UNIVERSIDAD DE CARABOBO.

FACULTAD DE INGENIERÍA.

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA.

EVALUACIÓN DE LA OPERACIÓN DEL SISTEMA DE TURBINA KAPLAN EN EL LABORATORIO DE HIDRÁULICA "ELÍAS SANCHEZ DÍAZ" DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL DE LA UNIVERSIDAD DE CARABOBO

GARCÍA JUAN

PACHECO MARIO

UNIVERSIDAD DE CARABOBO.

FACULTAD DE INGENIERÍA.

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA.

EVALUACIÓN DE LA OPERACIÓN DEL SISTEMA DE TURBINA KAPLAN EN EL LABORATORIO DE HIDRÁULICA "ELÍAS SANCHEZ DÍAZ" DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL DE LA UNIVERSIDAD DE CARABOBO

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO PRESENTADO ANTE LA ILUSTRE UNIVERSIDAD DE CARABOBO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

TUTOR ACADÉMICO:

ING. ADRIANA MÁRQUEZ

GARCÍA JUAN

PACHECO MARIO

VALENCIA, JUNIO 2015

UNIVERSIDAD DE CARABOBO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Los abajo firmantes, miembros del jurado designado para evaluar el Trabajo Especial de Grado titulado **"EVALUACIÓN DE LA OPERACIÓN DEL SISTEMA DE TURBINA KAPLAN EN EL LABORATORIO DE HIDRÁULICA "ELÍAS SÁNCHEZ DÍAZ" DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL DE LA UNIVERSIDAD DE CARABOBO"**, realizado por los bachilleres, Juan C. J. García O. portador de la cedula de identidad Nº 19.566.712, y Mario J. Pacheco P. portador de la cedula de identidad Nº 19.196.643; hacemos constar que hemos revisado y aprobado dicho trabajo.

Ing. Adriana Márquez
Presidente de Jurado

Ing. Gruber Caraballo
Miembro de Jurado

Ing. Fernando Aular
Miembro de Jurado

VALENCIA, JULIO DE 2015

UNIVERSIDAD DE CARABOBO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Los abajo firmantes, miembros del jurado designado para evaluar el Trabajo Especial de Grado titulado **"EVALUAR LA OPERACIÓN DEL SISTEMA DE TURBINA KAPLAN DEL LABORATORIO DE HIDRÁULICA "ELÍAS SÁNCHEZ DÍAZ"** de la escuela de ingeniería civil de la universidad de Carabobo.", realizado por los bachilleres, Juan C. J. García O. portador de la cedula de identidad Nº 19.566.712, y Mario J. Pacheco P. portador de la cedula de identidad Nº 19.196.643; hacemos constar que hemos revisado y aprobado dicho trabajo.

_____

Ing. Adriana Márquez

Tutor

_____ _____

XXXXXXX XXXXXX

Jurado Jurado

VALENCIA, JUNIO DE 2015

DEDICATORIA

Primeramente dedico a Dios por estar a mi lado siempre, por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón, iluminar mi mente, haberme dado salud para lograr mis objetivos y por haber puesto en mi camino aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudio.

A mis padres primordialmente por darme la vida, por apoyarme cada día en toda las metas que me he trazado, por sus consejos, por educarme, enseñarme los valores como el trabajo, la perseverancia y la constancia pero más que nada por su amor.

A mis hermanos, primos y primas para que sirva como motivación y siempre aspiren a cumplir con los objetivos y metas propuestas en sus vidas.

A cada uno de mis familiares que siempre estuvieron apoyándome a lo largo de mi carrera; cuando preguntaban ¿que estas estudiando y dónde? Y respondía Ingeniería Mecánica en la Universidad de Carabobo y con su sonrisa, alegría y llenos de orgullo me felicitaban y alentaba para siempre seguir adelante.

Juan García

DEDICATORIA

Principalmente dedico este logro al Rey de reyes y Señor de señores, mi Dios Todopoderoso, que sin ÉL nada podemos hacer pero con ÉL todo.

A mis padres, Anastacia y Ramón, que siempre me han apoyado en toda mi etapa de aprendizaje y desde el momento de mi nacimiento nunca me han dejado solo, por todo el sacrificio que han realizado para que pudiera llegar a obtener esta meta.

A mi hermano Hender por ayudarme y ser ese ejemplo a seguir, por apoyarme en los momentos difíciles de mi vida.

A mis hermanas, Argedys y Heidy por apoyarme y ayudarme siempre que las necesité.

A mis hijos María Victoria y Abimael Jesús por ser ese impulso a seguir y ser un ejemplo para ellos.

A mi esposa Eleana por entenderme y apoyarme a pesar de los vacíos que dejaba en los momentos de la realización de la tesis, por siempre alentarme a seguir adelante.

Mario Pacheco

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar a Dios, por darnos la sabiduría, salud, perseverancia, paciencia y fortaleza para poder desarrollar y culminar este proyecto

A nuestra tutora la profesora Ing. Adriana Márquez, por su apoyo, disposición y guía académica brindada a lo largo de todo este tiempo

A nuestra la cotutora profesora Ing. Mairim Márquez por su guía académica y por la elaboración del tacómetro digital usado para registrar la velocidad angular de la turbina.

A nuestro amigo y futuro colega Ítalo Salazar por la gran disposición y colaboración en diversas actividades realizadas.

A nuestros padres y familiares por su apoyo incondicional durante todas las fases de esta tesis.

A nuestros compañeros y futuros colegas que a lo largo de la carrera estuvieron apoyándonos y siempre dispuesto a ofrecer su colaboración.

¡A todos gracias!

TÍTULO DEL TRABAJO

EVALUACIÓN DE LA OPERACIÓN DEL SISTEMA DE TURBINA KAPLAN EN EL LABORATORIO DE HIDRÁULICA "ELÍAS SANCHEZ DÍAZ" DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL DE LA UNIVERSIDAD DE CARABOBO

RESUMEN

En este estudio se evaluó la operación del sistema de turbina Kaplan en el laboratorio de hidráulica "Elías Sánchez Díaz" de la escuela de Ingeniería Civil de la universidad de Carabobo. La turbina Kaplan presenta dos órganos reguladores de caudal (álabes móviles del distribuidor y álabes móviles del rodete), al realizar una serie de combinaciones de apertura de los órganos reguladores en conjunto con la variación de velocidad del sistema se obtuvo las distintas variables como caudal, disponibilidad, potencias y los puntos de rendimiento (eficiencia) en los que trabaja la turbina. Estas variables obtenidas a distintas condiciones de estudios permitieron conocer el comportamiento del sistema de turbina trazando las distintas colinas y la curva característica de la turbina Kaplan. Para mantener operativo el sistema de turbina se diseñó una serie de actividades de mantenimiento preventivo que garantiza la conservación y funcionamiento del mismo lo que permite a los estudiantes y otras persona usar el sistema a través de las practicas las cuales fueron diseñadas con el objetivo de que se adquiera el mayor conocimiento a través de la aplicación de las prácticas.

Br. Juan García
C.I. 19.566.712

Br. Mario Pacheco
C.I. 19.196.643

NOMENCLATURA

A: Área de la sección transversal de la tubería (m^2)

Ae: Área de entrada de la turbina (m^2).

Ao: Área interna de la placa orificio (m^2).

As: Área de salida de la turbina (m^2).

C: Constante de la placa orificio (adimensional).

D: Diámetro del rodete.

De: Diámetro exterior del rodete.

$\boldsymbol{D_i}$**:** Diámetro interno de la tubería (m).

d: Diámetro del orificio de la placa (m).

$\mathbf{d_B}$**:** Brazo de momento torzor (m).

F: Dinamómetro (N).

H: Salto neto o Altura neta (m).

$\boldsymbol{g}$**:** Gravedad (m/s^2).

N: Velocidad de giro de turbina (RPM).

$\mathbf{n_s}$ **:** Numero especifico de revoluciones.

P: Presión (N/m^2).

Q: Caudal del sistema (m^3/s).

$\mathbf{\Delta P_{Placa}}$**:** Delta de presiones (In).

$\boldsymbol{V}$**:** Velocidad lineal (m/s).

$\mathbf{Ve_{min}}$**:** Velocidad de entrada mínima a la turbina (m/s).

Ve_{max}: Velocidad de entrada máxima a la turbina (m/s).

Vs_{min}: Velocidad de salida mínima a la turbina (m/s).

Vs_{max}: Velocidad de salida máxima a la turbina (m/s).

X: Grado de apertura de los alabes del distribuidor (’’).

ϕ: Grado de apertura de los alabes del rodete (º)

γ: Peso específico (N/m^3).

Cd: Coeficiente de descarga en placas orificio (adimensional).

β: Relación de diámetro (adimensional).

ρ: Densidad del agua (kg/m3).

T: Temperatura del agua (°C).

Re: Numero de Reynolds (adimensional).

L_1 **=** Relación que existe entre la distancia desde el plano de la toma de alta presión aguas arriba hasta la cara de la placa orificio y el diámetro de la tubería.

L_2 **=** Relación que existe entre la distancia desde el plano de la toma de baja presión aguas abajo hasta la cara de la placa orificio y el diámetro de la tubería.

π: Numero Pi (adimensional).

υ: Viscosidad cinemática del agua (m^2/s).

η**:** Eficiencia (%).

P: Potencia hidráulica (W).

P_a**:** Potencia al freno (W).

M: Fuerza torsional (N*m).

W: Pesas (N).

***Z*:** Altura (m).

Zp: Numero de palas del rodete

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN 19
CAPÍTULO I 21
1 EL PROBLEMA 21
1.1 TÍTULO. ..... **¡Error! Marcador no definido.**
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA. 21
1.3 OBJETIVOS. 22
1.3.1 Objetivo general: 23
1.3.2 Objetivos Específicos: 23
1.4 LIMITACIONES. 24
1.5 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN. 23
1.6 ALCANCE ..... **¡Error! Marcador no definido.**
CAPÍTULO II 24
2 MARCO TEÓRICO 24
2.1 REVISIÓN DE ANTECEDENTES 25
2.2 BASES TEÓRICAS 27
2.2.1 Máquinas de fluidos 27
2.2.2 Máquinas hidráulicas. 28
2.2.3 Turbina Kaplan 30
2.2.4 Principales elementos 31
2.2.5 Calculo del caudal 38
2.2.6 Curvas características de las turbinas Kaplan 42
2.2.7 Diseño factorial 48
2.2.8 Definición de experimento factorial 48
2.2.9 Efecto principal y efecto de interacción 49
3 MARCO METODOLÓGICO 51
3.1 Nivel y Tipo de la Investigación. 51
3.2 Parámetros de operación de la turbina Kaplan. 57
3.3 Diseño de Pruebas experimentales para el sistema de turbina Kaplan. 57

3.4 Metodología de pruebas experimentales. 52
3.5 Curvas de Funcionamiento del sistema de Turbina Kaplan. 53
3.6 Procedimiento experimental para la construcción de la curva característica de la turbina kaplan. 53
3.7 Metodología para la realización de las prácticas y el mantenimiento del sistema de turbinas Kaplan. 56
4 RESULTADOS Y DISCUSION 57
4.1 RESULTADOS DE LA DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE LA TURBINA KAPLAN. 57
4.1.1 Parámetros Nominales de la Turbina Kaplan. 57
4.1.2 Determinación de los rangos de variación de los caudales de operación de la Turbina Kaplan. 58
4.1.3 Determinación de la altura neta de la turbina. 60
4.1.4 Determinación del rango de variación de velocidades de entrada y salida de la turbina. 60
4.1.5 Fijación de la variación angular del eje de la turbina Kaplan. 61
4.1.6 Fijación de la variación del ángulo del distribuidor de la turbina. 62
4.1.7 Fijación de la variación del ángulo del distribuidor de la turbina. 62
4.1.8 Fijación de la del sistema dinamométrico de la turbina. 62
4.1.9 Fijación del sistema de pesas de la turbina. 62
4.1.10 Fijación del rango de presiones de la turbina. 63
4.1.11 Fijación del rango de eficiencia de la turbina. 63
4.1.12 Determinación de la potencia de la turbina. 63
4.2 RESULTADO DEL DISEÑO DE PRUEBAS EXPERIMENTALES PARA EL SISTEMA DE TURBINA KAPLAN. 65
4.2.1 Efectos Principales. 65
4.2.2 Efectos de Interacción 68
4.3 RESULTADOS DE LA ELABORACIÓN DE LAS CURVAS DE FUNCIONAMIENTO PARA LA REPRESENTACIÓN DE LAS VARIABLES DE SALIDA DEL SISTEMA DE TURBINA KAPLAN. 73
4.4 RESULTADO DE LA METODOLOGÍA PARA LA REALIZACIÓN DE LAS PRÁCTICAS DEL SISTEMA DE TURBINA KAPLAN. 85
PRACTICA: 85

OBJETIVO: Comprender el comportamiento de las variables fundamentales que describen el funcionamiento del sistema de turbina Kaplan (Carga, Caudal y Potencia, entre otras). 85
EQUIPO DE LABORATORIO 86
PROCEDIMIENTO: 86
CÁLCULOS PRELIMINARES. 89
Informe a Presentar 90
4.5 RESULTADOS DE LA METODOLOGÍA PARA LA REALIZACIÓN DEL MANTENIMIENTO DEL SISTEMA DE TURBINA KAPLAN. 95
5 CONCLUSIONES 115
6 RECOMENDACIONES 117
7 BIBLIOGRAFÍA 119
8 ANEXOS 121

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo II

Figura 2.1 Clasificación de las turbinas. **29**
Figura 2.2 Sección transversal de una central hidráulica con turbina Kaplan **31**
Figura 2.3 Turbina Kaplan de eje vertical. **33**
Figura 2.4 Rotor de una turbina Kaplan. **34**
Figura 2.5 Disposición del cubo y del álabe de la turbina Kaplan. **35**
Figura 2.6 Mecanismo de regulación de los álabes de una turbina Kaplan. **36**
Figura 2.7 Flujo de agua en un rodete de una turbina Kaplan. **38**
Figura 2.8 Trazado de la colina de una turbina Kaplan. **4**3
Figura 2.9 Colina de rendimientos de una turbina Kaplan para cinco valores de ángulo ϕ.**44**
Figura 2.10 Curvas características universales de una turbina Kaplan. **46**
Figura 2.11 Curvas de η ϕ, x, para un mismo valor de n. **47**

Capítulo IV

Figura 4.1 Grafica de efectos principales para el caudal. **66**
Figura 4.2 Grafica de efectos principales para la altura. **66**
Figura 4.3 Grafica de efectos principales para la eficiencia.. ..... **67**
Figura 4.4 Grafica de efectos principales para la potencia hidráulica. **68**
Figura 4.5 Grafica de efectos principales para la potencia al freno. **68**
Figura 4.6 Grafica de interacción para el caudal **69**
Figura 4.7 Grafica de interacción para la altura **70**
Figura 4.8 Grafica de interacción para la **eficiencia** **70**
Figura 4.9 Grafica de interacción para la potencia **hidráulica** **71**
Figura 4.10 Grafica de interacción para la potencia al **freno** **71**
Figura 4.11 Curva Característica de la Turbina Kaplan para un ángulo de posición de los alabes del rodete de -5º **75**
Figura 4.12 Curva Característica de la Turbina Kaplan para un ángulo de posición de los alabes del rodete de **0º** **76**

Figura 4.13 Curva Característica de la Turbina Kaplan para un ángulo de posición de los alabes del rodete de **5º** **77**

Figura 4.14 Curva Característica de la Turbina Kaplan para un ángulo de posición de los alabes del rodete de 10º **78**

Figura 4.15 Curva Característica de la Turbina Kaplan para un ángulo de posición de los alabes del rodete de **15º** **79**

Figura 4.16 Curva Característica de la Turbina Kaplan para un ángulo de posición de los alabes del rodete de **20º** **80**

Figura 4.17 Curva Característica de la Turbina Kaplan para un ángulo de posición de los alabes del rodete de 25º **81**

Figura 4.18 Curva Característica de la Turbina Kaplan para un ángulo de posición de los alabes del rodete de **30º** **82**

Figura 4.19 Curva Característica de la Turbina Kaplan para un ángulo de posición de los alabes del rodete de **35º** **83**

Figura 4.20 Curva Universal de la Turbina Kaplan **84**

Figura 4.21 Curva Pa vs N de la prueba para estudiantes. **94**

Figura 4.22 Curva H vs Q de la prueba para **estudiantes** **94**

Figura 4.23 Curva Ƞ vs Q de la prueba para estudiantes..... **95**

Figura 4.24 Curva Q vs N de la prueba para estudiantes **95**

Anexos

Anexo I Placa de la Turbina Kaplan **125**

Anexo II Características de la Bomba Axial **129**

Anexo III Tacómetro digital para la medición de la velocidad del eje de la turbina del laboratorio “Elías Sánchez Díaz” **133**

Anexo IV Actividades realizadas en contribución para la puesta en funcionamiento del sistema de turbina Kaplan. **137**

ÍNDICE DE TABLA

Capítulo II

Tabla 2.1 Número de palas Zp en función del número específico de revoluciones n_s **33**

Capítulo III

Tabla 3.1 Formato para la tomas de datos ..... **.54**

Tabla 3.2 Formato para la presentación de las variables calculadas **54**

Capítulo IV

Tabla 4.1 Caudales de operación de la turbina.. ..... **59**

Tabla 4.2 Velocidades de operación de la turbina. **60**

Tabla 4.3 Rango de velocidad angular de la Turbina Kaplan..... **61**

Tabla 4.4 Rango de prueba de la velocidad angular de la Turbina Kaplan **61**

Tabla 4.5 Pesas del sistema de Turbina Kaplan **62**

Tabla 4.6 Presiones de operación de la turbina **62**

Tabla 4.7 Parámetros de operación del sistema de turbina Kaplan **63**

Tabla 4.8 Factores experimentales del diseño de pruebas experimentales..... **65**

Tabla 4.9 Variables de respuestas del diseño de pruebas experimentales **65**

Tabla 4.10 Descripción del equipo del laboratorio..... **86**

Tabla 4.11 Formato para recolección por los estudiantes..... **88**

Tabla 4.12 Formato para presentación de resultados por los estudiantes. **89**

Tabla 4.13 Ejemplo de recolección de datos. **92**

Tabla 4.14 Ejemplo de presentación de resultados. **93**

Tabla 4.15 Mantenimiento de las tuberías. **97**

Tabla 4.16 Mantenimiento del manómetro a la entrada de la turbina. **98**

Tabla 4.17 Mantenimiento del manó-vacuometro a la salida de la turbina.. **99**
Tabla 4.18 Mantenimiento del manó-vacuometro a la entrada de la bomba. **100**
Tabla 4.19 Mantenimiento de manómetro a la salida de la Bomba **101**
Tabla 4.20 Mantenimiento del tacómetro analógico del motor. **102**
Tabla 4.21 Mantenimiento del dinamómetro **103**
Tabla 4.22 Mantenimiento de la turbina. **104**
Tabla 4.23 Mantenimiento de la válvula de Compuerta. **106**
Tabla 4.24 Mantenimiento de la válvula de Alivio. **107**
Tabla 4.25 Mantenimiento de la válvula de Refrigeración. **108**
Tabla 4.26 Mantenimiento de freno Prony. **109**
Tabla 4.27 Mantenimiento de la bomba. **110**
Tabla 4.28 Mantenimiento del motor. **112**
Tabla 4.5.16 Mantenimiento del piezómetro. **113**
Tabla 4.5.17 Mantenimiento del control del Motor. **114**
Tabla 4.5.18 Mantenimiento del tacómetro Digital de la Turbina. **115**
Tabla 4.5.19 Mantenimiento del tanque de Compensación. **116**

INTRODUCCIÓN

Una turbina hidráulica es una máquina que aprovecha la energía de un fluido que pasa a través de ella para producir un movimiento de rotación que transferido mediante un eje, mueve directamente una máquina o bien un generador que transforma la energía mecánica en eléctrica, así es el órgano fundamental de una Central Hidroeléctrica.

Una de estas turbinas es la Kaplan; la cual es de flujo axial, reacción y admisión total. La característica principal de esta turbina es que posee álabes regulables. Estos álabes controlan la componente tangencial de la velocidad a la entrada del rodete, en consecuencia el fluido sale de los alabes directores regulables (distribuidor) y entra en la carcasa con un momento angular adquirido. A medida que el fluido pasa a través del rodete, su momento angular impulsa el eje para producir energía. Los álabes regulables tanto en el rodete como en el distribuidor permiten la operación con una eficiencia satisfactoria dentro de un rango amplio de caudales debido a su doble regulación.

Dada la importancia del sistema de turbina Kaplan para la generación de energía eléctrica ha sido reactivado un sistema de turbina de este tipo a escala piloto en el Laboratorio de Hidráulica "Elías Sánchez Díaz" de la Escuela de Ingeniería Civil de Universidad de Carabobo luego de haber estado inoperante por más de 30 años. Adicionalmente a la reactivación, es fundamental promover la adquisición de conocimientos sobre un sistema de turbina tan complejo que presenta una característica única de poder variar el caudal a través de dos órganos reguladores.

Mediante este estudio se proporcionan métodos que garantizan el aprendizaje acerca del funcionamiento del sistema de turbina Kaplan por parte de los alumnos de las Escuelas de Ingeniería Civil, Mecánica y Eléctrica de la Universidad de Carabobo.

Para lograr el propósito expuesto anteriormente, se ha evaluado la operación del Sistema de Turbina Kaplan mediante distintos parámetros como presión, caudal, velocidad de giro, posición de los alabes del distribuidor y rodete, entre otros. De este modo, es posible obtener el rendimiento del sistema y graficar curvas de rendimiento para cada posición del ángulo del rodete. Con esta información se elabora la curva universal de la turbina Kaplan.

Adicionalmente, en esta investigación se proponen actividades de mantenimiento para preservar operativo el sistema de turbina Kaplan. El cumplimiento de estas actividades garantizará que los estudiantes y usuarios en general realicen prácticas en el sistema semestralmente; adquiriendo conocimientos sobre el mismo.

La investigación ha sido llevada a cabo como se refleja en los siguientes capítulos:

En el Capítulo I, se reseña el Planteamiento del Problema partiendo de la situación encontrada en el área de estudio, se establece el objetivo general, los objetivos específicos, justificación, las limitaciones y el alcance.

En el Capítulo II, donde se revisan las bases teóricas y los antecedentes de la investigación que fundamentaron el presente trabajo.

En el Capítulo III, se muestra el Marco Metodológico, donde señala el nivel, tipo y etapas en la que se estructura el estudio.

En el Capítulo IV, se presentan los resultados de los objetivos específicos y se discuten el cumplimiento de los objetivos planteados.

En el Capítulo V de investigación se presenta las conclusiones obtenidas sobre el desarrollo del estudio, planteando las recomendaciones necesarias para la consecución de las metas propuestas, así como se proponen recomendaciones para darle continuidad a futuras investigación. Seguidamente se muestran las referencias bibliográficas y anexos mencionados a lo largo del desarrollo de la investigación.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

En este Capítulo se presentan el planteamiento del problema, objetivos, justificación; así como alcances y limitaciones.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

La energía es un factor importante para el desarrollo económico y social, tanto a escala local como mundial. El éxito de las economías industrializadas pasa por garantizar la generación y distribución de energía.

La energía es una fuente básica en la actividad humana, ya que es un requerimiento actual del hombre. Ella está presente en la producción de bienes y servicios que hoy en día requiere la sociedad. El consumo energético mundial aumenta sin cesar, impulsado tanto por el crecimiento socioeconómico de las naciones como por el aumento de la población mundial.

La importancia de captar energías limpias como una alternativa de generación ha hecho que países que dependan única y exclusivamente del petróleo, el carbono y el gas como principales fuentes de abastecimiento energético busquen otra forma de obtención de energía.

La energía Hidráulica, energía hídrica o hidroenergía, se obtiene del aprovechamiento de las energías cinética y potencial de la corriente del agua, saltos de agua o mareas. Las centrales hidroeléctricas utilizan esta energía hidráulica para la generación de energía eléctrica.

En general, estas centrales aprovechan la energía potencial gravitatoria que posee la masa de agua de un cauce natural en virtud de un desnivel, también conocido como salto geodésico. El agua en su caída entre dos niveles del cauce se hace pasar por una turbina hidráulica; la cual transmite la energía a un generador donde se transforma en energía eléctrica.

En la actualidad, el mundo de las turbomáquinas ha sido de vital importancia para suministrar energía eléctrica, desde pequeñas poblaciones hasta regiones que abarcan varias ciudades enteras. La concepción de las centrales hidroeléctricas o mareomotrices se ha

empleado en equipos vinculados a industrias de diversa índole como la petrolera, manufacturera y marítima; así como aplicaciones militares o espaciales de gran complejidad, entre otras.

La turbina en la actualidad, es un elemento fundamental para el aprovechamiento de la energía hídrica en la generación ya que es el principal transformador de energía utilizado en las centrales hidroeléctricas.

El personal encargado de controlar y desarrollar proyectos de mejoras en el área de generación de energía son los ingenieros. Por lo cual, es de suma importancia que los estudiantes de ingeniería posean amplios conocimientos en el funcionamiento tanto teórico como práctico de las turbinas. Para esto deben contar con laboratorios y bancos de prueba; donde puedan llevar acabo ensayos con turbinas.

Tal es el caso de los estudiantes de ingeniería de la Universidad de Carabobo; los cuales cuentan con la reactivación del sistema de turbina Kaplan del Laboratorio de Hidráulica "Elías Sánchez Díaz" de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Carabobo. Este sistema les permitirá realizar prácticas e investigaciones sobre las variables que intervienen en la producción de energía hidroeléctrica.

Esta reactivación ha sido realizada por causa de que el sistema permaneció inoperante por más de 30 años, en consecuencia no se dispone de trabajos recientes donde se especifiquen las prácticas que pueden ser implementadas en el sistema de turbina Kaplan. Mediante esta investigación se proporcionan métodos para que los alumnos y usuarios realicen prácticas a escala piloto que contribuyan a la consolidación del conocimiento; de modo que este sea implementado en un sistema a escala real.

1.2 OBJETIVOS.

1.2.1 Objetivo General.

Evaluar la operación del sistema de turbina Kaplan del laboratorio de hidráulica “Elías Sánchez Díaz” de la escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Carabobo.

1.2.2 Objetivos Específicos.

1. Determinar los parámetros de operación de la turbina Kaplan.
2. Diseñar las pruebas experimentales para el sistema de turbina Kaplan.
3. Elaborar las curvas de funcionamiento para la representación de las variables de salida del sistema de turbina Kaplan.
4. Establecer la metodología para la realización de las prácticas y el mantenimiento del sistema de turbinas Kaplan.

1.3 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.

La evaluación de la operación del sistema de turbina Kaplan representa gran importancia en distintos ámbitos, en el primero beneficia tanto a la comunidad permitiéndoles contar con un sistema en el cual puedan conocer sus características y funcionamiento, como a profesionales que laboran en empresas de generación de energía eléctrica permitiéndoles dictar talleres sobre este sistema.

En un ámbito técnico, este sistema a escala piloto permite el desarrollo de estudios aplicables en el diseño de sistemas modelos utilizados en escala real en centrales hidroeléctricas en Venezuela para la generación de energía eléctrica.

En el ámbito académico, este sistema de turbina representa un aporte significativo a los estudiantes de Ingeniería Civil, Mecánica y Eléctrica, ya que contribuye en su formación

como profesionales; considerando su uso por cada una de las especialidades en ingeniería de la Universidad de Carabobo.

Además su realización representa un precedente en la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Carabobo y pretende servir de base para futuras investigaciones en el campo de las turbomáquinas.

1.4 ALCANCES Y LIMITACIONES.

Esta investigación se llevará a cabo en las instalaciones del laboratorio de Hidráulica "Elías Sánchez Díaz" de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Carabobo específicamente sobre el sistema de ensayo de la turbina Kaplan con el fin de evaluar el comportamiento de la misma además de que los distintos estudiantes podrán realizar prácticas en dicho sistema y así obtener conocimientos sobre este tipo de proceso.

Ausencia de personal técnico experimentado en prácticas realizadas en el banco de turbina Kaplan del laboratorio de Hidráulica "Elías Sánchez Díaz" de la Escuela de Ingeniería Civil de la UC.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES

A continuación se citan trabajos realizados que se relacionan con el objeto de estudio:

Albright et al [1] diseñó un método y aparato para determinar automáticamente el conjunto de ángulos de operaciones óptimas para las palas de paso variable de una turbina de tipo Kaplan que tiene puertas móviles y se controla mediante un regulador y una leva electrónica 3D. El regulador controla las puertas a fin de mantener la turbina en un nivel predeterminado de generación de energía de consigna, y se miden valores en-leva de particulares parámetros de funcionamiento de la turbina. Cuando la evaluación de los datos medidos indica que la turbina está en una condición de estado estacionario, las cuchillas se mueven a través de una serie de variaciones incrementales fuera de leva en el tono. Después de cada paso incremental variación de las palas, el gobernador reposiciona las puertas para devolver la turbina para el nivel predeterminado de generación de energía de consigna. Después se controla el funcionamiento de la turbina, y los valores de los parámetros de funcionamiento específicos, se miden en el nuevo punto de accionamiento de la compuerta de punta una vez que la turbina ha vuelto al estado de equilibrio. Un valor de eficiencia se calcula para cada uno de los puntos medidos en funcionamiento y se comparan para identificar un valor pico de la eficiencia.

Deitz et al [2] presentó un método y un sistema para optimizar el rendimiento de una turbina de la unidad de generación de energía de Kaplan se proporcionan en el que una "N-dimensional" virtual de leva óptima se rellena con la puerta y la hoja ajustes posicionales la producción de potencia máxima de salida para un conjunto de parámetros de funcionamiento N. Los parámetros preferidos incluyen la cabeza, flujo, nivel de generación de energía, la situación física de la unidad, estado de funcionamiento de las unidades vecinas, la pérdida de bastidor de basura y un parámetro indicativo de la cavitación (como el nivel de inmersión relativa). Cuando el sistema detecta un conjunto único de condiciones de operación para la que se necesita la optimización, se realiza una búsqueda de optimización iterativo de los mejores de la puerta y de la hoja ajustes posicionales, que luego se guardan en la memoria (que pueblan la matriz de levas) para su uso posterior cuando el mismo operativo se encuentran condiciones. La matriz óptima divide parámetros que tienen rangos en segmentos

de rango y trata a otros parámetros como tener estados discretos. La búsqueda de optimización se realiza preferiblemente mientras se mantiene constante el flujo, y se realiza un flujo característico de búsqueda para determinar la configuración de la puerta de candidatos y de la hoja que resulta en flujo constante.

Hans (1962) [3] la presente invención se refiere a un sistema de control para máquinas de fluidos de flujo, especialmente turbinas Kaplan, y, más particularmente, se refiere a un arreglo para limitar el aumento de la velocidad de rotación de tales máquinas cuando la carga en tales máquinas cae repentinamente.

Seewer (1946) diseñó un dispositivo para turbinas hidráulicas y tiene por objeto evitar que las velocidades excesivas fugitivos automáticamente. Ya que es un medio de limitación de velocidad montado en el rotor de la turbina y adaptado, si se excede una velocidad predeterminada, para proyectar en la corriente y limitar la velocidad del rotor a través de un par de frenado sobre el mismo o desviando o de otra manera alterar el agua en su forma de las cuchillas de conducción o por tener una combinación de estos efectos. [4]

Webber (2012) realizó una turbina de tornillo que comprende un álabe de turbina helicoidal montado para rotación axial, un montaje asociado con la pala de turbina helicoidal y el montaje de la pala de la turbina helicoidal para rotación axial, y un generador asociado con la pala de turbina helicoidal que convierte la energía impartida a la pala de turbina helicoidal a electricidad, en el que el diámetro de la pala de la turbina helicoidal es menor que el plomo de la pala de turbina helicoidal y en el que dicha turbina de tornillo está adaptado para permitir el intercambio lateral de líquido en uso. [5]

2.2 BASES TEÓRICAS

2.2.1 Máquinas de fluidos

Una máquina de fluido es un sistema mecánico que intercambia energía mecánica con el fluido que está contenido o que circula a través de él.

Las máquinas de fluido se pueden clasificar según tres criterios de los que hablaremos a continuación: según el sentido de la transmisión de la energía, según la compresibilidad del fluido, y según el principio de funcionamiento de la máquina.

a) Según el sentido de la transmisión de la energía.

- **Máquinas generadoras:** son las que comunican energía al fluido, como son las bombas o los ventiladores. La energía que consume la máquina debe ser suministrada.
- **Máquinas motoras:** son las que extraen energía de un fluido, como ocurre con las turbinas.
- **Máquinas reversibles:** por su diseño, pueden funcionar tanto como generadoras como motoras, como son, por ejemplo, los grupos turbina- bomba de las centrales de acumulación por bombeo.
- **Máquinas transmisoras:** transmiten la energía entre dos sistemas mecánicos o dos fluidos, combinando una máquina motora y otra generadora. Pueden citarse los acoplamientos fluidos, los convertidores de par,…

b) Según la compresibilidad del fluido.

- **Máquina hidráulica:** si el fluido es un líquido sin cambio de fase, o un gas en el que los posibles cambios de densidad del gas son despreciables.
- **Máquina térmica:** si el fluido es un líquido que presenta cambios de fase, o se trata de un gas en el que las diferencias de presión y los efectos térmicos producen considerables cambios de densidad.

c) Según el principio de funcionamiento de la máquina.

- **Máquinas rotodinámicas o turbomáquinas:** el intercambio de cantidad de movimiento entre el fluido y la máquina se produce a través de una pieza giratoria, llamada rotor o rodete.
- **Máquinas de desplazamiento positivo o volumétrico:** el intercambio de energía máquina-fluido es sobre todo en forma de presión mediante el paso del fluido a través de una cámara de trabajo, en la que entra y salen en un proceso alternativo.
- **Máquinas gravimétricas:** el intercambio de energía es sobre todo de tipo potencial gravitatorio, como la rueda hidráulica o el tornillo de Arquímedes. [6]

2.2.2 Máquinas hidráulicas.

Una máquina hidráulica es un dispositivo capaz de convertir energía hidráulica en energía mecánica; pueden ser motrices (turbinas), o generatrices (bombas), modificando la energía total de la vena fluida que las atraviesa. En una máquina hidráulica, el agua intercambia energía con un dispositivo mecánico de revolución que gira alrededor de su eje de simetría; éste mecanismo lleva una o varias ruedas, (rodetes o rotores), provistas de álabes, de forma que entre ellos existen unos espacios libres o canales, por los que circula el agua.

Bomba: Es una máquina que absorbe energía mecánica y restituye al líquido que la atraviesa energía hidráulica.

En la actualidad se encuentran en uso dos tipos de bombas:

a) Desplazamiento Positivo:

- Reciprocantes:
- Rotatorias

b) Rotodinámicas (Rotatorias):

- Centrífugas
    - Bombas centrífugas (flujo radial)
    - Bombas de flujo axial
    - Bombas de flujo mixto

Turbina hidráulica: Es una máquina hidráulica, que aprovecha la energía de un fluido que pasa a través de ella para producir un movimiento de rotación que, transferido mediante un eje, mueve directamente una máquina o bien un generador que transforma la energía mecánica en eléctrica, así son el órgano fundamental de una Central hidroeléctrica.

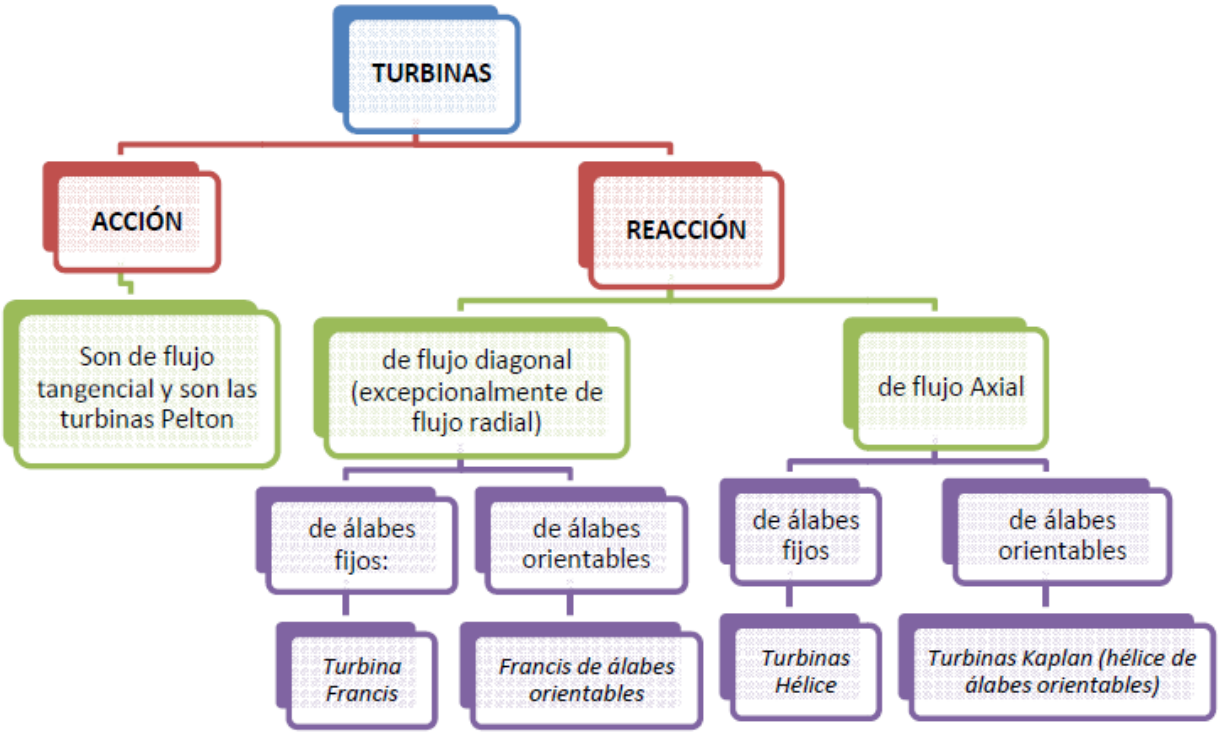


Figura 2.1 Clasificación de las turbinas.

Las turbinas se pueden clasificar de varias maneras estas son:

a) Según la dirección del flujo:

- **Turbinas axiales:** el agua entra en el rodete en la dirección del eje
- **Turbinas radiales:** el agua entra en sentido radial, no obstante el agua puede salir en cualquier dirección.

b) Según los cambios de presión en el rodete tenemos los siguientes:

- **Turbinas de acción o impulso:** no se produce variación de presión estática a través del rotor, por lo que el fluido no precisa llenar todo el espacio entre álabes. Toda la caída de presión estática se sitúa en la tobera del inyector y el agua sólo incide sobre los sucesivos álabes en forma de uno o varios chorros discretos con gran energía cinética.
- **Turbinas de reacción:** se produce una caída de presión estática en el rotor, por lo que el líquido debe llenar todo el canal entre álabes.

c) Según la dirección del eje:

- **Horizontales**
- **Verticales**

Hay otras clasificaciones, según las condiciones de construcción, no obstante la clasificación más importante es la que las separa de acuerdo al modo de obrar el agua, estas de reacción o de chorro. Aunque hay muchas turbinas que entran en estas clasificaciones las más importantes son las turbinas Pelton, Francis y Kaplan y se distinguen según el diseño del rodete. [7]

- **Turbina Pelton:** es una turbina de acción y es característica de saltos con desniveles superiores a 400 m. Este tipo de turbina carece de difusor por lo que se denominan también de escape libre.
- **Turbina Francis:** es una turbina de reacción y aunque el primer diseño era una turbina de flujo radial, hoy en día la mayor parte de los diseños bajo esta denominación son heliocentrípetos (mixtos), teniendo en la salida del rotor componentes axiales y radiales de velocidad. Es característica de saltos entre 40 y 500 m, y son las más frecuentemente usadas. Algunos diseños especiales, los álabes son orientables y reciben la denominación de turbina Deriaz.
- **Turbina Kaplan:** también es una turbina de reacción, y es de flujo totalmente axial. Se emplean en saltos muy pequeños, inferiores a 60 m.

2.2.3 Turbina Kaplan

La importancia de las turbinas Kaplan en pequeños saltos con grandes caudales, las hacen idóneas tanto en posición horizontal como vertical; por su similitud con las turbinas bulbo, empleadas tanto en centrales mareomotrices como en algunas mini centrales (Figura 2.2). La turbina Kaplan es un turbina de reacción y su flujo es completamente axial, es una turbina de hélice con álabes ajustables de manera que la incidencia del agua en el borde de ataque del álabe de prueba pueda producirse en las condiciones de máxima acción, cualesquiera que sean los requisitos de caudal o de carga se logra así mantener un rendimiento elevado a diferentes valores de la potencia.

En los casos en que el agua sólo circule en dirección axial por los elementos del rodete, tendremos las turbinas de hélice o Kaplan (Figura 2.2). Las turbinas Kaplan tienen álabes móviles para adecuarse al estado de la carga.

Estas turbinas aseguran un buen rendimiento aún con bajas velocidades de rotación.

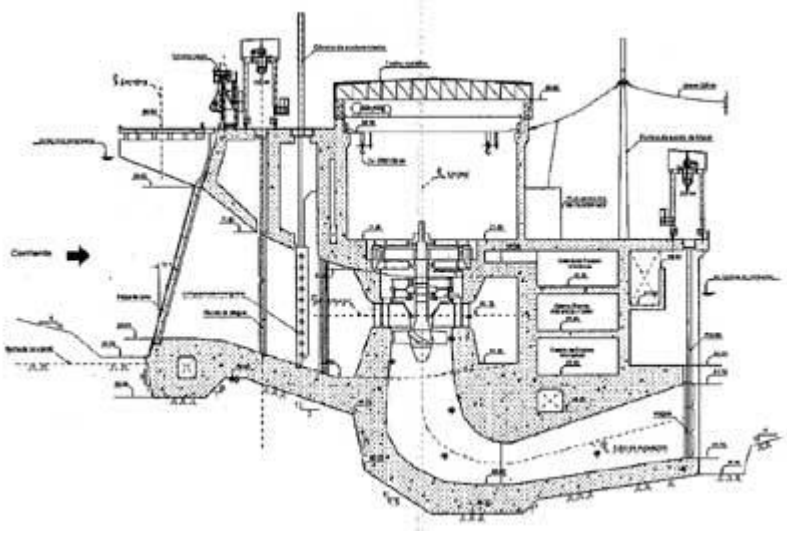


Figura 2.2 Sección transversal de una central hidráulica con turbina Kaplan

2.2.4 Principales elementos

Cámara de alimentación o carcasa (Figura 2.3)**,** facilita la variación de la cantidad de movimiento del agua que fluye a la corona de los álabes directrices, en muchos de los casos suele ser de concreto, debido a la gran capacidad de gasto que admite.

Distribuidor, regula el gasto de admisión y además imprime al agua el giro necesario, en una zona de vórtices libres que precede al rotor, propiciando el ataque adecuado del agua a los álabes para una transferencia de energía eficaz. Los álabes del distribuidor se ajustan, de acuerdo a las necesidades de la potencia.

Rotor de la turbina, de forma de hélice, está constituido por un robusto cubo, cuyo diámetro es del orden del 40% al 50% del diámetro total al extremo de los álabes, en el cual van empotrados los álabes encargados de efectuar la transferencia de energía del agua al eje de la unidad. La robustez del cubo se justifica no solo por razones de resistencia mecánica sino también porque debe alojar en su interior el mecanismo de reglaje del paso de los alabes del rotor, los álabes del rotor tienen el perfil de ala de avión y desarrollo helicoidal. El perfil de ala permite obtener una acción útil de agua sobre el álabe en el movimiento que aquella tiene respecto a éste.

Tubo de desfogue o difusor, su función es recuperar la energía en virtud de su conicidad.

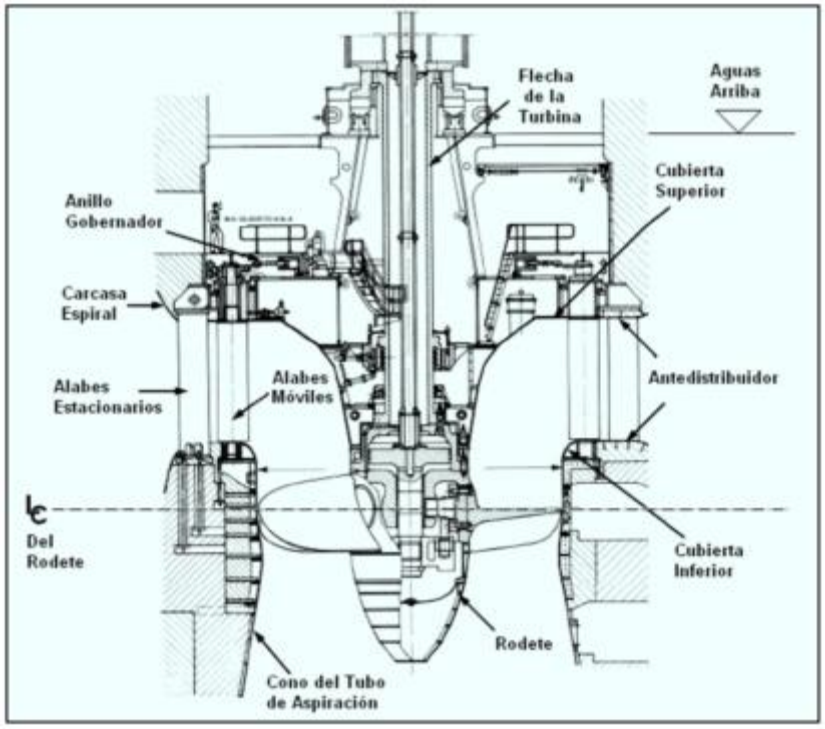


Figura 2.3 Turbina Kaplan de eje vertical.

En el interior del cubo se encuentra el mecanismo de giro de las palas del rodete, lo que obliga a que el número de las mismas sea pequeño, que puede aumentar al crecer el salto y las dimensiones del rodete.

Tabla 2.1 Número de palas Zp en función del número específico de revoluciones n_s.

n_s	400-500	500-600	600-750	750-900	> 900
Zp	7 a 8	6	5	4	3
H (metros)	60	50	40	20	5
Relación de cubo	0,6	0,55	0,5	0,4	0,3

En la Tabla 2.1 se indica el número de palas Zp en función del número específico de revoluciones ns que condiciona el salto neto H y la relación entre los diámetros del cubo y exterior del rodete, observándose que un aumento del número de palas supone una disminución del ns.

A medida que aumenta H aumentan los esfuerzos que tienen que soportar los álabes, por lo que el cubo ha de tener mayor diámetro, tanto para poder alojar los cojinetes de los pivotes de los álabes, como para poder alojar el mayor número de álabes. Para alturas netas superiores a los 10 metros, la turbina Kaplan empieza a ser más voluminosa que la turbina Francis, aunque mantiene la ventaja de tener los álabes orientables.

El único componente de las turbinas Kaplan, que podría considerarse como distinto al de las turbinas Francis, es el rotor o rodete (Figura 2.4). Se asemeja a la hélice de un barco, está formado por un número determinado de alabes, de 2 a 4 para cargas de pequeña altura y de 5 a 9 cuando las cargas son mayores, por supuesto dentro del campo de aplicación de las turbinas Kaplan.

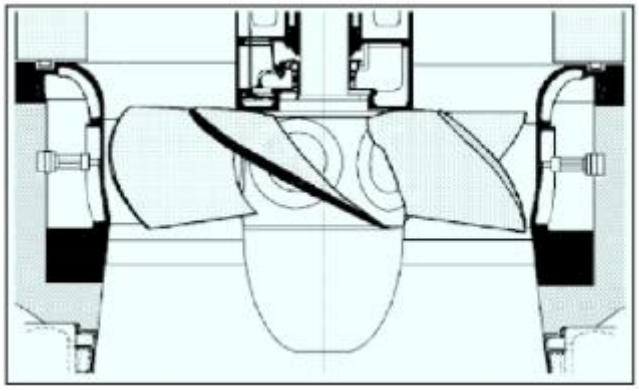


Figura 2.4 Rotor de una turbina Kaplan.

En las turbinas Kaplan, de todos y cada uno de los alabes del rotor están dotadas de libertad de movimiento, pudiendo orientarse dentro de ciertos límites sobre sus asientos respectivos situados en el núcleo, llamado también cubo del rodete, adoptando posiciones de mayor o menor inclinación respecto a la flecha de la turbina (Figura 2.5) según órdenes recibidas del regulador de velocidad.

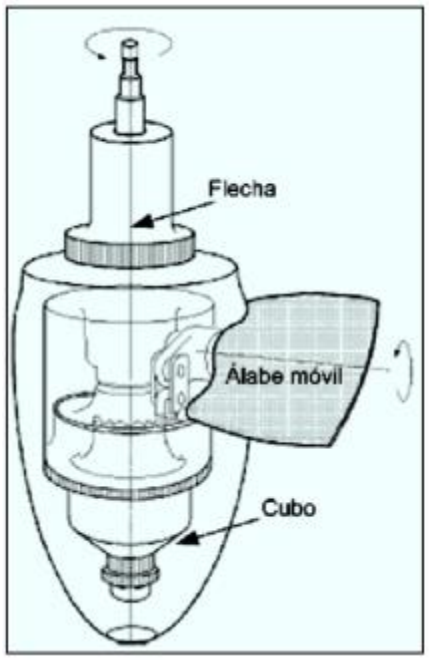


Figura 2.5 Disposición del cubo y del álabe de la turbina Kaplan.

Las turbinas Kaplan son también conocidas como turbinas de doble regulación, por intervenir en el proceso de regulación tanto las palas o alabes del distribuidor, como sobre los álabes del rotor dependiendo de las condiciones de carga existente.

Con este procedimiento se consiguen elevados rendimientos, incluso para cargas bajas y variables, así como en el caso de fluctuaciones importantes del caudal.

Las palas directrices del distribuidor, se gobiernan de forma análoga a como se realiza en las turbinas Francis.

Para lograr el control adecuado de los álabes del rotor, tanto el núcleo del rotor, como el eje de turbina, permiten alojar en su interior los distintos dispositivos mecánicos (Figura 2.6), tales como servomotores, palancas, bielas, destinados a dicho fin.

Se distinguen tres sistemas de gobierno de los álabes del rotor, dependiendo de la ubicación del servomotor de accionamiento en las distintas zonas de la flecha del grupo turbina-generador.

Así se tiene:

- Servomotor en cabeza: el servomotor está instalado en el extremo superior de la flecha. En la zona del generador.
- Servomotor intermedio: en este caso está situado en la zona de acoplamiento de la flecha de la turbina y del generador.
- Servomotor en núcleo: está alojado en el propio núcleo del rotor.

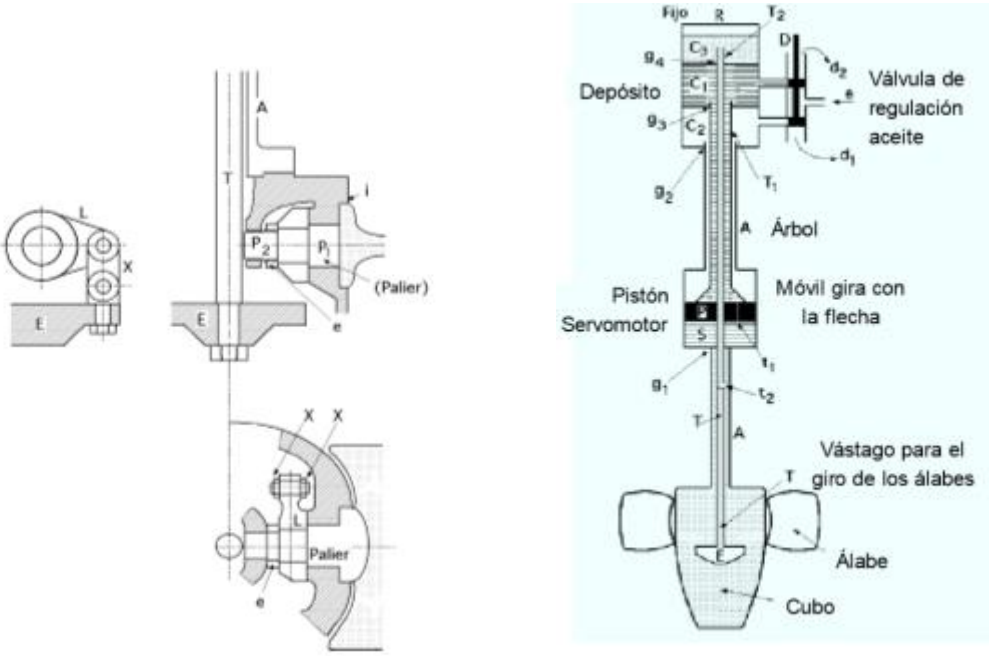


Figura 2.6 Mecanismo de regulación de los álabes de una turbina Kaplan.

El vástago T es accionado por un servomotor S que gira solidario con el árbol; por encima de éste va situado un depósito fijo R, en el que las cámaras C1 y C2 están comunicadas con una válvula de regulación de aceite D de una entrada y dos salidas.

En el interior del árbol A existen dos tubos concéntricos T1 y T2 por los que pasa el aceite a presión; el conducto entre el árbol y T1 pone en comunicación la cámara C1 con la parte inferior del servomotor a través del agujero t1 practicado en el pistón P que actúa directamente sobre el vástago T de regulación.

Como se trata de piezas giratorias, hay que procurar en g2, g3 y g4 evitar pérdidas o fugas de aceite entre las diversas cámaras que están a presiones diferentes; asimismo, como el conjunto formado por el pistón P el vástago T y los tubos T1 y T2 situados en el interior del árbol A tienen que ir también engrasados, hay que disponer una junta de estancamiento en g1 de forma que se evite la comunicación desde la parte interior del cubo de la rueda hacia la parte inferior del pistón P del servomotor, que está a presión variable.

Según sea la posición del distribuidor de aceite D se puede colocar una de las caras del pistón P en comunicación con la llegada de aceite a la presión de la tubería de entrada e, mientras que el otro lado del pistón P está a la presión de descarga.

El interior del tubo T2 pone en comunicación la parte superior del depósito R (cámara C3), con el interior del cubo de la rueda, por medio de un agujero t2 practicado en la cruceta de mando T de orientación de las palas.

Esta cámara C3, que está a la presión atmosférica, contiene aceite a un cierto nivel y juega el papel de depósito de expansión del aceite contenido en el cubo, siendo este volumen de aceite función de la posición de las palas.

Esta cámara se debe situar en un nivel tal que la presión estática que asegura la presencia de aceite en el cubo, sea suficiente para evitar la entrada del agua en el interior del cubo.

El servomotor S puede estar colocado en una posición cualquiera del árbol, como en la parte superior, o por encima del alternador, o bien entre el alternador y la turbina, o por debajo del mecanismo de orientación de las palas cuando el espacio lo permita.

Actualmente en el empleo del servomotor en el núcleo es el más utilizado, con él se reducen las dimensiones y el número de elementos mecánicos que en los otros realizan la interconexión entre el servomotor y los ejes de los álabes del rotor. En los sistemas del servomotor intermedio y en el núcleo, los conductos de aceite entre regulador de velocidad y el servomotor se realizan mediante conductos concéntricos dispuestos en el interior del eje del grupo turbina-generador.

En algunas turbinas Kaplan los álabes del rotor se orientan con mecanismos accionados por motores eléctricos y reductores de velocidad ubicados en el interior de la flecha. En los rotores Kaplan, el interior del núcleo está lleno de aceite a fin de producir la estanqueidad para evitar el paso de agua a través de los álabes.

Una de las características fundamentales de las turbinas Kaplan constituye el hecho que los álabes del rotor no están situadas a una cota más baja que la cota del distribuidor, de modo que el flujo del agua incide sobre las palas en su parte posterior en dirección paralela al eje de la turbina como se observa en la Figura 2.7.

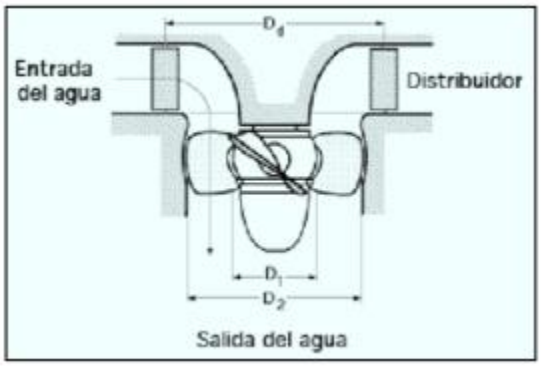


Figura 2.7 Flujo de agua en un rodete de una turbina Kaplan.

La doble regulación de una turbina Kaplan hace que ésta sea más cara que una Francis de igual potencia, por lo que se utilizan en aquellas instalaciones en que se desee conseguir rapidez de giro y máxima facilidad de regulación.

Si esta última condición no es muy precisa, es decir, si la turbina ha de funcionar casi siempre con poca variación de carga, es preferible utilizar una turbina hélice, que por su sencillez, es muy superior a la Francis.

La curva de rendimiento de una turbina Kaplan es una curva plana, y su rendimiento a cargas intermedias es superior no sólo al de las turbinas hélice, sino al de todas las turbinas Francis, siendo su curva de rendimiento comparable con las curvas planas características de las turbinas Pelton. Esta curva de rendimiento plana, es la envolvente de las curvas que se obtendrían con un número infinito de rodetes de turbina hélice de ns crecientes. Esta curva sólo se obtiene utilizando una combinación óptima del ángulo del rodete y de la apertura del distribuidor.

2.2.5 Estimación del caudal

El flujo a nivel de distribuidor, en una turbina Kaplan, se presenta radial, mientras que pasa a ser axial al alcanzar el rodete. En la Bulbo el flujo es siempre axial. La zona de acción del rodete que permite pivotar a los álabes se encuentra comprendida, para las turbinas hélice,

entre dos superficies cilíndricas coaxiales, y para las Kaplan, entre dos superficies esféricas concéntricas.

Dentro del sistema de turbina Kaplan el conocimiento del caudal que pasa por los tramos de tubería es de suma importancia ya que esto representa el volumen hidráulico que puede manejar el sistema a distintas condiciones de operación.

Para el Conocer la cantidad de flujo con la cual está operando el sistema se utiliza una placa con orificio concéntrico, ubicado a 2,15 m de la entrada de la turbina Kaplan. Esta placa es el elemento principal para la medición de flujo, por medio de las lecturas de presión diferenciales permite determinar el caudal. Esto se obtiene a través de un piezómetro diferencial Hg-H_2o que se encuentran ubicado en tomas conectada en la parte anterior y posterior de la placa que captan esta presión diferencial. [8]

Para el cálculo de la placa de orificio se va a utilizar, la norma ISO 5167 [8].

Las ecuaciones de placa orificio a utilizar son las siguientes:

$$Q = C * Ao * \sqrt{\frac{2 * \Delta P_{Placa}}{\rho_{H_2O}}} \tag{2.1}$$

Dónde:

Q: Caudal del sistema (m3/s).

C: Ctte de la placa orificio (adimensional).

Ao: Área interna de la placa orificio (m2).

ΔP_{Placa}: Delta de presiones (Pa).

$$Ao = \frac{\pi * d^2}{4} \tag{2.2}$$

Dónde:

A_o: Área de orificio (m2).

d: Diámetro del orificio (m).

$$C = \frac{Cd}{\sqrt{1 - \beta^4}} \tag{2.3}$$

Dónde:

C: Constante de la placa orificio (adimensional).

C_d: Coeficiente de descarga (adimensional).

β: Relación de diámetro (adimensional).

$$\beta = \frac{d}{D_i} \tag{2.4}$$

Dónde:

β: Relación de diámetro (m).

d: Diámetro del orificio (m).

D_i: Diámetro interno de la tubería (m).

El peso específico del agua viene dado por:

$$\gamma = \rho * g \tag{2.5}$$

Dónde:

γ: Peso específico del agua (N/m3).

ρ: Densidad del agua (kg/m3).

g: Gravedad (m/s2).

$$\rho = 1000 - \frac{(T-4)^2}{180} \tag{2.6}$$

Dónde:

ρ: Densidad del agua (kg/m3).

T: Temperatura del agua (°C).

Para determinar el coeficiente de descarga en placas de orificio, se utiliza la expresión general de Stolz:

$$Cd = 0{,}5959 + 0{,}0312\beta^{2{,}10} - 0{,}1840\beta^{8} + 0{,}0029\beta^{2{,}5}\left(\frac{10^6}{Re}\right)^{0.75} + \frac{0{,}09L_1\beta^4}{(1-\beta^4)} + \cdots$$

$$\ldots - \ 0{,}0337L_2\beta^3 \tag{2.7}$$

Dónde:

Cd: Coeficiente de descarga (adimensional).

β: Relación de diámetro (adimensional).

Re: Reynolds (adimensional).

$L_1 = l_1 / D$: es la relación que existe entre la distancia desde el plano de la toma de alta presión aguas arriba hasta la cara de la placa orificio y el diámetro de la tubería.

$L_2 = l_2 / D$: es la relación que existe entre la distancia desde el plano de la toma de baja presión aguas abajo hasta la cara de la placa orificio y el diámetro de la tubería.

En el caso de que la Placa orificio sea concéntrica y de cantos vivos, como la del banco en estudio, los valores de ***L_1*** y ***L_2*** serán:

$L_1 = 1$

$L_2 = 1/2$

$$Re = \frac{4 * Q}{\pi * \upsilon * D_i} \tag{2.8}$$

Dónde:

Re: Reynolds (adimensional).

Q: Caudal del sistema (m^3/s).

π: Pi (adimensional).

υ: Viscosidad cinemática del agua (m^2/s).

D_i: Diámetro interno de la tubería (m).

La velocidad que experimenta el fluido en la tubería de entrada y de salida de la turbina esta influencia por el área interna de la tubería y el caudal que fluye por la misma.

$$v = \frac{Q}{A} \tag{2.9}$$

Dónde:

Q: Caudal del sistema (m^3/s)

v: Velocidad lineal (m/s)

A: Área de la sección transversal de la tubería (m^2)

2.2.6 Curvas características de las turbinas Kaplan

Sabemos que en las turbinas Kaplan existen dos órganos reguladores del caudal, los álabes del distribuidor caracterizados por el parámetro x que determina su grado de apertura, y los álabes móviles del rodete, cuya posición viene caracterizada por el ángulo ϕ.

Esto hace que sea posible el que la turbina funcione en un mismo punto del campo característico con rendimientos distintos; lo que se pretende es el conseguir que la turbina Kaplan funcione en cada punto con un rendimiento óptimo. En lugar de una sola colina de rendimientos, como en las turbinas Francis o Pelton, se pueden trazar dos series distintas de colinas de rendimientos.

Regulación del caudal del distribuidor con los álabes del rodete fijos: En la primera serie se fijan los álabes del rodete en una posición determinada, ϕ = Cte, y se traza una colina regulando el caudal únicamente con el distribuidor; para ángulos ϕ distintos se obtienen otras tantas colinas de rendimientos.

Regulación del caudal con los álabes del rodete orientables y el distribuidor fijo: En la segunda serie se fija la apertura x del distribuidor, y se traza una colina regulando el caudal, modificando únicamente el ángulo ϕ de los álabes del rodete; para distintas aperturas del distribuidor x1, x2, x3,..., etc, se obtienen otras tantas colinas.

Colina de rendimientos: De este doblete de colinas hay una muy singular, cuyos rendimientos son los óptimos que se pueden alcanzar en el punto correspondiente del campo característico; a esta colina es a la que normalmente se conoce como colina de rendimientos de la turbina Kaplan. Para el trazado de las curvas características universales de las turbinas Kaplan, se pueden seguir varios procedimientos.

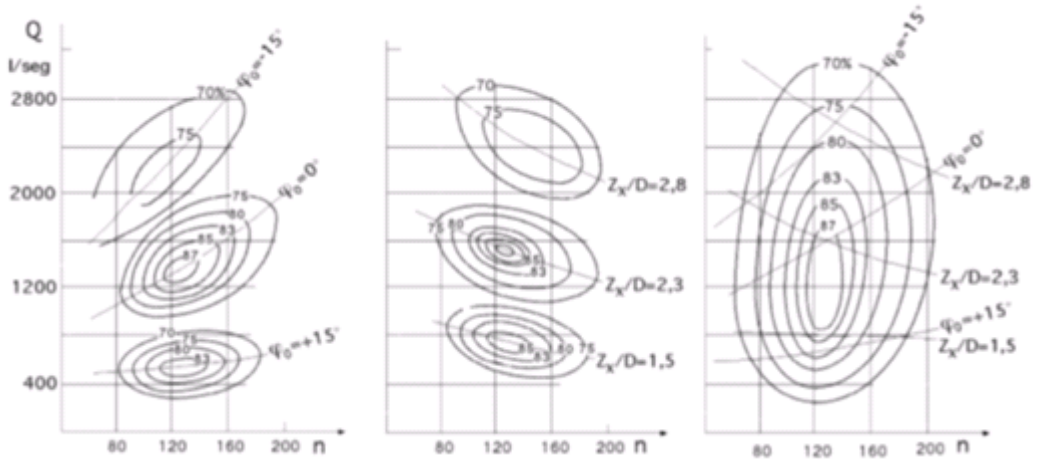


Figura 2.8 Trazado de la colina de una turbina Kaplan.

Mediante el primero se obtienen un número conveniente de colinas de la primera serie, una colina para cada valor de x dado, regulando el caudal variando el ángulo ϕ de los álabes del rodete.

Asimismo se traza un número conveniente de colinas de la segunda serie, cada una para un valor de ϕ = Cte, regulándose el caudal variando la apertura x del distribuidor.

Se llevan las dos series de colinas así obtenidas a un mismo plano y se trazan las líneas de rendimiento máximo que se pueden alcanzar con una combinación adecuada de la apertura del distribuidor x y del ángulo ϕ de las palas del rodete, lo cual se consigue trazando las envolventes de las isolíneas de rendimientos de las diversas colinas, tal como se muestra en la figura 2.8.

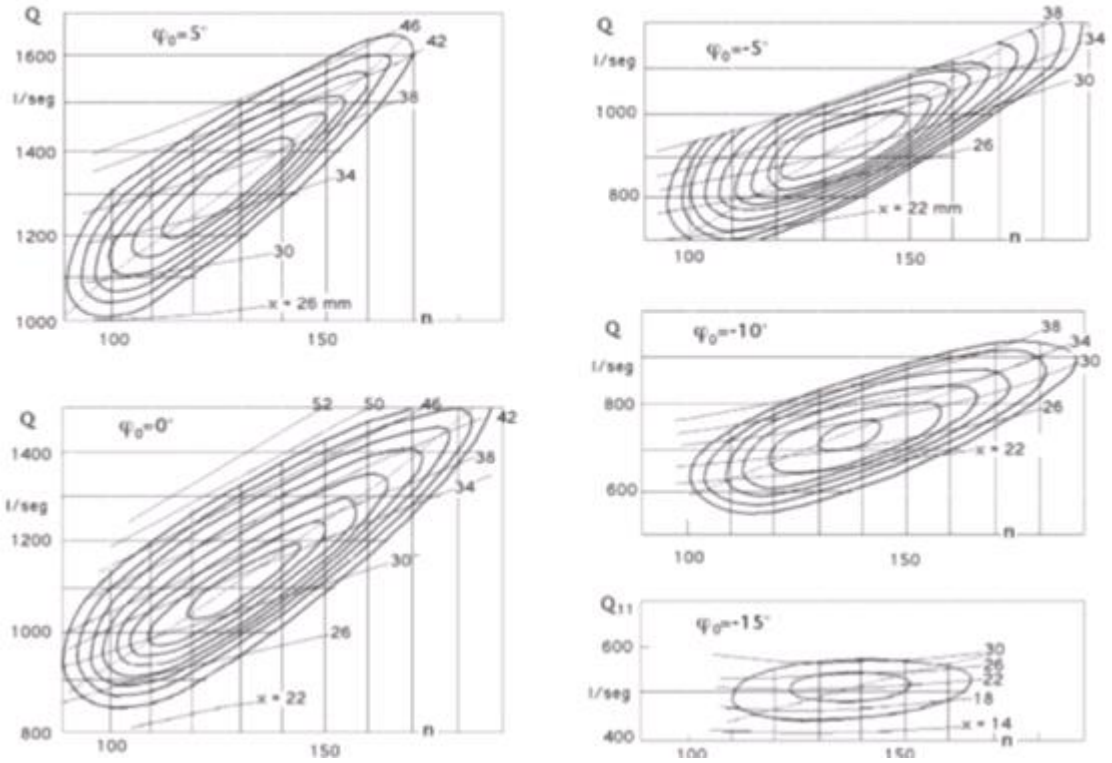


Figura 2.9 Colina de rendimientos de una turbina Kaplan para cinco valores de ángulo ϕ.

Según esto, cada punto del campo característico se puede realizar con el η(total máximo) correspondiente a la isolínea de, ηtotal = Cte, que pasa por dicho punto, con la condición de que la apertura del distribuidor y el ángulo de los álabes del rodete sean los correspondientes a las líneas de los puntos x = Cte, ϕ = Cte, que pasan por dicho punto.

Siguiendo otro procedimiento se trazan una serie de colinas de rendimientos de uno de los dos tipos descritos anteriormente, siendo preferidos los del primero porque es más fácil variar ϕ.

Se comprueba que al aumentar ϕ aumenta Q mientras que el valor óptimo de n varía poco, disminuyendo para ángulos ϕ elevados, como se muestra en las colinas de rendimientos de la turbina Kaplan representada en la figura 2.9 obtenidas para cinco valores del ángulo ϕ de posición de los álabes del rodete.

Se establece la condición de situar cada punto del plano (Q, N) con el rendimiento óptimo, obteniéndose así la colina de rendimientos.

Se escoge un valor determinado de N, se traza la vertical, N = Cte, y se leen en las diferentes colinas los valores máximos del rendimiento, (caracterizadas por valores distintos de ϕ), y en la intersección de la vertical, N = Cte, con cuantos valores de Q se deseen, en cada caso, anotándose también el valor de ϕ de la colina respectiva y el valor de x con el que se obtiene dicho rendimiento.

Para cada valor de n se obtienen los tres tipos de curvas:

$$\eta\text{total} = f(Q) \quad ; \quad x = f(Q) \quad ; \quad \phi = f(Q)$$

Que se han representado en la figura 2.11, para un mismo valor de N, obtenidas a partir de las curvas características universales descritas anteriormente.

Para otros valores de N se trazan otras series de curvas de este tipo, y con estos datos se pueden trazar las curvas características universales de las turbinas Kaplan.

Para ello, en cada punto del plano (Q, N) se anotan tres valores de η_{tot} y x, obteniéndose el diagrama de dichas turbinas trazando las isolíneas de igual rendimiento, las isolíneas de ϕ = Cte, que son los valores del ángulo del rodete con los que se obtienen los rendimientos máximos, y las de apertura, x = Cte, como se indica en la figura 2.10, obteniéndose así un diagrama universal de la turbina Kaplan.

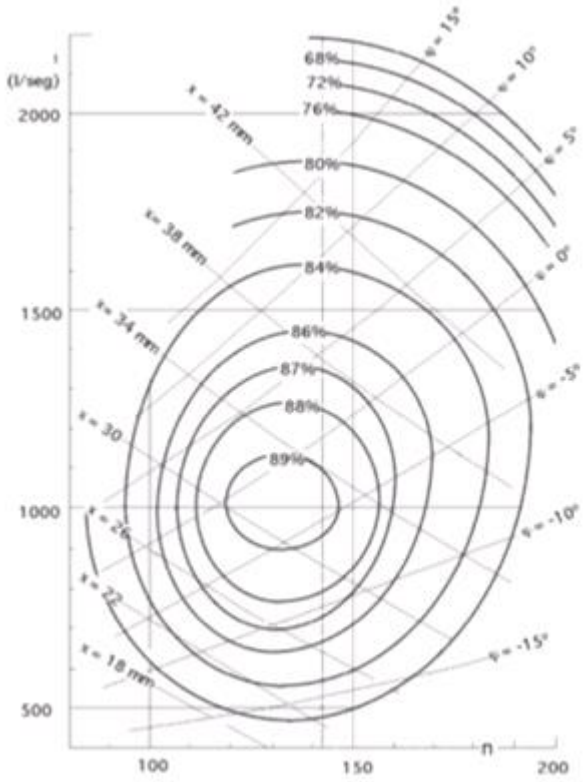


Figura 2.10 Curvas características universales de una turbina Kaplan.

La altura neta es el incremento de altura que absorbe la turbina en forma de presión, en forma de altura geodésica y en forma de altura cinética.

$$H = \frac{Pe - Ps}{\gamma} + \frac{Ve^2 - Vs^2}{2g} + Ze - Zs \qquad (2.10)$$

Dónde:

H = Altura Neta (m).

P= Presión (N/m^2).

V= Velocidad (m/s).

γ= Peso específico (N/m^3).

g= Gravedad (m/s^2).

Z= Altura (m).

Las características particulares de la turbina Kaplan se determinan sobre el diagrama universal, trazando la vertical que pasa por el punto N obteniéndose así los valores máximos

del rendimiento, para diferentes caudales, y los valores de x y de ϕ que hay que adoptar para conseguir dichos rendimientos.

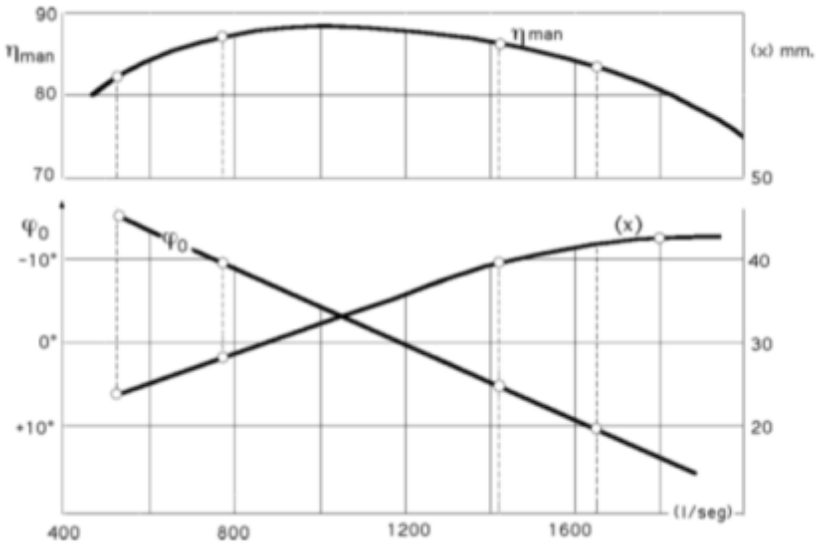


Figura 2.11 Curvas de η ϕ, x, para un mismo valor de n.

La eficiencia del sistema de turbina Kaplan se determina mediante el conocimiento de la potencia hidráulica y la potencia al freno.

$$\eta = \frac{P_a}{P} * 100 \tag{2.11}$$

Dónde:

η: Eficiencia (%).

P_a: Potencia hidráulica (W).

P: Potencia al freno (W).

$$P = Q * \rho * g * H \tag{2.12}$$

Dónde:

P: Potencia hidráulica (W).

Q: Caudal del sistema (m^3/s).

ρ: Densidad del agua (kg/m^3).

g: Gravedad (m/s^2).

H = Altura Neta (m).

$$P_a = 0{,}1047 * N * M = 0{,}1047 * N * (W - F) * d \quad (2.13)$$

Dónde:

P_a: Potencia al freno (W).

N: Velocidad de giro (RPM).

M: Fuerza torsional (N*m).

W: Pesas (N).

F: Dinamómetro (N). [8]

2.2.7 Diseño factorial

El objetivo de un ***diseño factorial*** es estudiar el efecto de varios factores sobre una o varias respuestas o características calidad, es decir, lo que se busca es estudiar la relación entre los factores y la respuesta, con la finalidad de conocer mejor cómo es esta relación y generar conocimiento que permita tomar acciones y decisiones que mejoren el desempeño del proceso.

Los factores pueden ser de tipo:

1. ***Cualitativo*** (máquinas, tipos de material, operador, la presencia o ausencia de una operación previa)
2. ***Cuantitativo*** (temperatura, humedad, velocidad, presión)

Para estudiar la manera en que influye cada factor sobre la variable de respuesta, es necesario elegir al menos dos niveles de prueba para cada uno de ellos (tres máquinas, dos operadores, tres velocidades, dos temperaturas).

Con el diseño factorial completo se corren aleatoriamente en el proceso todas las posibles combinaciones que pueden formarse con los niveles seleccionados.

2.2.8 Definición de experimento factorial

Un diseño de experimentos factorial o arreglo factorial es el conjunto de puntos experimentales o tratamientos que pueden formarse considerando todas las posibles combinaciones de los niveles de los factores.

Por ejemplo, con k=2 factores, ambos con dos niveles de prueba, se forma el diseño factorial 2 x 2 = 22 que consiste de cuatro combinaciones o puntos experimentales. Considerando otra vez K=2 factores, pero ahora uno con tres niveles y otro con dos niveles, se pueden construir 3 x 2 combinaciones que dan lugar al diseño factorial 3 x 2.

2.2.9 Efecto principal y efecto de interacción

El ***efecto de un factor*** se define como el cambio observado en la variable de respuesta debido a un cambio de nivel de tal factor.

En particular, los ***efectos principales*** son los cambios en la media de la variable de respuesta debidos a la acción individual de cada factor. Matemáticamente el efecto principal de un factor es la diferencia entre la respuesta media observada cuando tal factor estuvo en su nivel alto y la respuesta media observada cuando el factor estuvo en su nivel bajo. Por otra parte, se dice que dos factores interactúan entre sí o que tienen un ***efecto de interacción*** sobre la variable de respuesta, cuando el efecto de un factor depende del nivel en el que se encuentra el otro.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se presenta el tipo de investigación, los pasos a seguidos y por último, los recursos utilizados para la realización del mismo.

3.1 Tipo de la Investigación.

Según Hernández et al en un estudio descriptivo se selecciona una serie de cuestiones y se mide cada una de ellas independientemente, para así -y valga la redundancia- describir lo que se investiga. Esta investigación es de tipo descriptivo porque se caracteriza las variables de operación del sistema de turbina Kaplan en el Laboratorio de hidráulica "Elías Sánchez Díaz" de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Carabobo, tales como la carga neta, potencia y eficiencia del sistema.

3.2 Diseño de la Investigación.

La investigación fue de tipo experimental, ya que se manipularon variables experimentales a través de ensayos a determinadas condiciones permitiendo observar los efectos producidos en las variables de salida del sistema.

Se aplicará un diseño de tipo Factorial. Definición de un diseño factorial (PRESENTACION)

AGREGAR LA TABLA CON FACTORES Y NIVELES

3.3 POBLACION Y MUESTRA

POBLACION ES EL CONNJUNTO DE PRUEBAS (AGREGAR EL CONCEPTO DE POBLACION DEL LIBRO DE MTODOLOGIA)

LA MUESTRA ES EL CONJUNTO AGREGAR EL CONCEPTO DE MUESTRA DEL LIBRO DE MTODOLOGIA) . EN ESTA INVESTIGACIÓN, LA MUESTRA ES EL RESULTADO DEL PRODUCTO DE TRES FACTORES AJUSTADOS EN LOS

SIGUIENTES NIVELES: 9 X 9 X 6= 486 PUNTOS EXPERIMENTALES (GUTIERREZ Y DE LA VARA (CORCHETE).

3.4 FASES DE LA INVESTIGACION

LAS INBVESTIGACION SE REALIZXA EN LAS ISGUIENTES FASES: 1) RECOLECCION DE DATOS, 2) PROCESAMIENTO DE DATOS Y 3) OBTENCION DE RESULTADOS.

1) **FASE DE RECOLECCION DE DATOS:** EN ESTA FASE SE REALIZAN LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES AJUSTANDO LOS FACTORES EN LOS NIVELES COMO SE INDICA EN LA TABVLA XXXX; DANDO RESPUESTA A LOS OBJETIVOS UNO Y DOS.
2) **FASE DE PROCESAMIENTO DE DATOS:** APLICACION DE LAS ECAUCIONES DE ESTRIMACION DE VARIABVLES HIDRAULICAS SEÑANALASEN EL MARCO TEORICO Y LA REPRESWENTACION EN CURVAS QUE RELACIONAN LOS PARAMETROS, CARGA, EFICIENCA, CAUDAL, ANGULO DE RODE, VELOCIDAD DE GIRO. ESTE PROCEDIMEINTO DA RESPUESTA AL OBJETIVO 3.

3.3 Metodología de pruebas experimentales.

La metodología de pruebas usadas para la obtención de las variables de respuesta del sistema de turbina Kaplan se describe a continuación:

1. Energizar el panel de control del motor de la bomba subiendo el breaker en el tablero.
2. Girar la perilla del panel a la posición de encendido.
3. Verificar que la velocidad del motor esté en la posición número 1.
4. Verificar que el ángulo del rodete (ϕ) este en -5°.
5. Fijar la posición de los alabes del distribuidor (X) en 1’’.
6. Encender el motor de la bomba e ir incrementando la velocidad del motor cada 10segundos hasta alcanzar la posición 5.

7. Colocar el disco de 50Lbs como contrapeso.
8. Fijar la velocidad de giro de la turbina (N) en 200 RPM ajustada mediante la aplicación del freno Prony.
9. Realizar las lecturas de presiones de entrada y salida de la bomba y turbina además del delta de presión de la placa.
10. Repetir el paso Nº 8 para N 400, 600, 800, 1000, 1200 RPM y obtener para cada N las lecturas del paso Nº 9.
11. Luego se procede a fijar la posición de los alabes del distribuidor en: 1 1/8'', 1 1/4'', 1 3/8'', 1 1/2'', 1 5/8'', 1 3/4'', 1 7/8'', 2'', realizando los pasos 8, 9 y 10 para cada posición de los alabes del distribuidor.
12. Disminuir la velocidad del motor de la bomba cada 10segundos hasta alcanzar la posición 1 y luego se procede apagar el motor de la bomba.
13. Cambiar el ángulo del rodete a 0° e ir haciendo un incremento constante de 5° hasta llegar a 35°. Para cada cambio realizar los pasos números 5, 6, 7, 8, 9, 10 y 11.
14. Girar la perilla del panel a la posición de apagado.
15. Desenergizar el panel de control del motor de la bomba bajando el breaker en el tablero.

3.4 Curvas de Funcionamiento del sistema de Turbina Kaplan.

Las construcciones de las curvas de funcionamiento del sistema de Turbina Kaplan han sido realizadas siguiendo el procedimiento experimental para la construcción de la curvas características de la turbina Kaplan y haciendo uso de los resultados de las variables de respuestas obtenidas al aplicar la metodología para la realización de pruebas experimentales;

3.5 Procedimiento experimental para la construcción de la curva característica de la turbina kaplan.

Primero se realizaran una serie de colinas; Para esto se fijan los alabes del rodete en una posición determinada, ϕ = Ctte, y se traza una colina regulando el caudal únicamente con el distribuidor; para ángulos ϕ distintos se obtienen otras tantas colinas de rendimientos.

Se establece la condición de situar cada punto del plano (Q, N) con su rendimiento, obteniéndose así la colina de rendimiento para cada posición de los alabes del rodete.

Toma de datos.

Para la realización de la toma de datos (tabla 3.1) se debe clasificar las distintas variables presentes en el sistema. Para esto se establece dos grupos:

-Variables Independientes.

-Variables Dependientes.

Las Variables independientes son las variables que se fijaran en el sistema y a partir de estas se apreciara como responde las variables dependientes. Las Variables independientes a ser fijadas son: ϕ, N y X; y las variables dependientes que se tendrá como resultados de haber fijados las variables anteriores las cuales son: P, Pa y ɳ.

Tabla 3.1 Formato para la tomas de datos.

Velocidad	Alabes		Turbina		Dinamómetro		Placa Orificio	Bomba	
N	Rodete	Distribuidor	Pe_{Turb}	Ps_{Turb}	W	F	ΔP_{Placa}	Pe_B	Ps_B
(RPM)	ϕ (°)	X(’’)	(Psi)	(Psi)	(Lb)	(Kg)	(In Hg)	(Psi)	(Psi)

Variables a calcular.

Las variables a calcular (tabla 3.2) son los resultados provenientes del uso de los datos tomados al realizar el ensayo en las ecuaciones descritas en el capítulo 2; estas variables permitirán realizar las diferentes colinas de rendimiento en la que se podrá apreciar el comportamiento del sistema de turbina Kaplan a las diferentes condiciones de estudios ensayadas.

Tabla 3.2 Formato para la presentación de las variables calculadas.

Velocidad	Alabes	Caudal	Altura Neta	Potencias	Rendimiento		
N	Rodete	Distribuidor	Q	H	P	Pa	ηl
(RPM)	ϕ (°)	X(’’)	(m3/s)	(m)	(W)	(W)	(%)

Luego de obtener las diferentes colinas de rendimientos para cada posición determinada de los alabes del rodete (ϕ). Se escoge un valor determinado de N, se traza la vertical, N= Ctte, y se leen en las diferentes colinas los valores máximos del rendimiento, (caracterizadas por valores distintos de ϕ), y en la intersección de la vertical, N = Ctte, con cuantos valores de Q se deseen, en cada caso, anotándose también el valor de ϕ de la colina respectiva y el valor de x con el que se obtiene dicho rendimiento.

Para cada valor de N se obtienen los tres tipos de curvas:

N total = f (Q); x = f (Q); ϕ = f (Q) para un mismo valor de N,

Para otros valores de N se trazan otras series de curvas de este tipo, y con estos datos se pueden trazar las curvas características universales de las turbinas Kaplan.

Para ello, en cada punto del plano (Q, N) se anotan valores de η, ϕ y x, obteniéndose el diagrama de la turbina trazando:

- Las isolíneas de igual rendimiento.
- Las isolíneas de ϕ = Cte, que son los valores del ángulo del rodete con los que se obtienen los rendimientos.

- Las isolineas de apertura, x = Cte.

Obteniéndose así un diagrama universal de la turbina Kaplan.

3.6 Metodología para la realización de las prácticas y el mantenimiento del sistema de turbinas Kaplan.

La metodología utilizada para las prácticas de los estudiantes en el sistema de turbina Kaplan fue la de un manual de prácticas hecho bajo la estructura de prácticas que actualmente se realizan en el laboratorio de hidráulica "Elías Sánchez Díaz" de la escuela de Ingeniería Civil de la universidad de Carabobo. En este manual se especifican los equipos que componen el sistema de turbina Kaplan como también dos tipos de pruebas en la cual los estudiantes podrán adquirir gran cantidad de conocimiento del sistema de estudio.

La metodología usada para el mantenimiento del sistema de turbina Kaplan fue el de formatos de actividades de mantenimiento preventivo para cada equipo que compone el sistema, realizados para ser aplicado semestralmente destinado a la conservación del sistema y garantizando su funcionamiento.

3) RESULTADOS: SE PROPONEN PROCEDIMEINTOS PARA FREALIZAR PRACTICAS CON EL SISTEMA DE TURBINA KA´´PLAN Y MANTENIMIENTO DEL SISTEMA.

3.7 Parámetros de operación de la turbina Kaplan.

Los parametros de operación de la turbina Kaplan han sido determinados a través de las ecuaciones definidas en el capítulo 2; otros parámetros fueron establecidos por medio de la observación directa sobre el sistema, esto permitió conocer los rangos de variación de la posición de los alabes tanto del distribuidor como el del rodete.

3.8 Diseño de Pruebas experimentales para el sistema de turbina Kaplan.

El diseño de las pruebas experimentales para el sistema de turbina Kaplan se llevaron a cabo a través de un diseño factorial multinivel donde se observó la influencia de los factores experimentales sobre las variables de respuestas. Las variables de respuestas se obtuvieron siguiendo la metodología de pruebas donde se fijan las combinaciones de los parámetros obtenidos del diseño factorial multinivel.

Las pruebas experimentales permitieron conocer los efectos de los factores en forma individual sobre las variables de respuesta a través de las gráficas de efecto principales. Y existencia o no de interacción entre los factores experimentales.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSION

4.1 RESULTADOS DE LA DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE LA TURBINA KAPLAN.

4.1.1 Parámetros Nominales de la Turbina Kaplan.

El sistema de turbina Kaplan presenta una placa donde se evidencia los parámetros nominales. Anexo 1. Estos parámetros nominales son:

Salto o altura hidráulica (H) = 10Ft.

Potencia al Freno (P) = 3,56HP.

Velocidad de giro (N) = 1070RPM.

4.1.2 Determinación de los rangos de variación de los caudales de operación de la Turbina Kaplan.

Para determinar el rango en que opera el caudal se hace uso de la Ecuación 2.1; donde se requiere establecer el rango de variación de presión ($\boldsymbol{\Delta P}$) de la placa orificio.

Rango de variación del piezómetro de la placa orificio.

El rango de variación del piezómetro de la placa orificio se observa desde un piezómetro compuesto de mercurio-agua; el cual está conectado en la entrada y a la salida de la placa orificio. El rango de diferencia de presión varía entre 0-12 in Hg.

Determinación del coeficiente de la placa orificio.

El coeficiente de la placa orificio se estima haciendo uso de la Ecuación 2.3.

- Relación de diámetros

Para la relación de diámetro se utiliza la Ecuación 2.4; donde d = 195 mm y Di = 3000 mm.

$$\beta = \frac{195mm}{300mm} = 0.65$$

- Número de Reynolds

Haciendo uso del caudal nominal de la bomba axial (Anexo 2): Q = 2100GPM = 0.1325m^3/s se calcula el número de Reynolds; donde ν es igual a 0.893.10-6 m2/s a una temperatura de 25 °C, D el diámetro de la tubería es 0.3 m (Ecuación 2.8).

$$Re = \frac{4 * (0.1325\ m^3/\mathrm{s}).}{\pi * (0.893 \cdot 10^{-6}\ \mathrm{m^2/s}) * (0.3\mathrm{m})} = 6.2972840 \cdot 10^5$$

- Coeficiente de descarga de la placa orificio.

El coeficiente de descarga de la placa orificio se obtiene desde la Ecuación 2.7; donde Re = $6.2972840 \cdot 10^5$, $L_1 = 1$, $L_2 = ½$ y $\beta = 0.65$.

$$Cd = 0{,}5959 + 0{,}0312(0.65)^{2{,}10} - 0{,}1840(0.65)^8 + \cdots$$

$$\ldots + 0{,}0029(0.65)^{2{,}5}\left(\frac{10^6}{6.2972840 \cdot 10^5}\right)^{0.75} + \frac{0{,}09(1)(0.65)^4}{(1-(0.65)^4)} - \ 0{,}0337\left(\frac{1}{2}\right)(0.65)^3$$

$$Cd = 0{,}62$$

El coeficiente de la placa se obtiene mediante la Ecuación 2.3; donde Cd = 0.62 y β = 0.65.

$$C = \frac{0{,}62}{\sqrt{1 - 0{,}65^4}} = 0{,}68$$

Estimación del área interna de la placa orifico.

El área interna de la placa orificio (Ao) se obtiene haciendo uso de la Ecuación 2.2; donde d = 0,195m.

$$Ao = \frac{\pi * (0.195m)^2}{4} = 0.0299m^2$$

Estimación de los caudales máximos y mínimos

Finalmente se calcula el caudal máximo y mínimo (Ecuación 2.1) usando el delta de presión máxima, mínima y el área interna de la placa orificio.

$$Q_{min} = 0{,}68 * (0.0299m^2) * \sqrt{\frac{2 * (0Pa)}{997.13\text{Kg/m3}}} = 0m^3/s$$

$$Q_{max} = 0{,}68 * (0.0299m^2) * \sqrt{\frac{2 * (40636{,}68Pa)}{\frac{997.13\text{Kg}}{\text{m3}}}} = \frac{0{,}18m^3}{s}$$

Tabla 4.1 Caudales de operación de la turbina.

Parámetro	Resultado	Unidad
Q_{min}	0	m^3/s
Q_{max}	0,18	m^3/s

4.1.3 Determinación de la altura neta de la turbina.

En lo que respecta a la altura neta de la turbina (H) no se puede expresar directamente los valores máximos y mínimos ya que este parámetro depende de las presiones registradas a la entrada y salida de la turbina (Ecuación 2.10); las cuales cambian bajo distintas condiciones de las variables independientes del sistema.

4.1.4 Determinación del rango de variación de velocidades de entrada y salida de la turbina.

La velocidad que experimenta el fluido al entrar y salir de la turbina se puede expresar mediante la Ecuación 2.9. Para esto se hace uso del caudal máximo y mínimo obtenidos y se calcula el área de entrada y salida de la turbina.

- Área de la tubería de entrada

El área de la tubería de entrada se estima mediante la Ecuación 2.2; dónde D = 0,381m.

$$Ae = \frac{\pi * (0.381\text{m})^2}{4} = 0{,}1140m^{\,2}$$

- Área de la tubería de entrada

El área de la tubería de salida se estima mediante la Ecuación 2.2; donde D = 0,203m.

$$As = \frac{\pi * (0.203\text{m})^2}{4} = 0{,}0324m^{\,2}$$

- Velocidad de entrada mínima a la turbina Kaplan

La velocidad de entrada mínima a la turbina Kaplan se estima mediante la Ecuación 2.9; donde $Q_{min} = 0m^3/s$ y $Ae = 0{,}1140m^2$.

$$Ve_{min} = \frac{0m^3/s}{0{,}1140m^{\,2}} = 0\text{m/s}$$

- Velocidad de entrada máxima a la turbina Kaplan

La velocidad de entrada máxima a la turbina Kaplan se estima mediante la Ecuación 2.9; donde Q_{max} = 0,18m^3/s y Ae = 0,1140m^2.

$$Ve_{max} = \frac{0{,}18 m^3/s}{0{,}1140 m^2} = 1{,}58 \text{m/s}$$

- Velocidad de salida mínima a la turbina Kaplan

La velocidad de salida mínima a la turbina Kaplan se estima mediante la Ecuación 2.9; donde Q_{min} = 0m^3/s y Ae = 0,0324m^2.

$$Vs_{min} = \frac{0\ m^3/s}{0{,}0324\ m^2} = 0 \text{m/s}$$

- Velocidad de salida máxima a la turbina Kaplan

La Velocidad de salida máxima a la turbina Kaplan se estima mediante la Ecuación 2.9; donde Q_{max} = 0,18m^3/s y Ae = 0,0324m^2.

$$Vs_{max} = \frac{0{,}18\ m^3/s}{0{,}0324\ \ m^2} = 5{,}56 \text{m/s}$$

Tabla 4.2 Velocidades de operación de la turbina

Parámetro	Resultado	Unidad
Ve_{min}	0	m/s
Ve_{max}	1,58	m/s
Vs_{min}	0	m/s
Vs_{max}	5,56	m/s

4.1.5 Fijación de la variación de la velocidad angular del eje de la Turbina Kaplan.

En la fijación de la variación angular del eje de la Turbina Kaplan es necesario considerar el rango de variación de la velocidad angular y el punto nominal de operación dados por el fabricante, como se muestra en la Tabla 4.3. En esta tabla se observa que el rango de variación de la velocidad angular según el fabricante es de 0 a 1000 RPM, el punto nominal de operación es de 1070 RPM.

Tabla 4.3 Rango de velocidad angular de la Turbina Kaplan

Criterios de Referencia	**Velocidad Angular (RPM)**
Rango de variación de la velocidad angular según el fabricante	0 - 1000
Velocidad Angular Nominal dada por el fabricante	1070

De lo observado en la Tabla 4.3, se estableció el rango de velocidad angular de prueba de la turbina Kaplan desde 0 a 1200 RPM (Tabla 4.4). En este aspecto, se puede observar que el límite superior da la velocidad angular ha sido extendido hasta 1200 RPM para explorar la operación de la turbina Kaplan hasta ese punto e incrementar el conocimiento en ese límite.

Tabla 4.4 Rango de prueba de la velocidad angular de la Turbina Kaplan

Fijación del Rango de Prueba	**Velocidad Angular (RPM)**
Rango de prueba de la Velocidad Angular	0-1200

El panel de control destinado a varía la velocidad del motor de la bomba presenta 8 posiciones. Para las pruebas se probó las posiciones de manera creciente buscando la que cumpliera con el rango de velocidades de estudio para cada apertura de ambos alabes (distribuidor y rodete), al alcanzar la 6ta posición el sistema presenta fuerte vibraciones y se observa la presencia de burbujas de aire en los alabes de la bomba; por seguridad se estableció el ensayo de las pruebas en la 5ta posición.

4.1.6 Fijación de la variación del ángulo del distribuidor de la turbina.

La turbina cuenta con ángulos orientables en el distribuidor. Estos ángulos pueden ser variados desde 1 in hasta 2 in en incrementos de 1/8in.

4.1.7 Fijación de la variación del ángulo del distribuidor de la turbina.

Los ángulos del rodete pueden ser ajustados desde -5º hasta 35º. Puede ser ajustados en incremento de 5º.

4.1.8 Fijación de la del sistema dinamométrico de la turbina.

Se cuenta con un dinamómetro que presenta un rango de trabajo de 0 hasta 200 kg.

4.1.9 Fijación del sistema de pesas de la turbina.

El sistema de pesas presenta disponibilidad de nueve tipos de pesas (Tabla 4.5) las cuales se aprecian: 2 de 1Lb, 2 de 2Lb, 1 de 4Lb, 2 de 10Lb y 2 de 40Lb. Al cargar el sistema de pesas usando las pesas descrita se determina que el sistema tiene un rango de trabajo de 0 a 110Lb.

Tabla 4.5 Pesas del sistema de Turbina Kaplan.

Cantidad	Peso	Unidad
2	1	Lb
2	2	Lb
1	4	Lb
2	10	Lb
2	40	Lb

4.1.10 Fijación del rango de presiones de la turbina.

Para la obtención de los parámetros de presiones el sistema cuenta con dos manómetros con glicerina ubicados en la entrada de la turbina y a la salida de la bomba, estos manómetros son idénticos y presentan un rango de trabajo 0 a 15Psi. También posee dos mano-vacuometros con glicerina ubicados en la salida de la turbina y entrada de la bomba los cuales poseen un rango de trabajo de -30 a 30psi.

Tabla 4.6 Presiones de operación de la turbina.

Instrumento	Rango	Unidad
Manómetro en la entrada de la turbina	0 a 15	Psi
Mano-vacuometro en la salida de la turbina	-30 a 30	Psi
Manómetro en la salida de la bomba	0 a 15	Psi
Mano-vacuometro en la entrada de la bomba	-30 a 30	Psi

4.1.11 Fijación del rango de eficiencia de la turbina.

La eficiencia (Ecuación 2.11) es una variable que depende directamente de las condiciones que presente la potencia hidráulica (Pa) y la Potencia al freno (P). Esta se puede establecerse en rango de 0 a 100%

4.1.12 Determinación de la potencia de la turbina.

Las potencias están ubicadas en el grupo de variables dependientes por tal motivo no se puede definir valores máximos y mínimos; debido a que la potencia hidráulica (ecuación 2.12) varía al presentarse distintos valores del caudal y de la altura neta a su vez la potencia al freno (Ecuación 2.13) depende directamente del torque que se genera en la turbina la cual se obtiene a través de la acción del freno que interactúa con el sistema dinamométrico y el sistema de pesas.

Finalmente se expresan todo los parámetros de operación de la turbina Kaplan (tabla 4.5).

Tabla 4.7 Parámetros de operación del sistema de turbina Kaplan.

Parámetros	**Rango de trabajo**	**Unidades**
Caudal (Q)	0 a 0,18	m^3/s
Velocidad angular (N)	0 a 1200	RPM
Velocidad de entrada (Ve)	0 a 1,58	m/s
Velocidad de salida (Vs)	0 a 5,56	m/s
Área interna de la placa orificio (Ao)	0,0299	m^2
Área interna de la tubería de entrada (Ae)	0,1140	m^2
Área interna de la tubería de salida (As)	0,0324	m^2
Presiones de entrada de la turbina (Pe_{Turb})	0 a 15	Psi
Presiones de salida de la turbina (Ps_{Turb})	-30 a 30	Psi
Presiones de entrada a la bomba (Pe_B)	0 a 15	Psi
Presiones de salida a la bomba (Ps_B)	-30 a 30	Psi
Eficiencia (η)	0 a 100	%
Sistema Dinamométrico (D)	0 a 200	kg
Sistema de Pesas (F)	0 a 110	Lb
Apertura de los alabes del distribuidor (X)	1 a 2	In
Apertura de los alabes del Rodete (ϕ)	-5 a 35	Grados

4.2 RESULTADO DEL DISEÑO DE PRUEBAS EXPERIMENTALES PARA EL SISTEMA DE TURBINA KAPLAN.

El diseño de pruebas experimentales para el sistema de Turbina Kaplan es un diseño factorial multinivel donde se cuenta con tres factores experimentales y cinco variables de respuestas.

Los factores experimentales (Tabla 4.8) están comprendido por el ángulo de apertura de los alabes del distribuidor que está definido por nueve niveles los cuales son 1 in, 1 1/8 in, 1 1/4 in, 1 3/8 in, 1 1/2 in, 1 5/8 in, 1 3/4 in, 1 7/8 in, 2 in; el ángulo de posición de los alabes del rodete que posee nueve niveles que son -5°, 0°, 5°, 10°, 15°, 20°, 25°, 30°, 35° y la velocidad de giro del eje de la turbina Kaplan presentando seis niveles de estudios que son 200 RPM, 400 RPM, 600 RPM, 800 RPM, 1000 RPM y 1200 RPM.

Tabla 4.8 Factores experimentales del diseño de pruebas experimentales.

Factores experimentales	Cantidad de Niveles	Niveles	Unidad
Ángulo de posición de los alabes del distribuidor (X)	9	1, 1 1/8, 1 1/4, 1 3/8, 1 1/2, 1 5/8, 1 3/4, 1 7/8, 2	in
Ángulo de posición de los alabes del rodete (ϕ)	9	-5, 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35	°
Velocidad de giro del eje de la turbina Kaplan (N)	6	200, 400, 600, 800, 1000, 1200	RPM

Las variables de respuestas son observadas en la Tabla 4.9; estas variables de respuestas son la altura neta, el caudal, la potencia al freno, la potencia hidráulica y la eficiencia.

Tabla 4.9 Variables de respuestas del diseño de pruebas experimentales.

Variables de Respuestas	Unidad
Caudal (Q)	m^3/s
Altura neta (H)	m
Potencia al freno (Pa)	W
Potencia Hidráulica (P)	W
Eficiencia (Π)	%

4.2.1 Efectos Principales.

Los efectos principales de los factores se presentan desde la Figura 4.1 hasta 4.5; donde se observa el efecto debido a la acción individual de cada factor experimental sobre las respuestas.

Efectos principales para el caudal

En los efectos principales para el caudal (Figura 4.1); se obtiene como resultado que el ángulo de posición de los alabes del distribuidor presenta mayor efecto en la variable de respuesta que los factores de ángulo de posición de los alabes del rodete y la velocidad de giro del eje de la turbina.

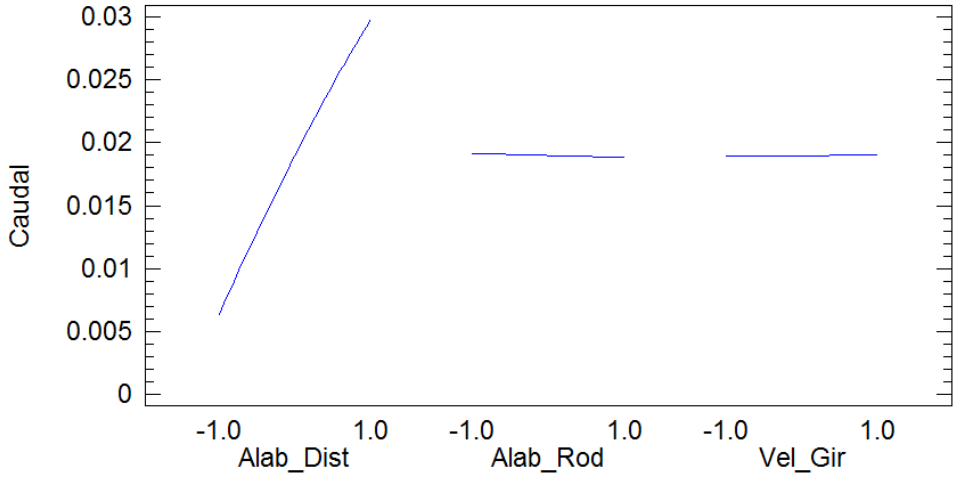


Figura 4.1 Grafica de efectos principales para el caudal.

Efectos principales para la altura.

En los efectos principales para la altura (Figura 4.2); se obtiene como resultado que el ángulo de posición de los alabes del distribuidor presenta mayor efecto en la variable de respuesta que los factores de ángulo de posición de los alabes del rodete y la velocidad de giro del eje de la turbina.

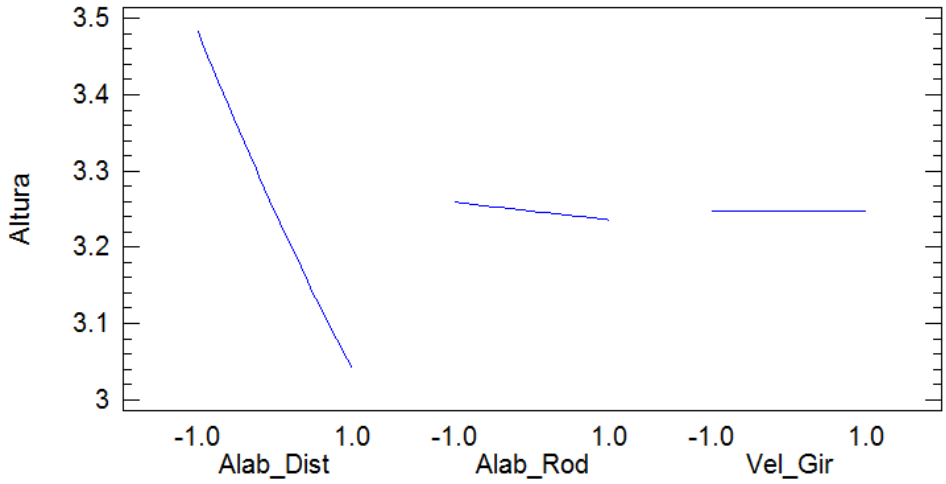


Figura 4.2 Grafica de efectos principales para la altura.

Efectos principales para la eficiencia.

En los efectos principales para la eficiencia (Figura 4.3); se obtiene como resultado que el ángulo de posición de los alabes del distribuidor presenta mayor efecto en la variable de respuesta que los factores de ángulo de posición de los alabes del rodete y la velocidad de giro del eje de la turbina.

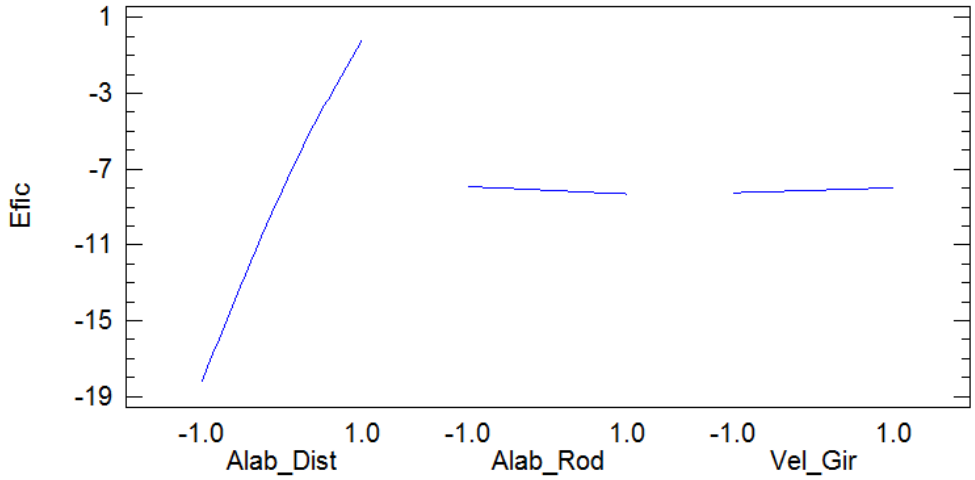


Figura 4.3 Grafica de efectos principales para la eficiencia.

Efectos principales para la potencia hidráulica.

En los efectos principales para la eficiencia (Figura 4.4); se obtiene como resultado que el ángulo de posición de los alabes del distribuidor presenta mayor efecto en la variable de respuesta que los factores de ángulo de posición de los alabes del rodete y la velocidad de giro del eje de la turbina.

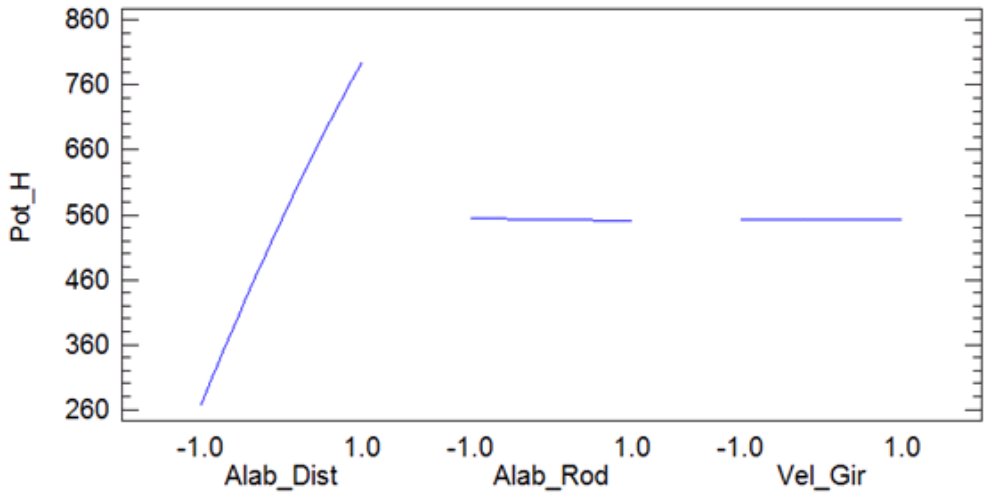


Figura 4.4 Grafica de efectos principales para la potencia hidráulica.

Efectos principales para la potencia al freno.

En los efectos principales para la eficiencia (Figura 4.5); se obtiene como resultado que el ángulo de posición de los alabes del distribuidor presenta mayor efecto en la variable de respuesta que los factores de ángulo de posición de los alabes del rodete y la velocidad de giro del eje de la turbina.

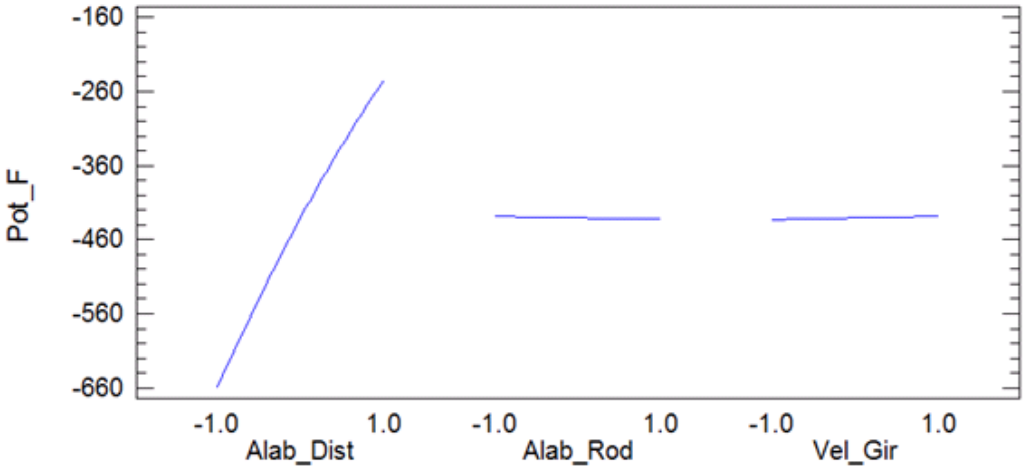


Figura 4.5 Grafica de efectos principales para la potencia al freno.

4.2.2 Efectos de Interacción

Los efectos de interacción de los factores experimentales se presentan desde la Figura 4.6 hasta 4.10; donde se evidencia el efecto de interacción sobre las variables de respuestas.

La interacción de los factores experimentales están representados por letras mayúsculas donde: AB representa la interacción del ángulo de posición de los alabes del distribuidor con el ángulo de posición de los alabes del rodete, AC representa la interacción del ángulo de posición de los alabes del distribuidor con la velocidad de giro del eje de la turbina Kaplan y BC representa la interacción del ángulo de posición de los alabes del rodete con la velocidad de giro del eje de la turbina Kaplan

Efecto de interacción para el caudal.

En los estudios de los efectos de interacción para el caudal (Figura 4.6); se obtiene como resultado que no hay efecto de interacción entre ningún factor experimental ya que se puede apreciar que el efecto de los factores AB no depende del nivel donde esté C ocurriendo lo mismo para factores AC con B y BC con A.

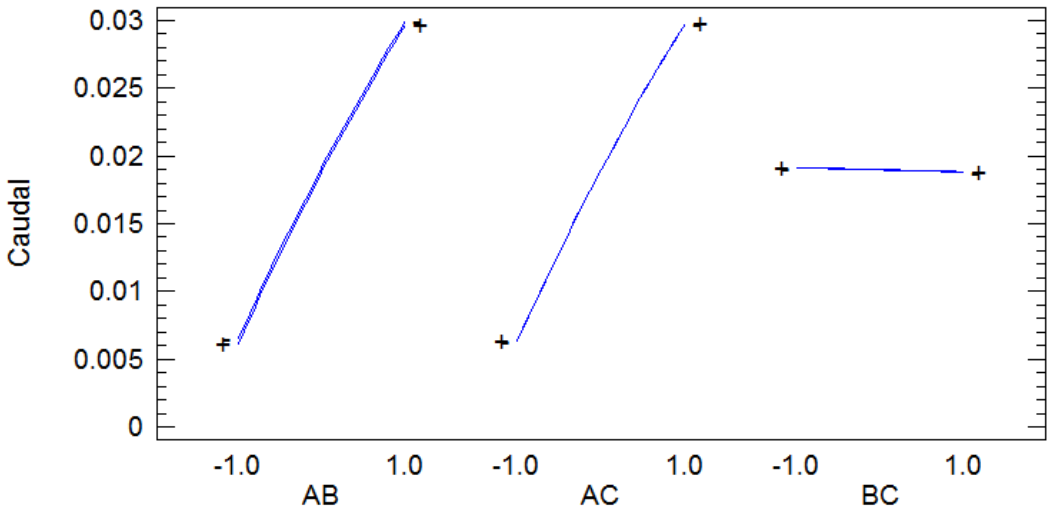


Figura 4.6 Grafica de interacción para el caudal.

Efecto de interacción para la altura.

En los estudios de los efectos de interacción para el caudal (Figura 4.7); se obtiene como resultado que no hay efecto de interacción entre ningún factor experimental ya que se puede apreciar que el efecto de los factores AB no depende del nivel donde esté C ocurriendo lo mismo para factores AC con B y BC con A.

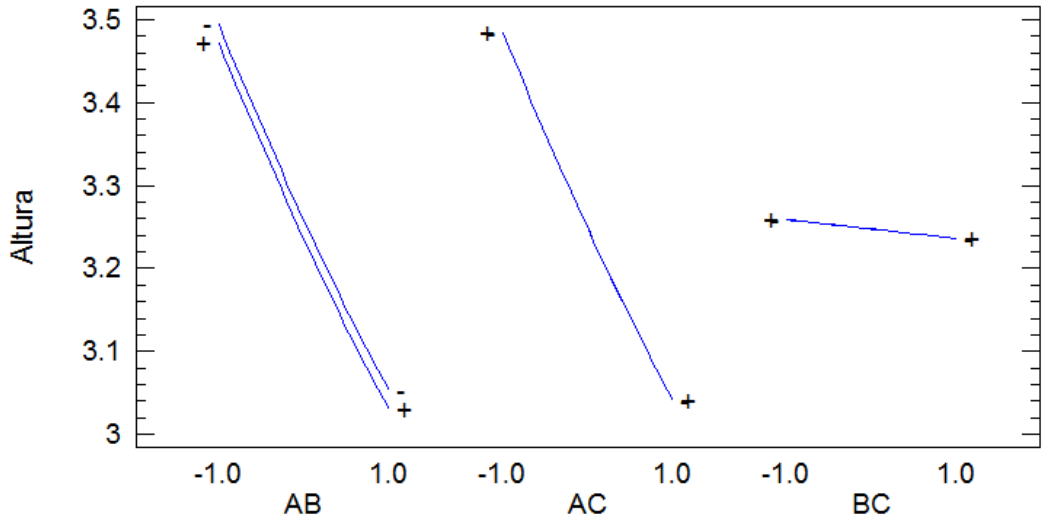


Figura 4.7 Grafica de interacción para la altura.

Efecto de interacción para la eficiencia.

En los estudios de los efectos de interacción para el caudal (Figura 4.8); se obtiene como resultado que no hay efecto de interacción entre ningún factor experimental ya que se puede apreciar que el efecto de los factores AB no depende del nivel donde esté C ocurriendo lo mismo para factores AC con B y BC con A.

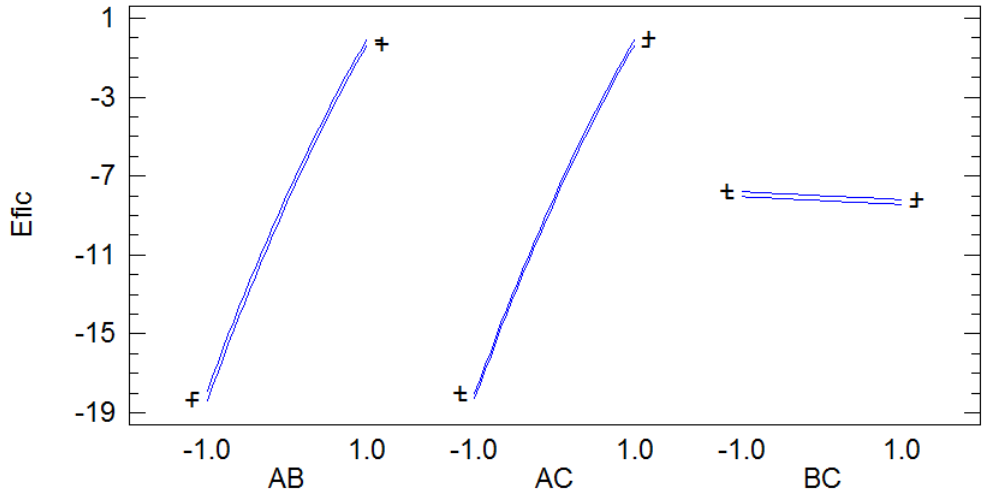


Figura 4.8 Grafica de interacción para la eficiencia.

Efecto de interacción para la potencia hidráulica.

En los estudios de los efectos de interacción para el caudal (Figura 4.9); se obtiene como resultado que no hay efecto de interacción entre ningún factor experimental ya que se puede

apreciar que el efecto de los factores AB no depende del nivel donde esté C ocurriendo lo mismo para factores AC con B y BC con A.

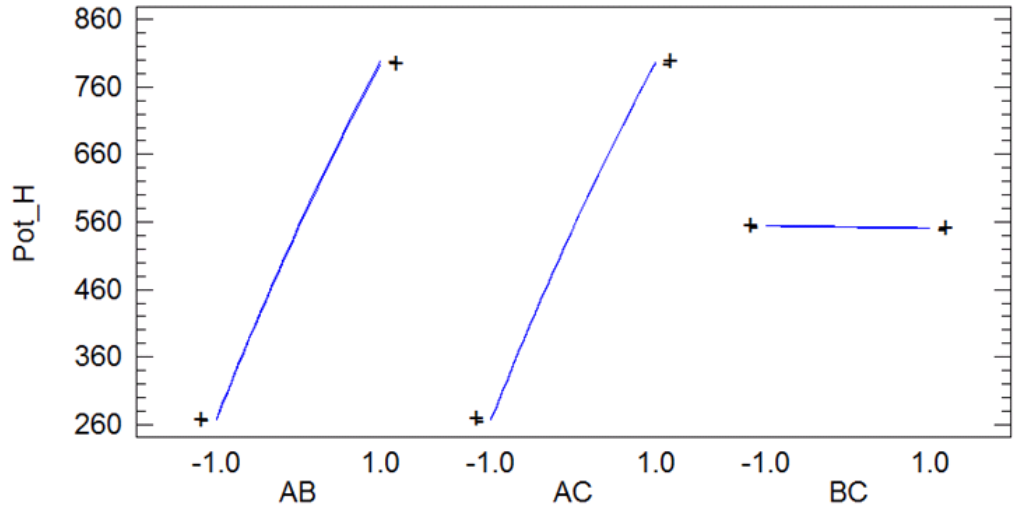


Figura 4.9 Grafica de interacción para la potencia hidráulica.

Efecto de interacción para la potencia al freno.

En los estudios de los efectos de interacción para el caudal (Figura 4.10); se obtiene como resultado que no hay efecto de interacción entre ningún factor experimental ya que se puede apreciar que el efecto de los factores AB no depende del nivel donde esté C ocurriendo lo mismo para factores AC con B y BC con A.

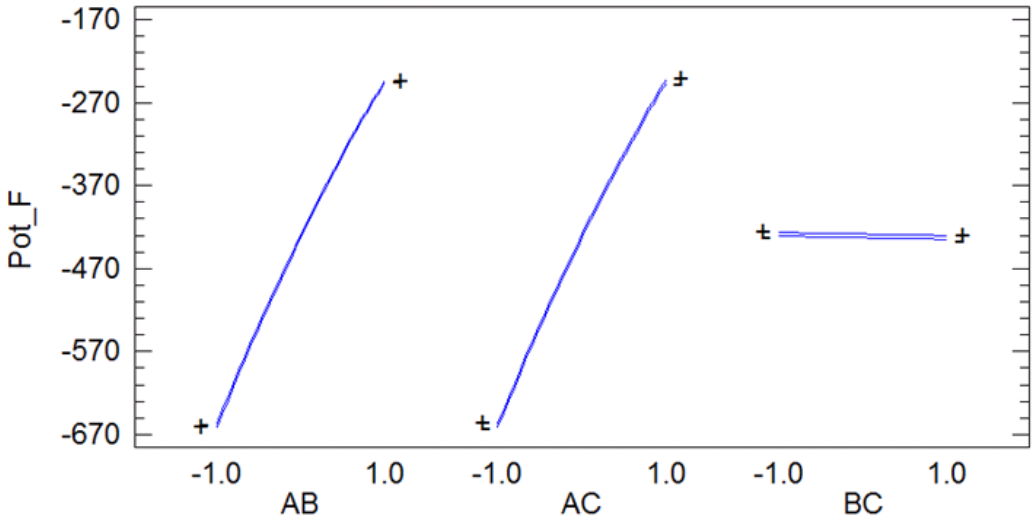


Figura 4.10 Grafica de interacción para la potencia al freno.

4.3 RESULTADOS DE LA ELABORACIÓN DE LAS CURVAS DE FUNCIONAMIENTO PARA LA REPRESENTACIÓN DE LAS VARIABLES DE SALIDA DEL SISTEMA DE TURBINA KAPLAN.

Las curvas de funcionamiento de la Turbina Kaplan donde se representan las variables de salida del sistema (desde la Figura 4.11 hasta la Figura 4.20) fueron obtenidas al aplicar el diseño de las pruebas experimentales, en estas curvas se aprecia el comportamiento del sistema de Turbina Kaplan a distintas condiciones de ensayo.

En las figuras 4.11 y 4. 17 representan las curvas características de la turbina Kaplan para ángulos de apertura de los alabes del rodete de -5º y 25º respectivamente, en éstas se pueden observar que cuentan con rendimientos de hasta 65% pero a -5º las colinas de rendimiento a menor de 1200 RPM llegan a un ángulo del distribuidor de 2in a diferencia de una apertura de 25º a la misma velocidad de giro del eje de la turbina los rendimientos son menores a una apertura del distribuidor de 1 $^{1}/_{2}$ in. A 25º el sistema funciona más eficiente que con una apertura de -5º a menores grados de apertura del distribuidor.

En la figura 4.12 que representa las curvas a un ángulo de 0º se obtuvieron colinas hasta los 95% de rendimiento que a 1200 RPM estos rendimientos varían entre ángulos de apertura del distribuidor de 1 $^{3}/_{4}$ in y 1 $^{1}/_{4}$ in las cuales se manejan caudales entre 900GPM y 1300GPM en cambio con un ángulo del rodete de 30º (figura 4.18) los rendimientos también llegan hasta los 95% pero a 1200 RPM y menores se aprecia que las colinas de rendimiento están entre 2 in y 1 $^{1}/_{2}$ in y estos rendimientos están comprendidos entre 1250GPM y 1600GPM. Gráficamente se observa que a menores ángulos del distribuidor a 0º es más eficiente el sistema que con un ángulo de 30º.

Las curvas con ángulos de apertura del rodete de 10º (figura 4.14), 15º (figura 4.15) y 20º (figura 4.16) cuentan con colinas de rendimiento de hasta 80%, las curvas a 10º y 15º tienen colinas muy parecidas pero la diferencia más notable la poseen en la curva de 80% de rendimiento ya que se pudo observar que a menores caudales de 1200 GPM a 15º no se obtiene este rendimiento en cambio a 10º varía entre 1300 GPM y 1100 GPM pudiéndose observar gráficamente como cierra la curva debido a que los valores a este rendimiento no

llegan a la línea con una apertura del ángulo del distribuidor de 2in. Cabe destacar que a mayores velocidades de giro y menores apertura del distribuidor el sistema con una apertura de 20º es más eficiente que con aperturas de 10º y 15º.

Al analizar las curvas a 5º de apertura del rodete (figura 4.13) se observa que las colinas de rendimiento que se graficaron todas parten y terminan a una apertura de 2in del distribuidor, a diferencia de las curvas a 35º (figura 4.19) que todas las colinas de rendimiento q se estudiaron a una velocidad de 1200RPM gráficamente se observa que no llegan a 1 $^{3}/_{4}$ in, por esto se concluye que a 35º es sistema se comporta más eficientemente que con una apertura de 5º.

Luego de haber obtenido todas las curvas representas en las figuras desde la 4.11 a la 4.19 se procedió a graficar la curva universal de la turbina Kaplan representada en la figura 4.20, en esta curva se aprecian los distintos ángulos de apertura del rodete y distribuidor además de las colinas de rendimiento.

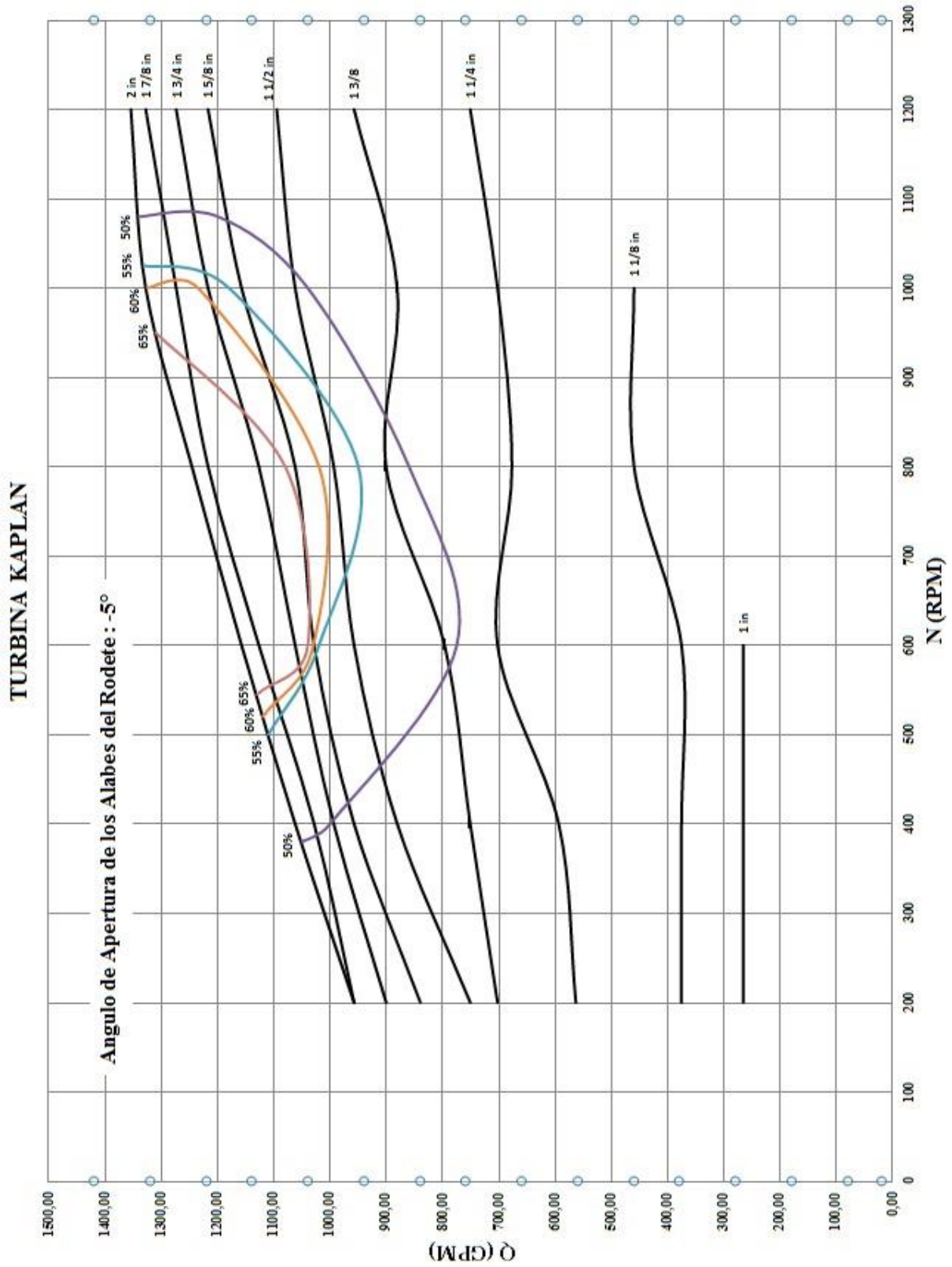


Figura 4.11 Curva Característica de la Turbina Kaplan para un ángulo de posición de los alabes del rodete de -5º.

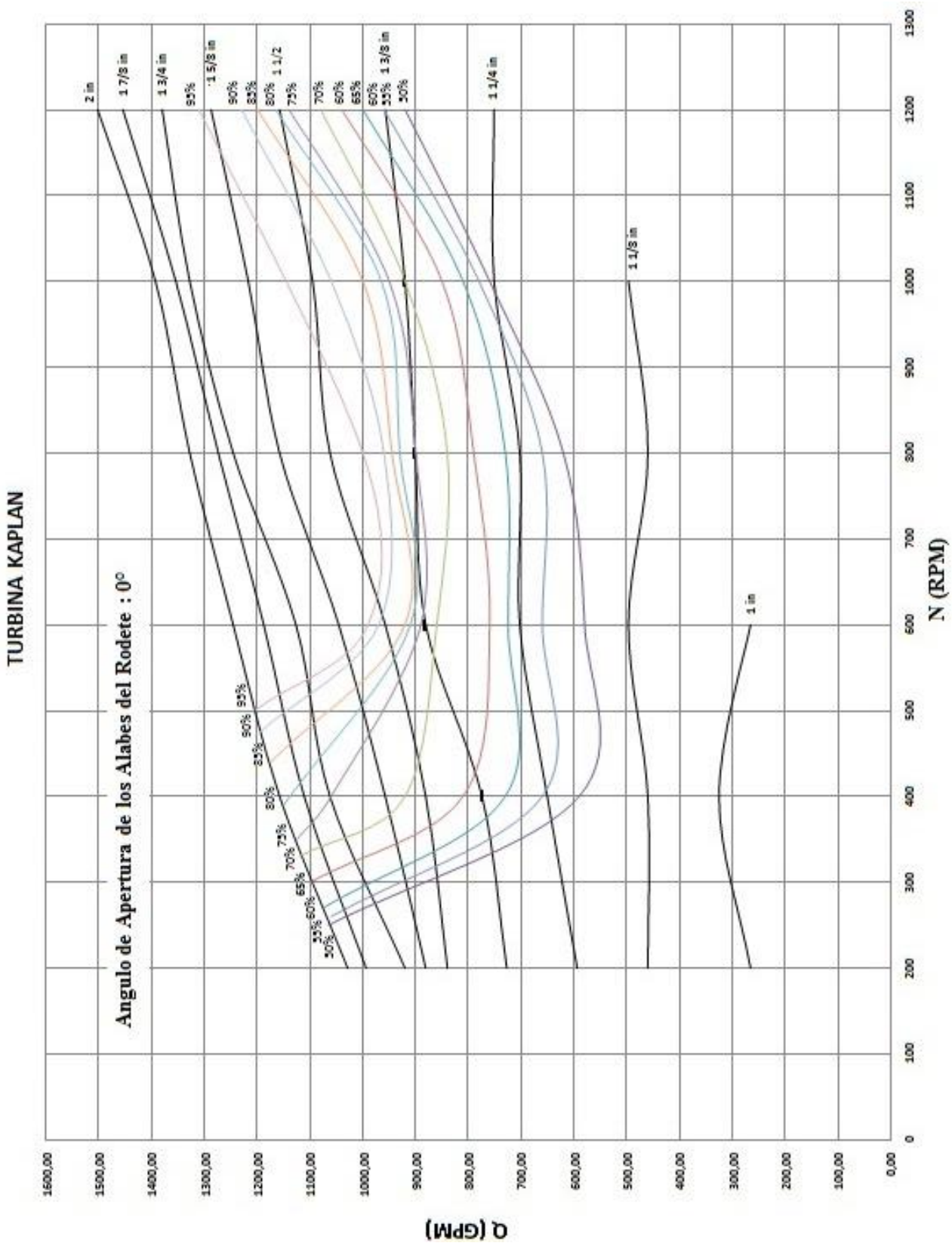


Figura 4.12 Curva Característica de la Turbina Kaplan para un ángulo de posición de los alabes del rodete de 0º

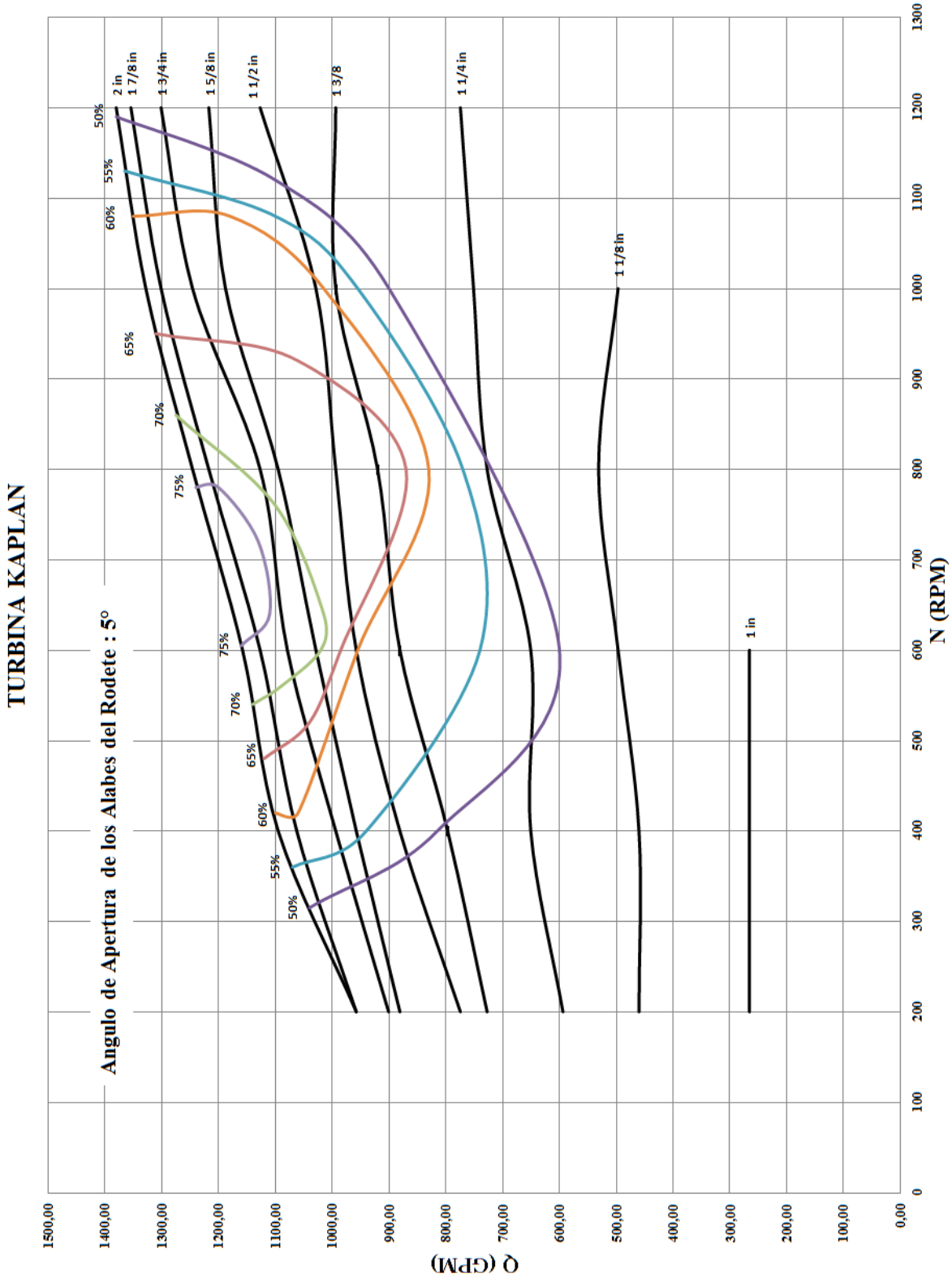


Figura 4.13 Curva Característica de la Turbina Kaplan para un ángulo de posición de los alabes del rodete de 5°

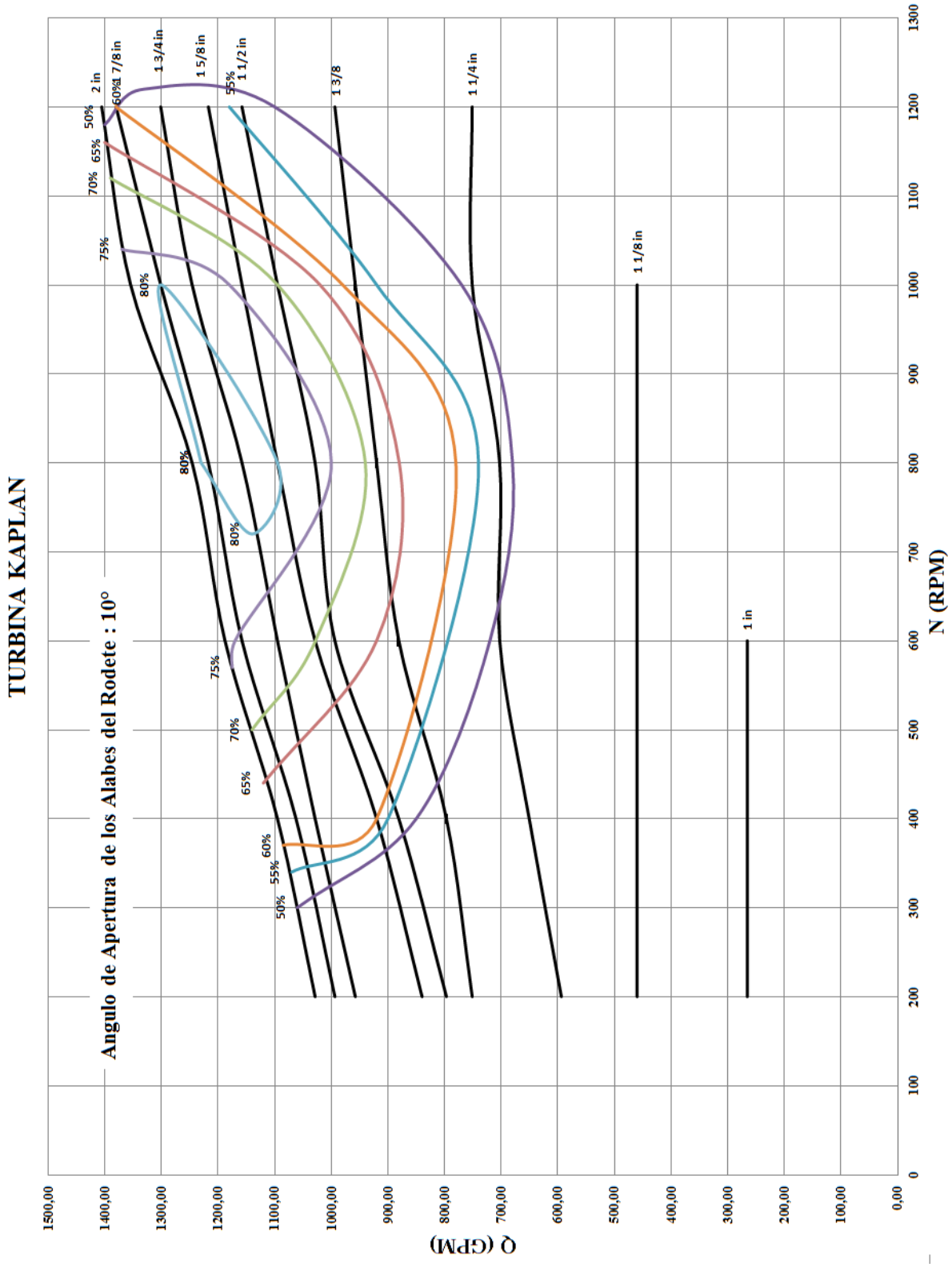


Figura 4.14 Curva Característica de la Turbina Kaplan para un ángulo de posición de los alabes del rodete de 10º

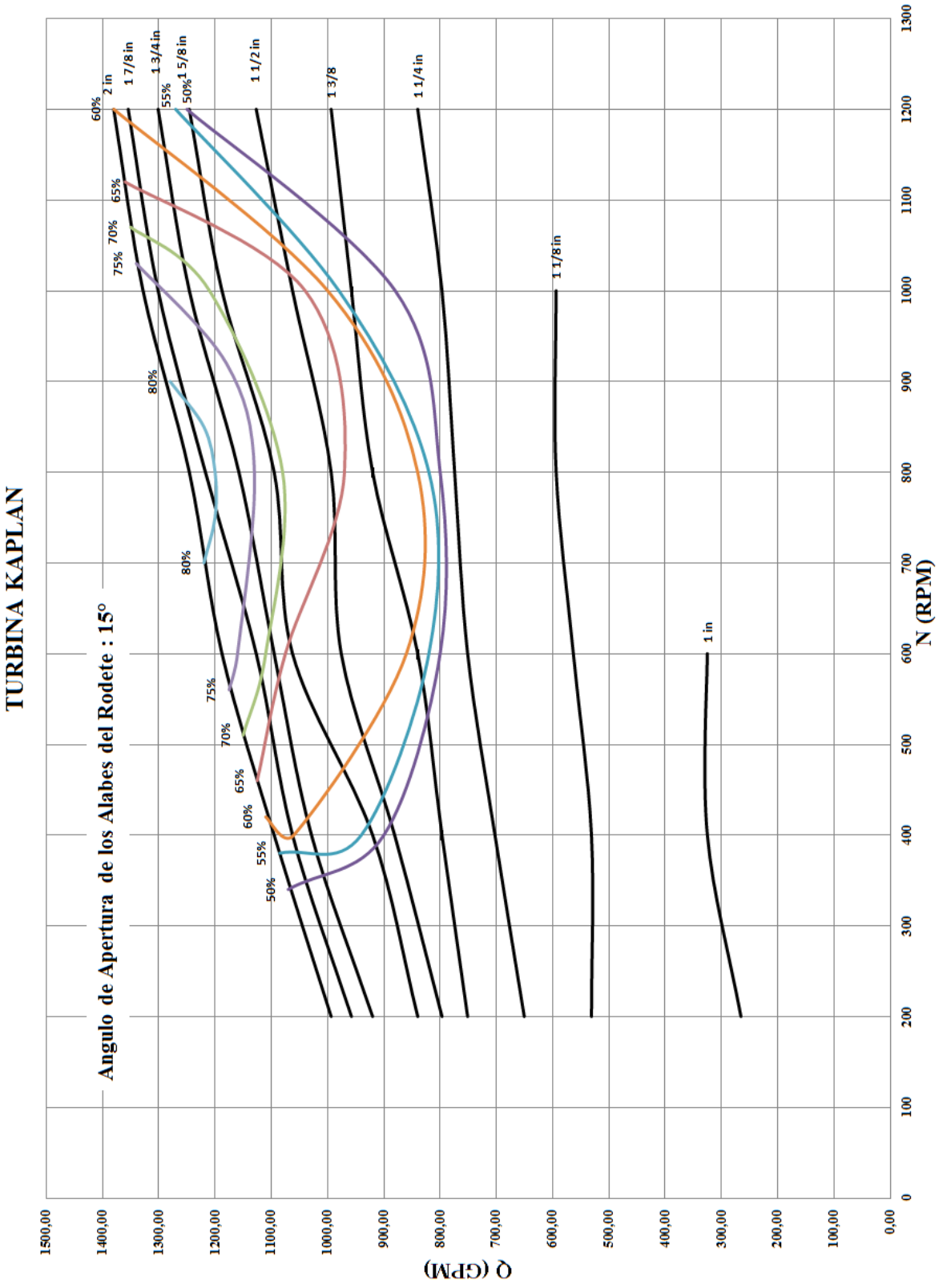


Figura 4.15 Curva Característica de la Turbina Kaplan para un ángulo de posición de los alabes del rodete de 15º

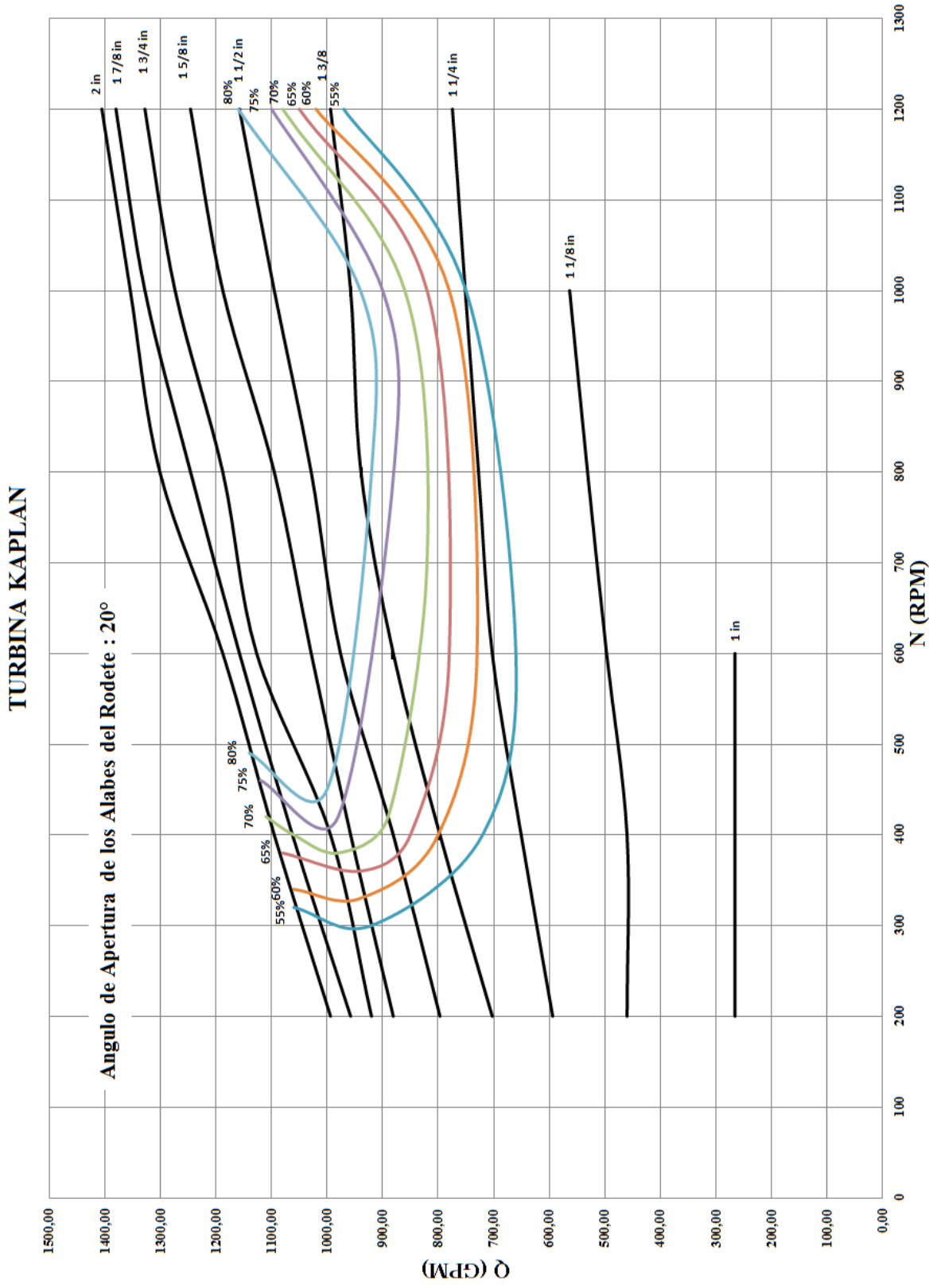


Figura 4.16 Curva Característica de la Turbina Kaplan para un ángulo de posición de los alabes del rodete de 20º

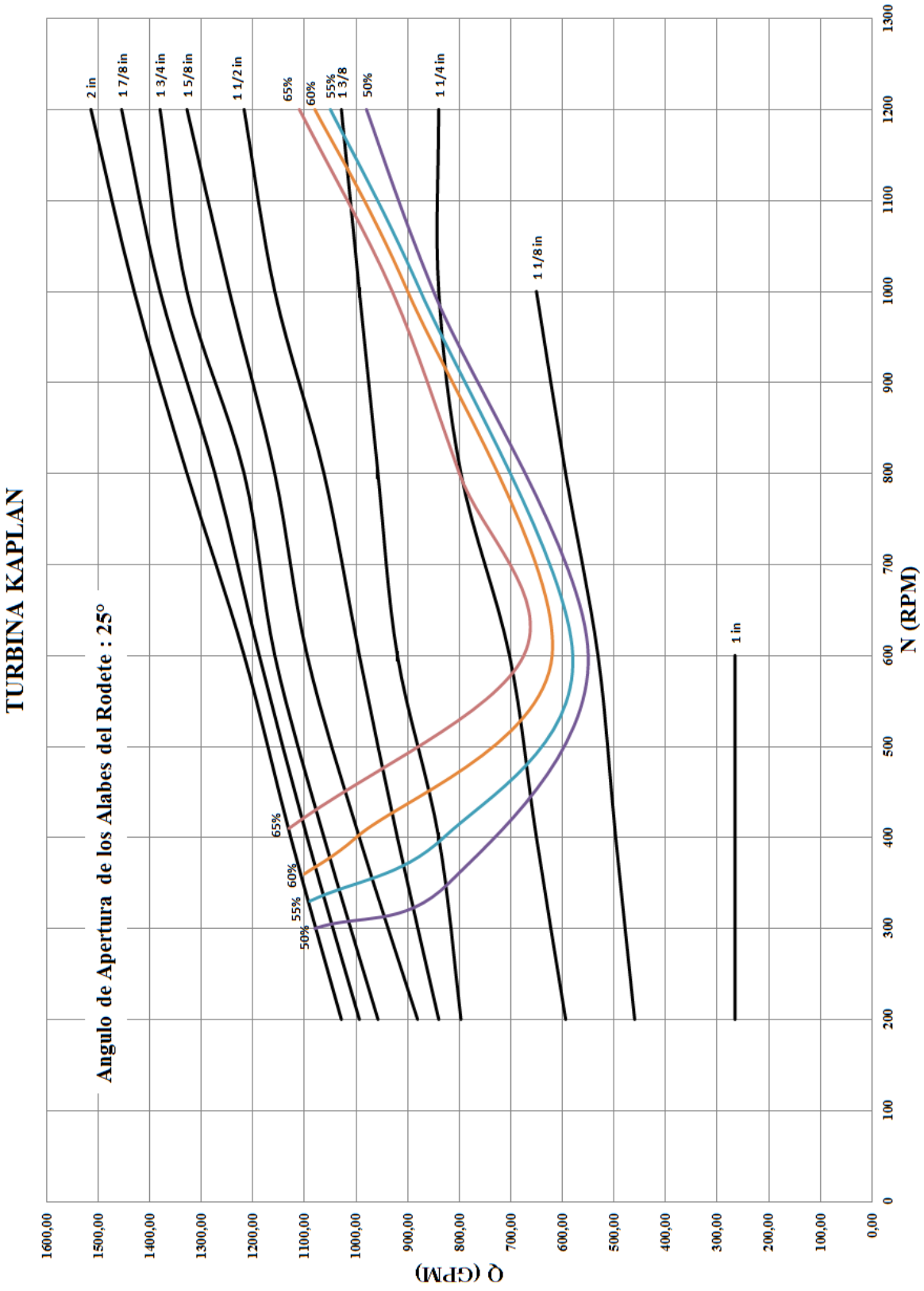


Figura 4.17 Curva Característica de la Turbina Kaplan para un ángulo de posición de los alabes del rodete de 25º

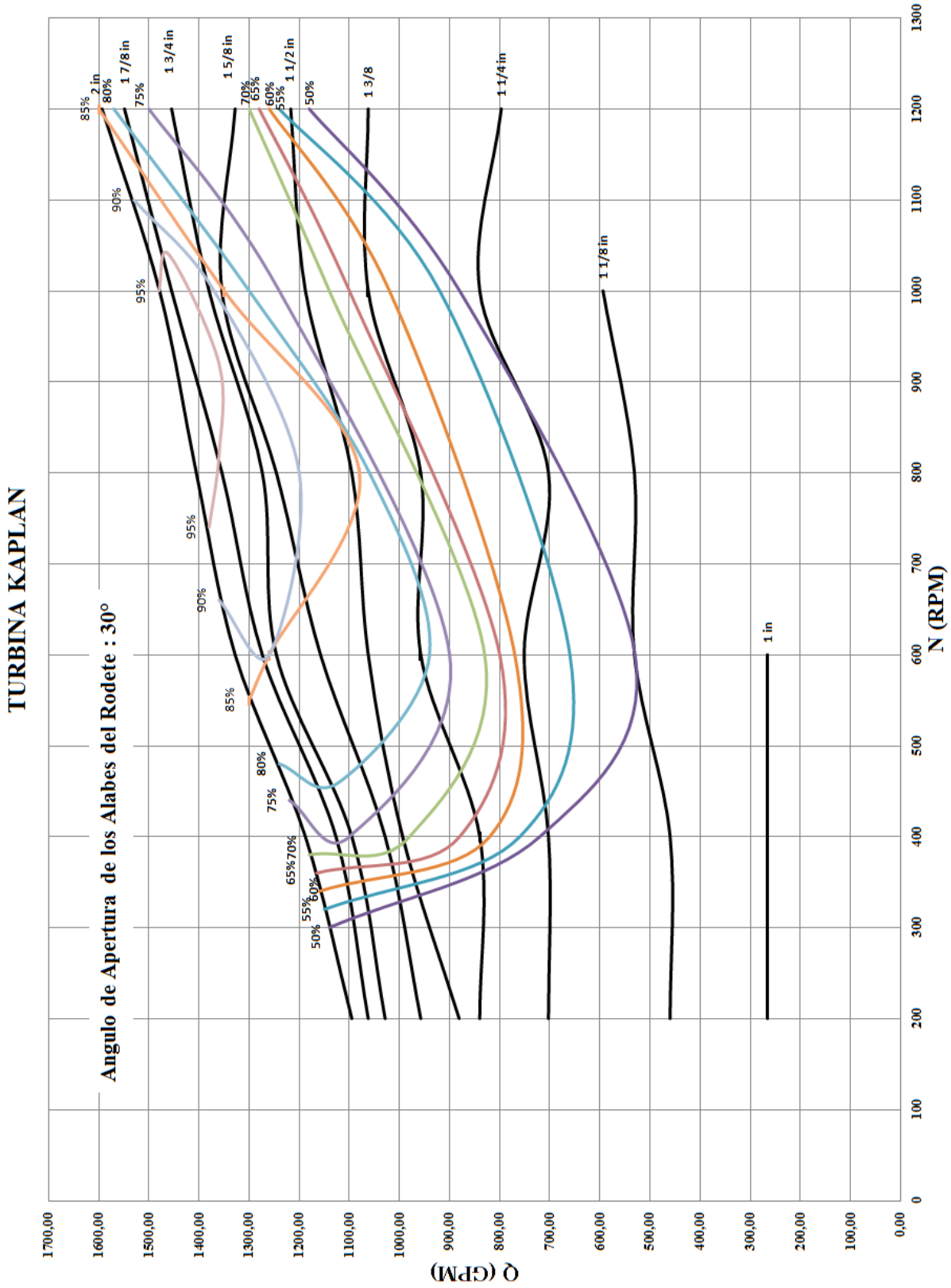


Figura 4.18 Curva Característica de la Turbina Kaplan para un ángulo de posición de los alabes del rodete de 30º

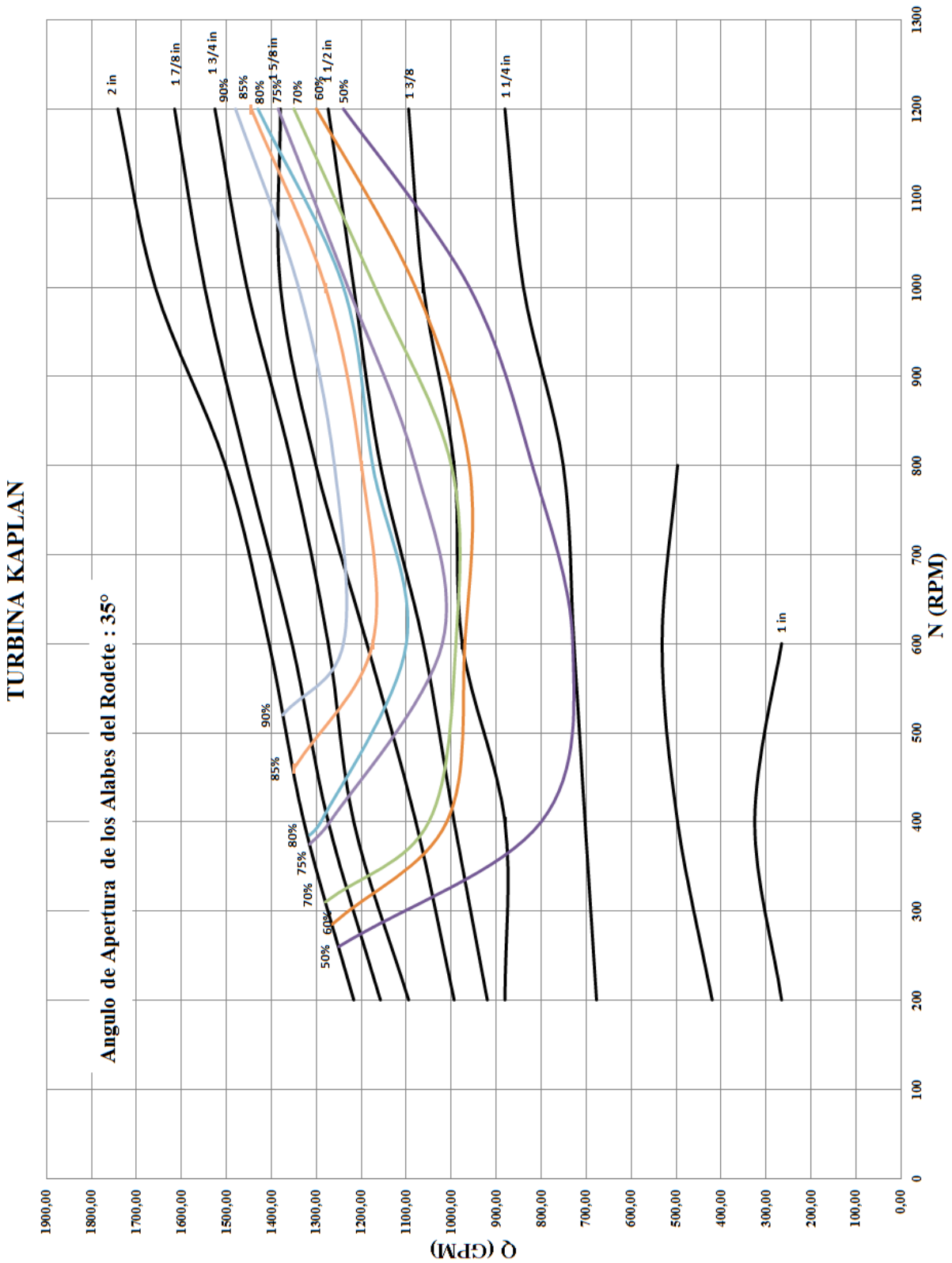


Figura 4.19 Curva Característica de la Turbina Kaplan para un ángulo de posición de los alabes del rodete de 35º

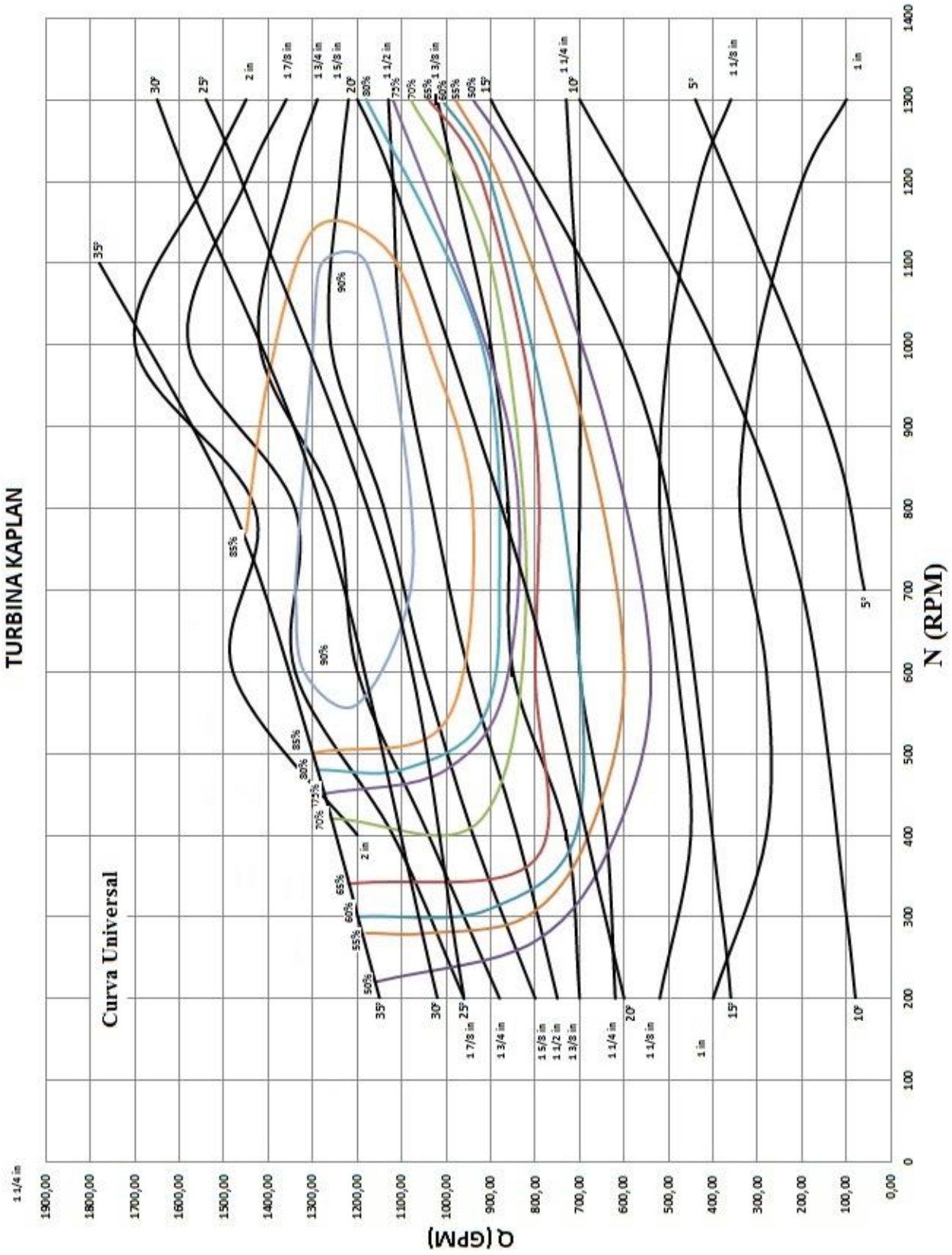


Figura 4.20 Curva Universal de la Turbina Kaplan.

4.4 RESULTADO DE LA METODOLOGÍA PARA LA REALIZACIÓN DE LAS PRÁCTICAS DEL SISTEMA DE TURBINA KAPLAN.

PRACTICA: Curvas características del sistema de turbina Kaplan.

OBJETIVO: Comprender el comportamiento de las variables fundamentales que describen el funcionamiento del sistema de turbina Kaplan (Carga, Caudal y Potencia, entre otras).

Introducción:

La turbina Kaplan es un turbina de reacción y su flujo es completamente axial, es una turbina de hélice con álabes ajustables de manera que la incidencia del agua en el borde de ataque del álabe de prueba pueda producirse en las condiciones de máxima acción, cualesquiera que sean los requisitos de caudal o de carga se logra así mantener un rendimiento elevado a diferentes valores de la potencia.

La turbina Kaplan presenta dos órganos reguladores de caudal (álabes móviles del distribuidor y álabes móviles del rodete), al realizar una serie de combinaciones de apertura de los órganos reguladores en conjunto con la variación de velocidad del sistema se obtuvo las distintas variables como caudal, disponibilidad, potencias y los puntos de rendimiento (eficiencia) en los que trabaja la turbina.

Turbina Kaplan

Para el Conocer la cantidad de flujo con la cual está operando el sistema se utiliza una placa con orificio concéntrico, ubicado a 2,15 m de la entrada de la turbina Kaplan. Esta placa es el elemento principal para la medición de flujo, por medio de las lecturas de presión diferenciales permite determinar el caudal. Esto se obtiene a través de un piezómetro diferencial Hg-H_2o que se encuentran ubicado en tomas conectada en la parte anterior y posterior de la placa que captan esta presión diferencial. Para el cálculo se hará uso de las ecuaciones descritas en el Capítulo 2.

EQUIPO DE LABORATORIO

El sistema de turbina Kaplan cuenta una serie componentes (Tabla 4.10) usados para el estudio del comportamiento del sistema

Tabla 4.10 Descripción del equipo del laboratorio.

Equipo	Uso
Manómetros ubicados en la entrada de la turbina y salida de la bomba	Medición de Presiones en esos puntos
Mano-Vacuometros ubicado en la salida de la turbina y entrada de la bomba	Medición de Presiones en esos puntos
Piezómetro de Hg-H_2O	Registrar el delta de presión en la placa orificio
Dinamómetro	Medir la fuerza que genera la turbina
Pesas	Simular carga al sistema
Tacómetro digital	Registrar la velocidad de giro del eje de la turbina
Válvula de refrigeración	Refrigerar el eje de la turbina
Freno prony	Para regular la velocidad de la turbina
Válvula de llenado	Para llenar el sistema con agua.
Controles del motor	Variar la velocidad del motor de la bomba

PROCEDIMIENTO:

Prueba A.

a) Verificar que el nivel del tanque de compensación contenga un nivel de agua por encima de la turbina; De no contar con el nivel de agua requerido proceder a llenarlo dando apertura a la válvula de alimentación externa hasta alcanzar el nivel de flujo deseado. Cerrar la válvula.

b) Verificar que la turbina no posea pesas en sus sistema (de tener pesas proceder a quitarlas), colocar el ángulo de los alabes del rodete en 35° esto se ajusta con la contratuerca y los alabes del distribuidor en posición de 1’’.

c) Energizar el sistema: para esto se sube el breakear en el panel de control del motor de la bomba, se gira la perilla a la posición de encendido y se verifica que velocidad del motor este en la 1era posición. Luego se procede al encendido mediante el botón de start.

d) En la balanza colocar un peso 20Lb, con el freno prony ajustar la velocidad a 200RPM y abrir la válvula de refrigeración de la turbina en un 50%.

e) Tomar los datos de presiones, número de revoluciones y lectura en el dinamómetro.
f) Cambiar la posición de los alabes del distribuidor en un rango de 1'' hasta 1 3/4'' realizando un incremento constante 1/8'', para cada cambio hacer los especificado en el paso e).
g) Retornar al paso d) y cambiar el peso a 30 Lb respectivamente; para este cambio volver a realizar los pasos e) y f).

Prueba B.

a) Verificar que el nivel del tanque de compensación contenga un nivel de agua por encima de la turbina; De no contar con el nivel de agua requerido proceder a llenarlo dando apertura a la válvula de alimentación externa hasta alcanzar el nivel de flujo deseado. Cerrar la válvula.
b) Verificar que la turbina no posea pesas en sus sistema (de tener pesas proceder a quitarlas), colocar el ángulo de los alabes del rodete en -5°.
c) Energizar el sistema: para esto se sube el breakear en el panel de control del motor de la bomba, se gira la perilla a la posición de encendido y se verifica que velocidad del motor este en la 1era posición. Luego se procede al encendido
d) Colocar el disco de 50Lbs como contrapeso.
e) Fijar la velocidad de giro de la turbina (N) en 200 RPM ajustada mediante la aplicación del freno Prony.
f) Realizar las lecturas de presiones de entrada y salida de la bomba y turbina además del delta de presión de la placa.
g) Repetir el paso e para N 400, 600, 800, 1000, 1200 RPM y obtener para cada N las lecturas del paso f.
h) Luego se procede a fijar la posición de los alabes del distribuidor en: 1 1/8'', 1 1/4'', 1 3/8'', 1 1/2'', 1 5/8'', 1 3/4'', 1 7/8'', 2'', realizando los pasos e, f y g para cada posición de los alabes del distribuidor.
i) Finalmente se procede apagar el motor de la bomba y se girar la perilla del panel a la posición de apagado. Desenergizar también el panel de control del motor de la bomba bajando el breaker en el tablero.

RECOLECCION DE DATOS

Para la recolección de datos se usara el formato descrito en la Tabla 4.11.

Tabla 4.11 Tabla de recolección de datos.

Tabla de recolección de datos	
Practica	**COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE TURBINA KAPLAN**
Grupo	
Practica N°	

Alabes		Tacómetro	Manómetros		Piezómetro	Dinamómetro	
Rodete ϕ [°]	Distribuidor X [’’]	N [RPM]	Pe_{Turb} [Psi]	Ps_{Turb} [Psi]	ΔP_{Placa} [InHg]	W [Lb]	F [kg]

Nombre y Apellido	C.I.	Firma	Nombre del Profesor

			Firma del Profesor
			Fecha: / /

CÁLCULOS PRELIMINARES.

Para cada velocidad de giro de la turbina se deberá calcular la velocidad lineal que experimenta el fluido en la entrada y la salida de la turbina.

Haciendo uso de las velocidades lineales, las presiones de entrada y salida de la turbina y la altura a la que está ubicada la tubería de entrada y salida de la turbina se procede a calcular la altura neta.

Calcular los caudales haciendo uso de las presiones registrada por el piezómetro ubicado en la placa orificio.

Para el cálculo de la eficiencia se obtiene con el uso de las potencias hidráulicas y la potencia al freno.

Todos los valores de los cálculos deberán ser reflejados en la tabla de cálculo (tabla 4.12) presente a continuación:

Tabla 4.12 Formato para presentación de resultados por los estudiantes.

Alabes	Tacómetro	Velocidad		Manómetros		Altura Neta	Piezómetro	Caudal	Dinamómetro		Potencias		Rendimiento
Rodete ϕ [°]	N [RPM]	Ve [m/s]	Vs [m/s]	Pe [mca]	Ps [mca]	H [m]	Δh [Pa]	Q [m3/s]	W [N]	F [N]	P [W]	Pa [W]	η [%]

Informe a Presentar

- Introducción teórica.
- Ecuaciones a usar.
- Tabulación de la data experimental.
- Tabulación de los resultados obtenidos.
- Mostrar cálculo tipo.
- Curvas características de: Pu vs N; Q vs N; Ƞ vs N; Ƞ vs Q; Apertura de rodete -5°.
- Comparación y conclusiones referentes al comportamiento de las variables de Presión, caudal, potencia para las distintas combinaciones de ángulos de rotor y distribuidor a estudiar.
- Referencias bibliográficas.

MODELO DE CÁLCULO.

A continuación se presenta un cálculo tipo realizado con una apertura los alabes de la bomba axial de 18°, ángulo de los alabes del rotor de 35°, carga aplicada en el dinamómetro de 20Lb y con distintas posiciones de apertura de los alabes del distribuidor desde 1'' hasta 1 3/4''.

Datos:

N=234RPM

Pe_{Turb} = 3.2Psi = 2.25mca.

Ps_{Turb} = 0.5Psi = 0.15mca.

ΔP_{Placa} = 0.1InHg = 338.64Pa

W = 20Lb = 89N.

F = 6Kg = 58.86N.

De = 15'' = 0.381m.

Ds = 8'' = 0.203m.

d_B = 0.2m.

Ze =1,16m.

Zs = 0,35m.

L_1 = 1

L_2 = 1/2

T = 25°C

ρH_20 = 997.13Kg/m3

γH_20 = 9.777kN/m3

υ = 0.893·10-6 m2/s

A = 0.0299m^2 (Calculado capítulo 4.1)

β = 0.65 (Calculado capítulo 4.1)

Re = $6.2972840 \cdot 10^5$ (Calculado capítulo 4.1)

$\mathrm{Cd} = 0{,}62$ (Calculado capítulo 4.1)

$\mathrm{C} = 0{,}68$ (Calculado capítulo 4.1)

$\mathrm{Ae} = 0{,}1140\mathrm{m}^2$ (Calculado capítulo 4.1)

$\mathrm{As} = 0{,}0324\mathrm{m}^2$ (Calculado capítulo 4.1)

Determinación del Caudal:

Para la determinación del caudal se hace uso de la Ecuación 2.1 obteniéndose:

$$Q = 0{,}68 * (0.0299m^2) * \sqrt{\frac{2 * (338.64Pa)}{\frac{997.13\mathrm{Kg}}{\mathrm{m3}}}} = 0{,}0168m^3/s$$

Determinación la Altura Neta:

Velocidad de entrada (ecuación 2.2).

$$Ve = \frac{0{,}0168m^3/s}{0{,}1140m^2} = 0{,}1474\mathrm{m/s}$$

Velocidad de salida (ecuación 2.2).

$$Vs = \frac{0{,}0168m^3/s}{0{,}0324m^{\,2}} = 0{,}5185\text{m/s}$$

La altura neta (ecuación 2.10) se obtiene:

$$Hu = (3{,}45 - 0{,}15)\text{m} + \frac{(0{,}1474\text{m/s})^2 - (0{,}5185\text{m/s})^2}{2 * (9{,}81m/s^2)} + 0{,}85m = 2{,}94mca$$

Determinación de la potencia hidráulica (ecuación 2.12).

$$\text{P} = (0{,}0168m^3/s) * (9.777\text{kN/m3}) * (2{,}94mca) = 482{,}91\text{W}$$

Determinación de la potencia al freno (ecuación 2.13).

$$\text{P}_a = 0{,}1047 * (234\text{RPM}) * (89 - 58{,}86)\text{N} * 0{,}2\text{m} = 147{,}68\text{W}$$

Determinación de la eficiencia (ecuación 2.11).

$$\eta = \frac{147{,}68\text{W}}{482{,}91\text{W}} * 100 = \ 30{,}58\%$$

La recolección de datos se expresa en la Tabla 4.13 y los resultados obtenidos en las Tabla 4.14.

Tabla 4.13 Ejemplo de recolección de datos.

Alabes		Tacómetro	Manómetros		Piezómetro	Dinamómetro	
Rodete ϕ [°]	Distribuidor X [’’]	N [RPM]	Pe [Psi]	Ps [Psi]	ΔP_{Placa} [InHg]	W [Lb]	D [kg]
35	1	234	3,2	0,5	0,1	20	6
	1 1/8	850	3,4	0,5	0,5	20	6
	1 1/4	1260	3	0,5	1,4	20	6
	1 3/8	1387	2,4	0,5	2,2	20	6

	1 1/2	1500	1,8	0,5	3,1	20	6
	1 5/8	1520	1,4	0	3,9	20	6
	1 3/4	1525	1	0	4,7	20	6

Tabla 4.14 Ejemplo de presentación de resultados.

Alabes	Tacómetro	Velocidad		Manómetros		Altura Neta	Piezómetro	Caudal	Dinamómetro		Potencias		Rendimiento
Rodete ϕ [°]	N [RPM]	Ve [m/s]	Vs [m/s]	Pe [mca]	Ps [mca]	H [m]	Δh [Pa]	Q [m3/s]	W [N]	F [N]	P [W]	Pa [W]	η [%]
35	234	0,15	0,52	2,25	0,22	2,94	338,64	0,02	89,00	58,86	481,07	147,68	30,70
	850	0,33	1,16	2,39	0,22	3,03	1693,20	0,04	89,00	58,86	1108,90	536,46	48,38
	1260	0,55	1,94	2,11	0,22	2,63	4740,95	0,06	89,00	58,86	1613,89	795,23	49,27
	1387	0,69	2,43	1,69	0,22	2,11	7450,06	0,08	89,00	58,86	1621,71	875,38	53,98
	1500	0,82	2,88	1,27	0,22	1,58	10497,81	0,09	89,00	58,86	1437,12	946,70	65,87
	1520	0,92	3,23	0,98	0,00	1,35	13206,92	0,10	89,00	58,86	1377,35	959,32	69,65
	1525	1,01	3,55	0,70	0,00	0,96	15916,03	0,11	89,00	58,86	1083,36	962,48	88,84

Curvas características.

Las curvas carteristas obtenidas del ejemplo de los cálculos de estudiantes se expresan desdés la figura 4.21 hasta la figura 4.24.

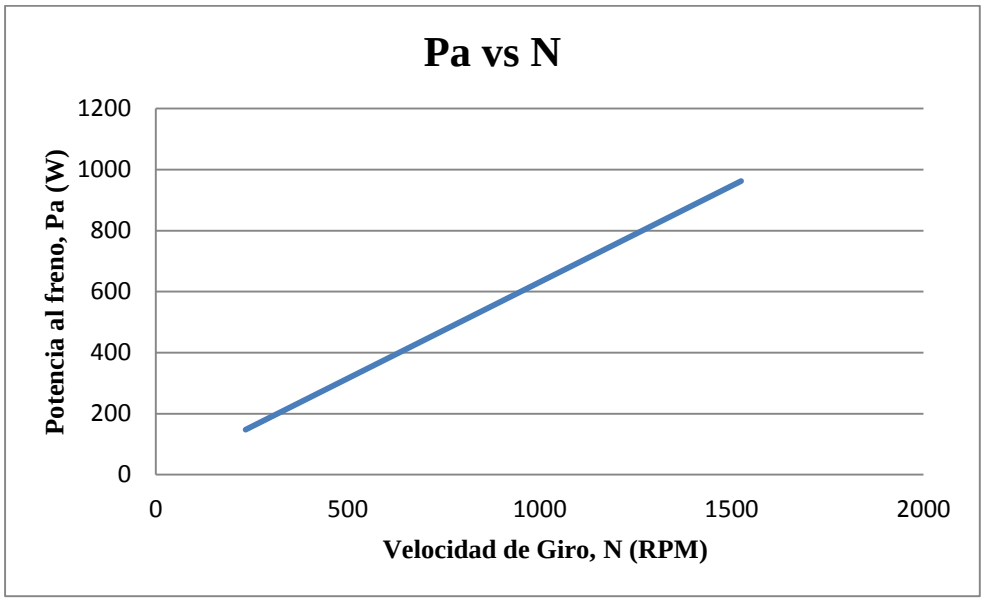


Figura 4.21 Curva Pa vs N de la prueba para estudiantes.

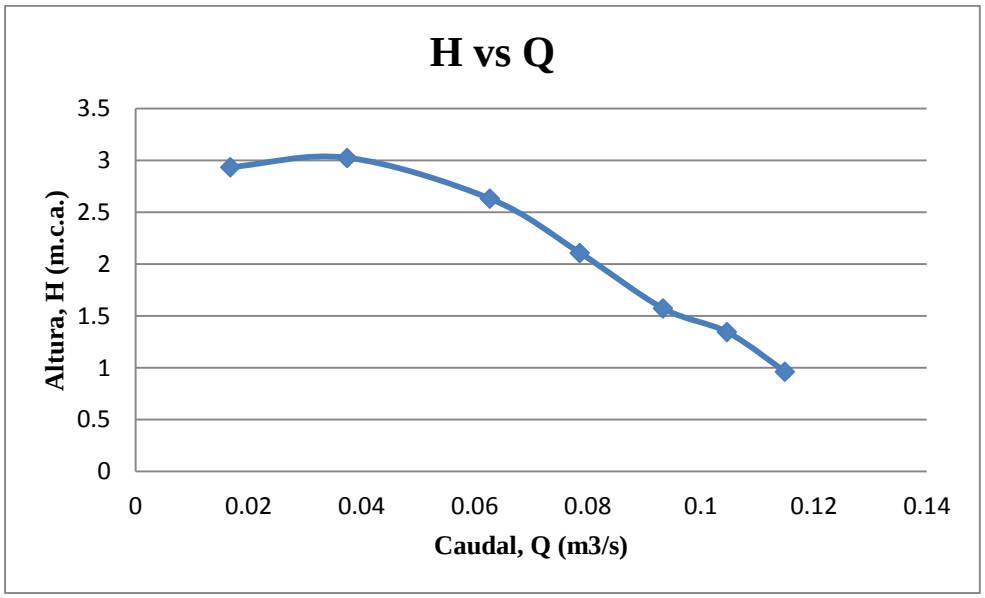


Figura 4.22 Curva H vs Q de la prueba para estudiantes.

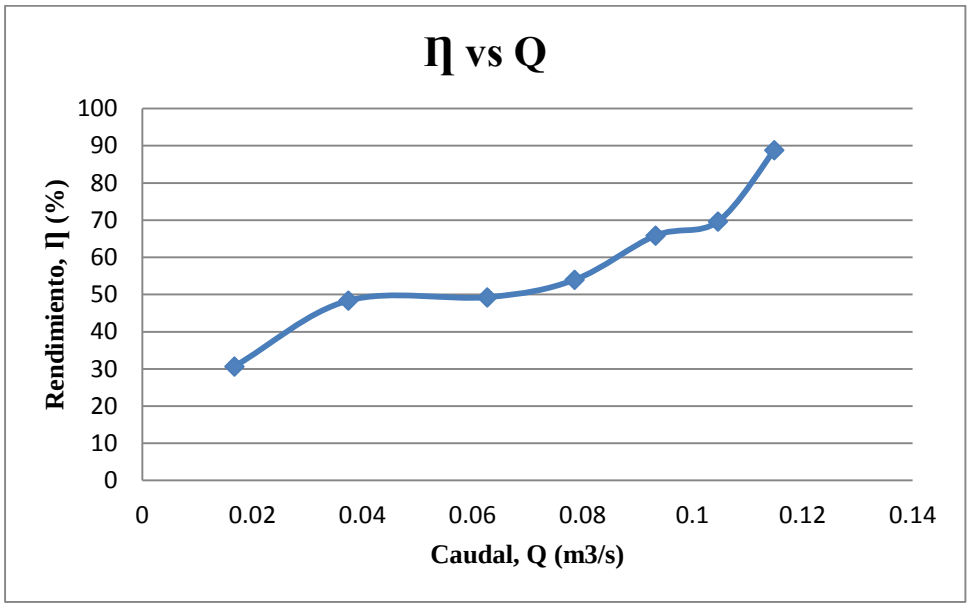


Figura 4.23 Curva η vs Q de la prueba para estudiantes.

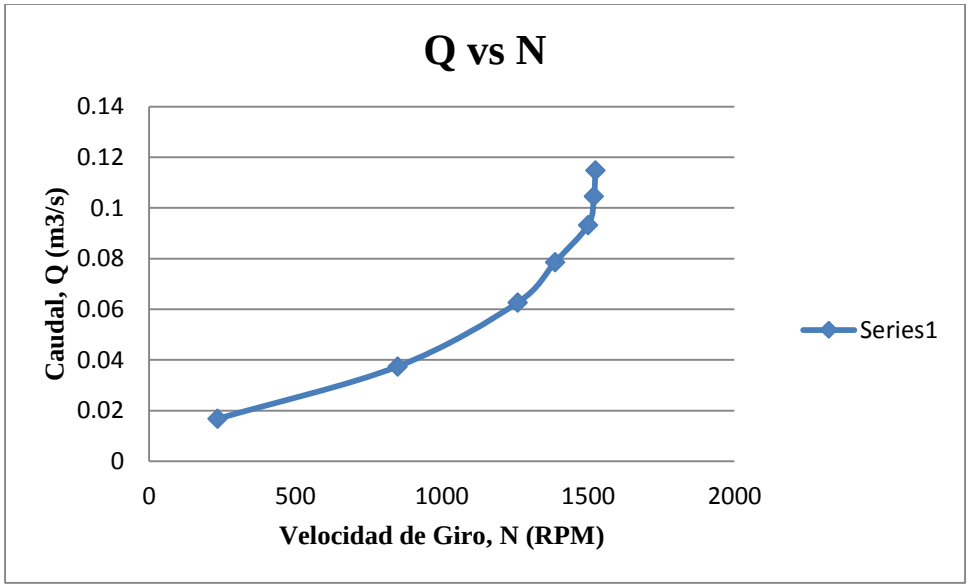


Figura 4.24 Curva Q vs N de la prueba para estudiantes.

4.5 RESULTADOS DE LA METODOLOGÍA PARA LA REALIZACIÓN DEL MANTENIMIENTO DEL SISTEMA DE TURBINA KAPLAN.

Al sistema de turbina Kaplan se le estableció actividades de mantenimiento destinado a la conservación del mismo, garantizando su buen funcionamiento y fiabilidad. Estas actividades de mantenimiento preventivo fueron diseñadas para ser aplicadas semestralmente, es decir al finalizar el semestre académico donde se hizo uso del sistema sea aplicado el mantenimiento

y permanezca en un estado óptimo para ser usado por la población estudiantil en el nuevo periodo académico

Para la aplicación de las actividades de mantenimiento el sistema se dividió en equipos al cual se le generaron formatos de actividades basándose en las características y condiciones que cada equipo presenta. Los equipos que conforman el sistema de turbina Kaplan son:

- Tuberías (Tabla 4.15).
- Manómetro a la entrada de la Turbina (Tabla 4.16).
- Manóvacuometro a la salida de la Turbina (Tabla 4.17).
- Manóvacuometro a la entrada de la Bomba (Tabla 4.18).
- Manómetro a la salida de la Bomba (Tabla 4.19).
- Tacómetro Analógico del Motor (Tabla 4.20).
- Dinamómetro (Tabla 4.21).
- Turbina (Tabla 4.22).
- Válvula de Compuerta (Tabla 4.23).
- Válvula de Alivio (Tabla 4.24).
- Válvula de Refrigeración (Tabla 4.25).
- Freno Prony (Tabla 4.26).
- Bomba (Tabla 4.27).
- Motor (Tabla 4.28).
- Piezómetro (Tabla 4.29).
- Control del Motor (Tabla 4.30).
- Tacómetro Digital de la Turbina (Tabla 4.31).
- Tanque de Compensación (Tabla 4.32).

Tabla 4.15 Mantenimiento de las tuberías.

	ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO **Sistema de Turbina Kaplan**	
Equipo: Tuberías.	**Fecha:___/___/___**	

Inspección	**Verificar**	**Encontrada**		**Acciones a ejecutar**	**Realizado**		**Observaciones**
		SI	**NO**		**SI**	**NO**	
Interna	Obstrucción			Limpieza interna			
Externa	Desgaste de la superficie externa			Aplicación de pintura			
	Suciedad adherida			Limpieza manual mecánica			
	Fisura o grietas			Aplicación de vendaje y parche			
	Fugas por Empacaduras			Ajuste de tornillos y tuercas. Cambio de empacaduras			

Tabla 4.16 Mantenimiento del manómetro a la entrada de la turbina.

	ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO **Sistema de Turbina Kaplan**	
Equipo: Manómetro a la entrada de la Turbina. **Fecha:**___/___/___		

Inspección	**Verificar**	**Encontrada**		**Acciones a ejecutar**	**Realizado**		**Observaciones**
		SI	**NO**		**SI**	**NO**	
Externa	Suciedad adherida			Limpieza manual mecánica			
	Fisura o grietas en el cristal			Cambio del cristal			
	Presentación de valores erróneo			Calibración			
	No presenta lectura			Purgar el aire en la conexión			
	Fuga por la conexión			Aplicación de teflón y ajuste en el roscado.			

Tabla 4.17 Mantenimiento del manó-vacuometro a la salida de la turbina.

	ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO **Sistema de Turbina Kaplan**	
Fecha:___/___/___ **Equipo:** Manó-vacuometro a la salida de la Turbina.		

Inspección	**Verificar**	**Encontrada**		**Acciones a ejecutar**	**Realizado**		**Observaciones**
		SI	**NO**		**SI**	**NO**	
Externa	Suciedad adherida			Limpieza manual mecánica			
	Fisura o grietas en el cristal			Cambio del cristal			
	Presentación de valores erróneo			Calibración			
	No presenta lectura			Purgar el aire en la conexión			
	Fuga por la conexión			Aplicación de teflón y ajuste en el roscado.			

Tabla 4.18 Mantenimiento del manó-vacuometro a la entrada de la bomba.

	ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO **Sistema de Turbina Kaplan**	
Fecha:___/___/___ **Equipo:** Manó-vacuometro a la entrada de la Bomba.		

Inspección	**Verificar**	**Encontrada**		**Acciones a ejecutar**	**Realizado**		**Observaciones**
		SI	**NO**		**SI**	**NO**	
Externa	Suciedad adherida			Limpieza manual mecánica			
	Fisura o grietas en el cristal			Cambio del cristal			
	Presentación de valores erróneo			Calibración			
	No presenta lectura			Purgar el aire en la conexión			
	Fuga por la conexión			Aplicación de teflón y ajuste en el roscado.			

Tabla 4.19 Mantenimiento de manómetro a la salida de la bomba.

	ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO **Sistema de Turbina Kaplan**	
Equipo: Manómetro a la salida de la Bomba. **Fecha:___/___/___**		

Inspección	**Verificar**	**Encontrada**		**Acciones a ejecutar**	**Realizado**		**Observaciones**
		SI	**NO**		**SI**	**NO**	
Externa	Suciedad adherida			Limpieza manual mecánica			
	Fisura o grietas en el cristal			Cambio del cristal			
	Presentación de valores erróneo			Calibración			
	No presenta lectura			Purgar el aire en la conexión			
	Fuga por la conexión			Aplicación de teflón y ajuste en el roscado.			

Tabla 4.20 Mantenimiento del tacómetro analógico del motor.

	ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO **Sistema de Turbina Kaplan**	
Fecha:___/___/___ **Equipo:** Tacómetro Analógico del Motor.		

Inspección	**Verificar**	**Encontrada**		**Acciones a ejecutar**	**Realizado**		**Observaciones**
		SI	**NO**		**SI**	**NO**	
Externa	Suciedad adherida			Limpieza manual mecánica			
	Fisura o grietas en el cristal			Cambio del cristal			
	Presentación de valores erróneo			Calibración			
	No presenta lectura			Revisar la conexión			
	Ruidos			Verificar desalineación. Ajustar tornillos y tuercas.			
	Vibraciones			Verificar desalineación			

Tabla 4.21 Mantenimiento del dinamómetro.

	ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO **Sistema de Turbina Kaplan**	
Equipo: Dinamómetro.	**Fecha:___/___/___**	

Inspección	**Verificar**	**Encontrada**		**Acciones a ejecutar**	**Realizado**		**Observaciones**
		SI	**NO**		**SI**	**NO**	
Externa	Suciedad adherida			Limpieza manual mecánica			
	Fisura o grietas en el cristal			Cambio del cristal			
	Presentación de valores erróneo			Calibración			
	No presenta lectura			Revisar la conexión			

Tabla 4.22 Mantenimiento de la turbina.

	ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO **Sistema de Turbina Kaplan**	
Equipo: Turbina. **Fecha:___/___/___**		

Inspección	**Verificar**	**Encontrada**		**Acciones a ejecutar**	**Realizado**		**Observaciones**
		SI	**NO**		**SI**	**NO**	
Externa	Tubería de desagüe tapadas o sucias			Limpieza interna de tuberías			
	Acumulación de agua en la parte externa del distribuidor			Secado del agua estancada			
	Desajuste en los tornillos y tuercas (tacómetro-brida)			Ajuste en los tornillos y tuercas			
	Desgastes y Corrosión en los rodamientos			Cambio de Rodamientos			

	Desgaste de la superficie externa			Aplicación de pintura			
	Suciedad Adherida a las poleas			Limpieza manual mecánica			
	Ausencia de lubricante en el sistema de rodamientos de las poleas			Aplicación de lubricante			
	Ausencia de lubricante en el eje roscado del volante de los alabes distribuidor			Aplicación de lubricante			

Tabla 4.23 Mantenimiento de la válvula de compuerta.

	ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO **Sistema de Turbina Kaplan**	
Equipo: Válvula de Compuerta. **Fecha:___/___/___**		

Inspección	**Verificar**	**Encontrada**		**Acciones a ejecutar**	**Realizado**		**Observaciones**
		SI	**NO**		**SI**	**NO**	
Externa	Presencia de fugas por el vástago			Reemplazo de válvula			
	Soltura en el tornillo superior			Ajuste del tornillo			
	Suciedad adherida			Limpieza manual mecánica			
	Atasco de la válvula			Ciclado de la válvula.			
	Presencia de fugas en las conexiones de succión y descarga			Ajuste de en las conexiones y Aplicación de teflón			

Tabla 4.24 Mantenimiento de la válvula de alivio.

	ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO **Sistema de Turbina Kaplan**	
Fecha:___/___/___ **<u>Equipo</u>:** Válvula de Alivio.		

Inspección	**Verificar**	**Encontrada**		**Acciones a ejecutar**	**Realizado**		**Observaciones**
		SI	**NO**		**SI**	**NO**	
Externa	Presencia de fugas por el vástago			Reemplazo de válvula			
	Suciedad adherida			Limpieza manual mecánica			
	Atasco de la válvula			Ciclado de la válvula.			
	Presencia de fugas en las conexiones de succión y descarga			Ajuste de en las conexiones y Aplicación de teflón			

Tabla 4.25 Mantenimiento de la válvula de refrigeración.

	ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO **Sistema de Turbina Kaplan**	

Fecha:___/___/___ **Equipo:** Válvula de Refrigeración.							
Inspección	**Verificar**	**Encontrada**		**Acciones a ejecutar**	**Realizado**		**Observaciones**
		SI	**NO**		**SI**	**NO**	
Externa	Presencia de fugas por el vástago			Reemplazo de válvula			
	Suciedad adherida			Limpieza manual mecánica			
	Atasco de la válvula			Ciclado de la válvula.			
	Presencia de fugas en las conexiones de succión y descarga			Ajuste de en las conexiones y Aplicación de teflón			

Tabla 4.26 Mantenimiento del freno prony.

Tabla 4.27 Mantenimiento de la bomba.

ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO

Sistema de Turbina Kaplan

ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO

Sistema de Turbina Kaplan

Fecha:___/___/___

Fecha:___/___/___

Equipo: Freno Prony.

Equipo: Bomba.

Inspección	Verificar	Encontrada		Acciones a ejecutar	Realizado		Observaciones
		SI	NO		SI	NO	
	Ausencia de lubricante en el sistema de lubricación			Aplicación de lubricante al envase de lubricación			
Externa	Desgaste de la superficie externa de las pesas			Cambiar cojinetes si están desgastados por la presencia de altas temperaturas			
	Suciedad adherida			Limpieza manual mecánica			
Interna	Desgaste, corrosión de las guayas			Cambiar Impulsor			
	Desgaste en sellos mecánicos			Reemplazo de las guayas Cambiar sello			
	Desgaste en Empaquetaduras			Cambiar Elemento			
	Suciedad adherida al Cuerpo			Aplicar Limpieza Mecánica			
Externa	Suciedad adherida			Limpieza manual mecánica			
	Fisura o grietas del acrílico			Realizar reparaciones			

	ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO **Sistema de Turbina Kaplan**	
Equipo: Motor.	**Fecha:___/___/___**	

Inspección	**Verificar**	**Encontrada**		**Acciones a ejecutar**	**Realizado**		**Observaciones**
		SI	**NO**		**SI**	**NO**	
Interna	Temperatura de Rodamientos			Cambiar Rodamientos si están desgastado por la presencia de altas temperaturas			
	Falta de lubricante en Rodamientos			Lubricar Rodamientos			
	Suciedad adherida al Cuerpo			Aplicar Limpieza Mecánica			
Externa	Desalineación			Alinear Motor-Bomba			
	Suciedad adherida			Limpieza manual mecánica			
	Desajuste entre el motor y la base			Ajustar tornillos			
	Ausencia de lubricante en la chumacera			Lubricar Chumacera			

Tabla 4.29 Mantenimiento del piezómetro.

	ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO **Sistema de Turbina Kaplan**	
Fecha:___/___/___ **<u>Equipo</u>:** Piezómetro de mercurio-agua.		

Inspección	**Verificar**	**Encontrada**		**Acciones a ejecutar**	**Realizado**		**Observaciones**
		SI	**NO**		**SI**	**NO**	
Externa	Suciedad adherida			Limpieza manual mecánica			
	Ruptura del cristal			Cambio del cristal			
	Fuga de Mercurio			Reparar fugas y reposición del mercurio fugado			
	Fugas por las válvulas			Cambio de las válvulas			
	Ruptura de las mangueras			Cambio de mangueras			
	Mangueras sueltas			Ajuste de mangueras			

Tabla 4.30 Mantenimiento del control del motor.

	ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO **Sistema de Turbina Kaplan**	
Equipo: Control del Motor.	**Fecha:___/___/___**	

Inspección	**Verificar**	**Encontrada**		**Acciones a ejecutar**	**Realizado**		**Observaciones**
		SI	**NO**		**SI**	**NO**	
Externa	Pulsadores dañados			Reemplazo de pulsadores			
	Desgaste del aislamiento del cable de corriente			Aplicación de material aislante (Teipe) o cambio de cable			
	Suciedad adherida			Limpieza manual mecánica			
	Cables rotos o despegados			Fijación de cables			
	Voltaje y Amperaje			Regular			
	Desgaste del material aislante de los cables			Colocar aislamiento o cambiar cables.			

Tabla 4.31 Mantenimiento del tacómetro digital de la turbina.

	ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO **Sistema de Turbina Kaplan**	
Equipo: Tacómetro digital de la turbina. **Fecha:___/___/___**		

Inspección	**Verificar**	**Encontrada**		**Acciones a ejecutar**	**Realizado**		**Observaciones**
		SI	**NO**		**SI**	**NO**	
Externa	Pulsadores dañados			Reemplazo de pulsadores			
	Desgaste del aislamiento del cable de corriente			Aplicación de material aislante (Teipe) o cambio de cable			
	Presencia de agua			Limpiar el equipo			
	Pantalla LED en fracturada			Reemplazo de pantalla LED			
	Cables rotos o despegado			Fijación de cables			

Tabla 4.32 Mantenimiento del tanque de compensación.

	ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO **Sistema de Turbina Kaplan**	
Equipo: Tanque de Compensación. **Fecha:___/___/___**		

Inspección	**Verificar**	**Encontrada**		**Acciones a ejecutar**	**Realizado**		**Observaciones**
		SI	**NO**		**SI**	**NO**	
Interna	Obstrucción			Lavado a presión			
Externa	Suciedad adherida			Limpieza manual mecánica			
	Fisura o grietas			Aplicación de vendaje y parche			
	Fugas por Empacaduras			Ajuste de tornillos y tuercas. Cambio de empacaduras			

CONCLUSIONES

La determinación de los parámetros de operación de la turbina Kaplan permitieron conocer cuáles son los parámetros que influyen en el comportamiento de este tipo de turbina y establecer los rangos en que operan cada parámetro en el sistema de Turbina Kaplan

perteneciente al laboratorio de hidráulica “Elías Sánchez Díaz” de la escuela de ingeniería civil de la universidad de Carabobo.

El diseño de factorial multinivel fue usado en el diseño de pruebas experimentales para el sistema de turbina Kaplan logrando estudiar los distintos niveles que poseen cada factor experimental mediante todas las posibles combinaciones de los niveles de cada factor; al hacer uso de este diseño se pudo obtener la influencia de cada factor sobre las variables de respuesta determinando que el ángulo de posición de los alabes del distribuidor como factor experimental tiene mayor efecto sobre las variables de respuestas estudiadas.

Para los efectos de interacción estudiados se obtuvo que los factores experimentales no presentan efectos de interacción; Esto genera como resultado que la combinación de dos factores al cambiar su valor (aumentar o disminuir) con respecto al tercer factor produce poca influencia en los efectos de las variables de respuesta.

En cuantos a las curvas de funcionamiento para la representación de las variables de salida del sistema de Turbina Kaplan, se logró elaborar las curvas de funcionamiento para cada ángulo de posición de los alabes del rodete expresadas en variáciones desde -5 hasta 35º con incrementos constante de 5º y la combinación de estas curvas genero la Curva universal del sistema de turbina Kaplan donde se aprecian los parámetros en los que debe trabajar el sistema para obtener los puntos de rendimientos óptimos deseados.

El manual de práctica usado como metodología para la realización de las prácticas del sistema de turbina Kaplan, garantiza que los estudiantes realicen ensayos en el sistema con el objetivo de que adquiera conocimiento sobre el funcionamiento de este tipo de sistema y la influencia de cada parámetro sobre la variables de respuesta del sistema a través de la elaboración de las curvas de funcionamiento.

Los formatos de mantenimiento preventivos generados para cada equipo perteneciente al sistema de turbina Kaplan garantizan la conservación y correcto funcionamiento del sistema. Los formatos de mantenimiento preventivos especifican las actividades a verificar y las acciones a ejecutar.

RECOMENDACIONES

- Para mejorar la toma de datos en cuanto facilidad y exactitud se refiere, se recomienda semi-automatizar la instrumentación del sistema de turbina Kaplan perteneciente al laboratorio de hidráulica “Elías Sánchez Díaz” de la escuela de ingeniería civil de la universidad de Carabobo, de esta manera se obtendrán eficiencias más reales del sistema y a su vez evitar el riesgo a la hora de ajustar la velocidad de giro de la turbina mediante el freno prony.

- Se recomienda cumplir con la serie de actividades de mantenimiento del sistema de turbina Kaplan para garantizar la conservación y funcionamiento del mismo y así permitir a los estudiantes y usuario en general usar el sistema a través de las practicas las cuales fueron diseñadas con el objetivo de que se adquiera el mayor conocimiento a través de la aplicación de éstas.

- Antes de realizar las prácticas en el sistema de turbina Kaplan se debe comprobar que: el nivel del tanque de compensación contenga un nivel de agua por encima de la turbina, el sistema no posea pesas.

- Se recomienda trabajar máximo con la 5ta posición en el control de velocidades de giro del motor en la realización de las prácticas debido a que por encima de ésta, el sistema vibra considerablemente y la bomba cavita.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

[1] D. J. Albright, G. H. Mittendorf, Jr., ‘‘google patents’’, 27 Diciembre de 1988. [En línea]. Disponible: http://www.google.com.ar/patents/US4794544

[2] Richard K. Fisher, Jr., Richard A. Johnson, Ronald E. Deitz, ‘‘google patents’’, 19 May 1998. [En línea]. Disponible: http://www.google.tl/patents/US5754446

[3] Krauss Hans, ‘‘google patents’’, 17 Abr 1962. [En línea]. Disponible: http://www.google.es/patents/US3030070

[4] Seewer Paul Werner, ‘‘google patents’’, 10 Septiembre 1946. [En línea]. Disponible: http://www.google.tl/patents/US2407454

[5] Gregory Mark Webber, ‘‘google patents’’, 9 Feb 2012. [En línea]. Disponible: http://www.google.st/patents/WO2012016283A1?cl=en&hl=es

[6] Rubén Cordón Martínez, ‘‘Caracterización de una Turbina Axial y Creación de aplicación gráfica para procesamiento de datos’’, Trabajo especial de grado (pregrado), Ingeniería Mecánica y Minera, Ingeniería, Universidad de Jaén, Jaén, Andalucía, 2012.

[7] Guillén Salazar Anita Cecilia y Marcalla Iza Alex Manuel, ‘‘AUTOMATIZACIÓN DE LAS TURBOMÁQUINAS DEL LABORATORIO DE FLUÍDOS DE LA FACULTAD DE MECÁNICA’’, Trabajo especial de grado (pregrado), Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador, 2011.

[8] Pedro Fernández Díez, ‘‘FIUNA’’, 12 Junio de 1984. [En línea]. Disponible: http://www.ing.una.py/pdf_material_apoyo/turbinas-hidraulicas.pdf

ANEXOS

Anexo I

Placa de la Turbina Kaplan.

GILKES
KENDAL · ENGLAND

Anexo II

Características de la Bomba Axial

DIRECTORS:
P. N. WILSON, O.B.E., M.I.C.E., M.I.Mech.E.
P. E. F. CREWDSON
K. LEON MYELIN, C.B.E., F.C.A.
H. G. HARRISON BECK
LONDON OFFICE
CRAVEN HOUSE,
KINGSWAY, W.C.2.
TELEPHONE: HOLBORN 3231
TELEGRAMS:
GILKSGORCO WESTCENT
LONDON
LOCAL BOARD
P. E. F. CREWDSON
J. M. WALKER
OUR REFERENCE

GILKES

TELEGRAMS: GILKES, KENDAL.
TELEPHONE: No. 25

GILBERT GILKES & GORDON LTD.

WATER TURBINES
WATER TURBINE GOVERNORS
GGG SELF PRIMING PUMPS

YOUR REFERENCE

KENDAL
WESTMORLAND
ENGLAND

ALTERNATIVE
SPECIFICATION AND ESTIMATE.

ITEM 1A Unit A. TURBINE.

ONE - 8" diameter VERTICAL SHAFT SPIRAL CASED GILKES' KAPLAN TURBINE, designed for the following duty:-

Output..... 1.62 B.H.P.

Net Head..... 6 Feet.

Quantity of Water..... 1140 G.P.M.

Normal Speed..... 830 R.P.M.

The turbine would be constructed as described in the enclosed leaflet M6/15 and would be complete with the equipment specified therein.

PRICE.....£1,050. 0. 0d. NETT.

ONE THOUSAND AND FIFTY POUNDS, NETT.

Bomba Instalada

Unit B. PUMP

The pump would be horizontal variable pitch axial flow type, having 10" suction and delivery branches.

The pump would have cast iron body and discharge bend, together with perspex cylinder, fitted to the inlet side of the pump.

continued.....

Discharge and guide vanes would be integral with a cast iron body.

The rotor would be of gunmetal, carried on a steel spindle. Where the spindle passes through the discharge bend a suitable stuffing box would be provided.

The shaft would be carried in two water lubricated Tuffnel bearings, one in a boss integral with the discharge and guide vanes and the other in the stuffing box.

These two bearings would be lubricated by the water being pumped.

The drive to be through a pin and bush type flexible coupling, suitably guarded. The unit would be complete with blade setting gear to enable the blade pitch to be varied between 8¾ and 33¾° .

It is necessary to stop the pump to change the angle of the blade.

DYNAMOMETER.

ONE 30 H.P. DRIP PROOF TYPE CONTINUOUSLY RATED SLIP RING PATTERN MOTOR., fitted with ball bearings, wound for 400/440, 3 phase, 50 cycle supply., with a synchronous speed of 1500 R.P.M. The Dynamometer would be mounted in special trunnion bearings.

The above pump and motor would be mounted on a bedplate and would be connected by means of a flexible coupling, protected by a coupling guard. On this bedplate would also be mounted a GILKES' type force gauge (similar to that supplied on our Tutor Pelton unit) and a mechanical tachometer mounted on the end of the the dynamometer unit.

The above unit is suitable for operating the above turbine and capable of the following duties:-

Caudal Nominal

Output.....2,100 G.P.M.

Total Head..... 10 Feet

Contd...

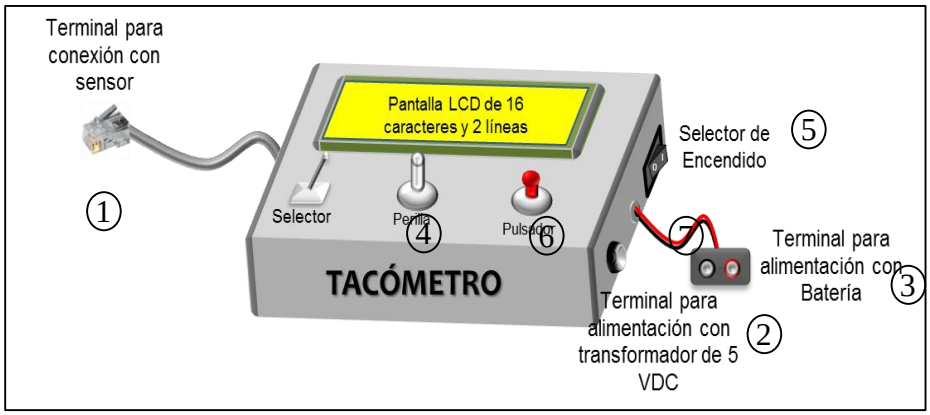
Anexo III

Tacómetro digital para la medición de la velocidad del eje de la turbina del laboratorio “Elías Sánchez Díaz”

1. Características del Tacómetro.

El Tacómetro externamente consta de las siguientes partes para su manipulación:

1.- Terminal para conexión con el sensor fotoeléctrico.
2.- Terminal para alimentación con transformador de 5VDC.
3.- Terminal para alimentación a través de batería de 9VDC.
4.- Selector de tipo de alimentación.
5.- Selector de Encendido y Apagado (0/I).
6.- Perilla para la regulación de la intensidad de la pantalla.
7.- Pulsador para el *reset* del tacómetro.



Elementos para el ajuste del tacómetro

2. Modo de uso.

Para la operación con el tacómetro debe seguir los siguientes pasos:

- Fije el sensor para que mida correctamente el paso de la pestaña a través de la abertura de medición.
- Conecte el terminal de red (1) al terminal de salida del sensor.
- Seleccione la fuente de alimentación que va utilizar para energizar el tacómetro (batería (3) ó transformador (2)) y conéctela en su respectivo terminal.
- Ajuste el selector de tipo de alimentación (4). Mueva la palanca a su derecha si desea utilizar la alimentación con el transformador. Mueva la palanca a la izquierda para usar la alimentación desde la batería.
- Encienda el tacómetro presionando el selector (5) ubicado en la parte lateral del equipo (I/0).
- Ajuste la iluminación de la pantalla del tacómetro hasta lograr visualizar los valores en la pantalla (o los mensajes al usuario) a través de la perilla de regulación (6).
- Utilice el botón de *reset* (7) del tacómetro para realizar el reinicio del programa en caso del presentar algún error en la medición.
- Utilice el selector (5) para apagar el tacómetro luego de su uso.

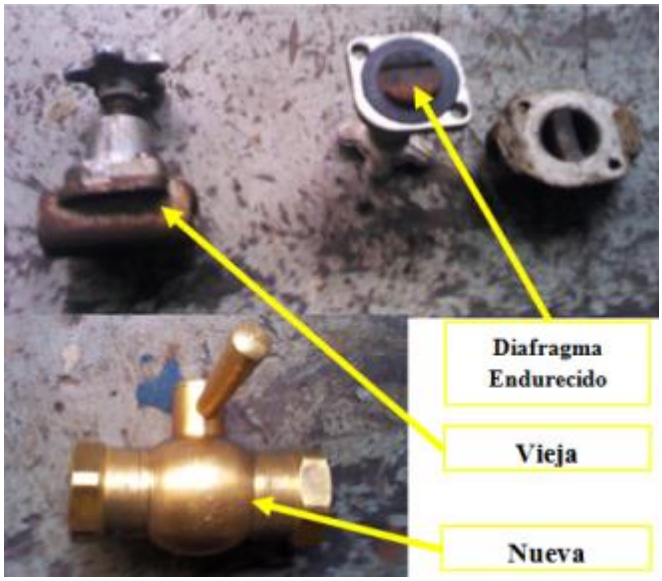
Anexo IV

Actividades realizadas en contribución para la puesta en funcionamiento del sistema de turbina Kaplan.

El sistema de turbina Kaplan cuenta con una bomba centrifuga la cual presentaba gran cantidad de fuga de agua entre la conexión bomba motor, por lo que fue necesario el reemplazo de las empaquetaduras que presentaban desgaste originando la perdida de agua fugada por este medio.

Empaquetaduras.

El piezómetro, instrumento actualmente usado para registrar la caída de presión que se genera en la placa orificio presentaba daños en las válvulas que controlan el paso de agua hacia el instrumento. Debido al tiempo que se mantuvo inoperante, el diafragma interno se endurecido lo que no permite ser desplazado y no permite el paso de agua por tal motivo fue necesario el reemplazo de las válvulas que posee el piezómetro y la limpieza interna de las tuberías del equipo.

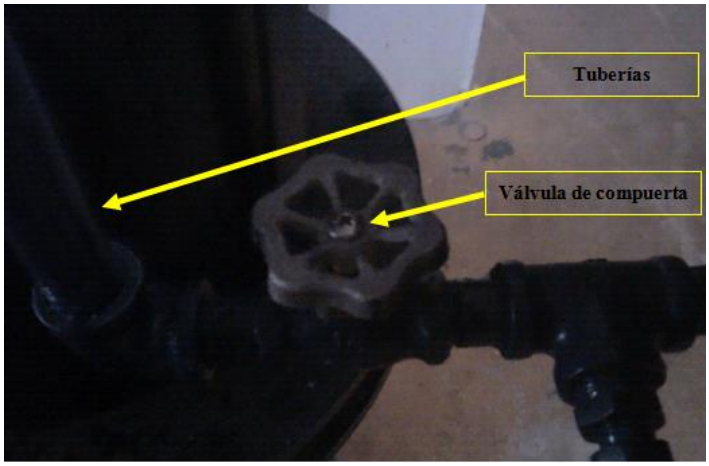


Válvulas del piezómetro.

Se diseñó y se fabricó un tacómetro digital por Ing. Mairím Márquez, el cual es utilizado para registrar la velocidad angular y dar veracidad de la velocidad registrada por el tacómetro analógico.

Figura NX4 Tacómetro digital.

Se realizó la instalación del sistema de tubería y válvula de compuerta destinada a la alimentación del sistema de turbina.



Tubería y Válvula de compuerta.

Se aplicó pintura azul en esmalte metálico a todo el sistema.