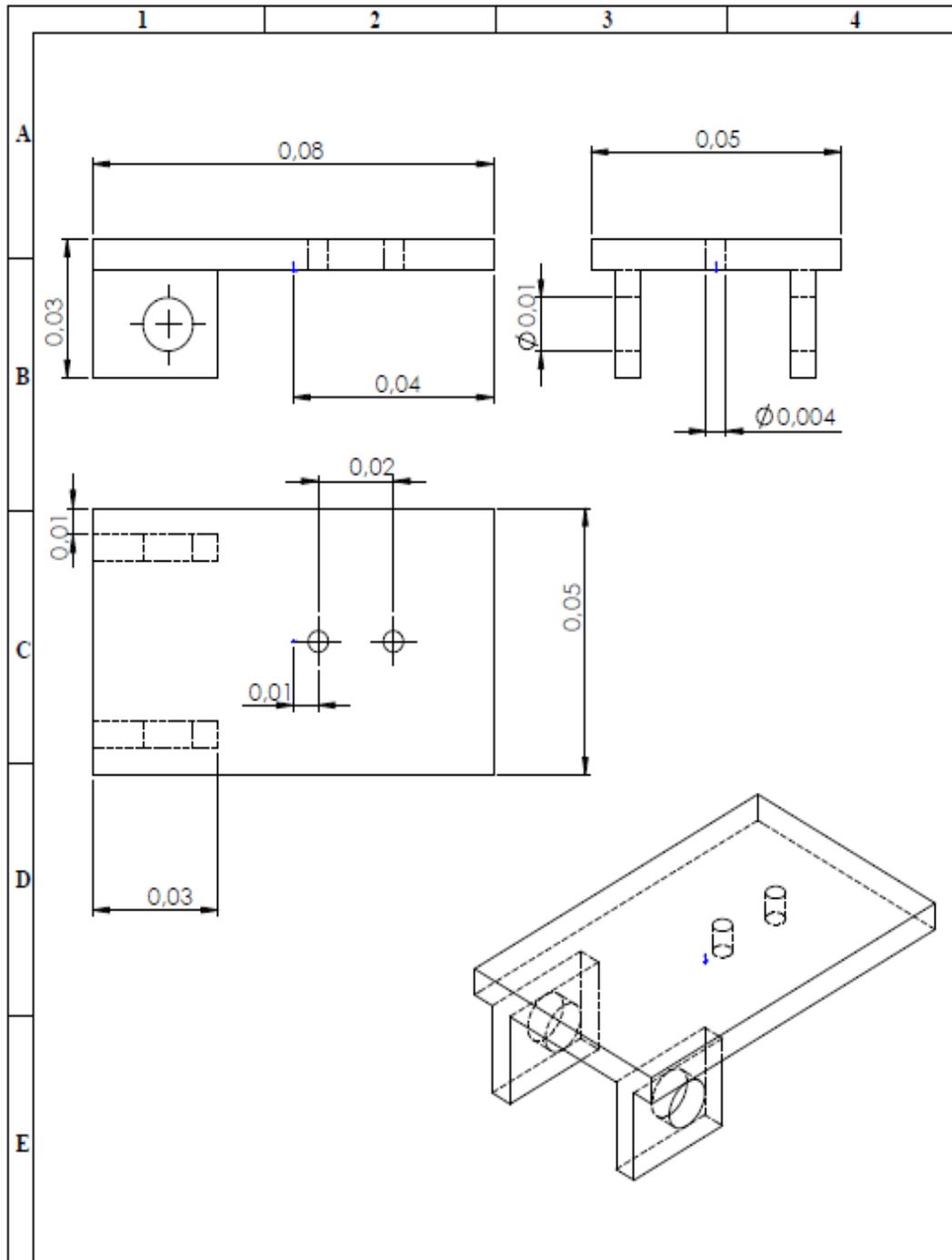
	45°	60°	75°	90°	
	0.87	0.82	0.78	0.74	←(Caso a)
	0.87	0.82	0.78	0.74	←(Caso b)

d) Tubos divergentes. Si $\theta \geq 8^\circ$ la vena líquida no llena toda la sección y ocurre la separación. En el caso de aristas redondeadas el coeficiente C_d , referido a la sección de salida, se obtiene de la siguiente gráfica, donde



el coeficiente máximo de gasto se obtiene para $\theta = 5^\circ$.

Anexo D: Diseño SolidWorks, base para el sensor de peso



N° Lámina: 1 de 1		N° Hojas: 1		Sustitución:		Codificación: FM-EIM-17-02-2022		ESPOCH FACULTAD DE MECÁNICA INGENIERÍA EN MANTENIMIENTO											
Email: Teléfonos:						Denominación:						Peso [oz]		Tolerancia		Escala		Registro	
Datos		Nombre		Firma		Fecha		Hojal				0,07		±0,3 [mm]		1:1			
Proyectó		Lopez Cristian				2022/02/17						Materiales:		ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD INTELLECTUAL EXCLUSIVA DE A.S. Y J.T. CUALQUIER USO Y REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL NO AUTORIZADA CONSTITUYE VIOLACION DE LOS DERECHOS DEL AUTOR PENADA POR LA LEY					
Dibujó		Puzza Iván				2022/02/17		SEGUN DISEÑO		Nombre de archivo: Soporte base sensor.sldprt									
Revisó		Ing. Gallegos C				2022/02/17													
Aprobó		Ing. Ordóñez M				2022/02/17													

