



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
DEPARTAMENTO: INGENIERIA AMBIENTAL

**ANALISIS DE LA CAPACIDAD HIDROENERGÉTICA DEL EMBALSE PAO  
CACHINCE.**

**Tutor Académico**

Msc. Márquez Adriana

**Autores:**

Orlando Guevara C.I: 18.437.557

Jonathan Linares C.I: 20.384.884

Bárbula, Octubre de 2016

UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
DEPARTAMENTO: INGENIERIA AMBIENTAL

**ANALISIS DE LA CAPACIDAD HIDROENERGETICA DEL EMBALSE PAO  
CACHINCHE.**

Trabajo Especial de Grado presentado ante la Ilustre Universidad de  
Carabobo para optar al título de Ingeniero Civil.

**Tutor Académico**

Msc. Márquez Adriana

**Autores:**

Orlando Guevara C.I: 18.437.557

Jonathan Linares C.I: 20.384.884

Bárbula, Octubre de 2016



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
DEPARTAMENTO DE  
INGENIERÍA AMBIENTAL



### CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Los abajo firmantes, Miembros del Jurado designado para estudiar el Trabajo Especial de Grado titulado: **"ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD HIDROENERGÉTICA DEL EMBALSE PAO CACHINCHE."**; realizado por los Bachilleres: Jonathan Anibal Linares Sepulveda C.I: 20.384.884 y Orlando José Guevara Rodríguez C.I: 18.437.557, hacemos constar que hemos revisado y aprobado dicho trabajo.

  
\_\_\_\_\_  
Presidente del Jurado  
Adriana Márquez  
C.I 12.604.007



  
\_\_\_\_\_  
Miembro del Jurado  
Ítalo Salazar  
C.I 11.354.542

  
\_\_\_\_\_  
Miembro del Jurado  
Gerardo Huguet  
C.I 4.859.589

Valencia, Noviembre de 2016

## DEDICATORIAS

*Orlando Guevara.*

*Jonathan Linares.*

## **AGRADECIMIENTOS**

*Orlando Guevara.*

A Dios quien me guía a través de cada paso

*Jonathan Linares.*

UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
DEPARTAMENTO: INGENIERIA AMBIENTAL  
**ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD HIDROENERGÉTICA DEL EMBALSE PAO  
CACHINCHE.**

Autores: Guevara Orlando  
Linares Jonathan

Tutor: Msc. Adriana Márquez

Fecha: Octubre 2016

## RESUMEN

La presente investigación tuvo por objetivo analizar el potencial hidroeléctrico del embalse Pao Cahinche, perteneciente al sistema Regional del Centro, quien suministra agua potable a los estados Aragua, Carabobo y Cojedes. A partir de este análisis, se realizó el diseño de una minicentral hidroeléctrica para cada una de las alternativas planteadas.

Esta investigación se caracterizó por ser del tipo descriptiva, ya que a través de la recolección de datos fueron analizadas las variables hidroenergéticas del embalse; este estudio se llevó a cabo mediante el uso de un software estadístico, encontrando que las mismas han presentado poca variabilidad en el período 2005 – 2015. Por otro lado, este estudio se limitó solo al diseño de las obras que conforman el sistema de generación hidroeléctrica, no se toman en cuenta las áreas de influencia de la central en conjunto con los sistemas eléctricos de distribución asociados al embalse.

Con la aplicación de criterios de diseño, la alternativa de caudal  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  y salto neto de 7,883 m es capaz de generar 73,394 kW de potencia, mientras que la alternativa II de caudal  $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$  y salto de 15,872 m es capaz de generar 73,884kW de potencia, ambas a través de una turbina tipo Francis. Asimismo, se determinó que ambas alternativas son factibles económicamente.

**Palabras clave:** Minicentral Hidroeléctrica - Capacidad Hidroenergética – Factibilidad

## INDICE

<b>INDICE</b> .....	8
<b>INDICE DE FIGURAS</b> .....	11
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	14
<b>CAPITULO I</b> .....	16
<b>EL PROBLEMA</b> .....	16
<b>Formulación del problema</b> .....	18
<b>Objetivo general</b> .....	19
<b>Objetivos específicos</b> .....	19
<b>Justificación</b> .....	19
<b>Alcances y limitaciones</b> .....	20
<b>CAPITULO II</b> .....	21
<b>FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b> .....	21
<b>ANTECEDENTES</b> .....	
<b>MARCO LEGAL</b> .....	26
<b>DEFINICIONES DE TERMINOS</b> .....	37
<b>Embalse</b> .....	37
<b>Definición general de p.c.h.</b> .....	38
<b>Turbinas</b> .....	47
<b>Turbinas a acción</b> .....	49
<b>Turbina Pelton</b> .....	49
<b>Clases de turbinas</b> .....	50
<b>EMBALSES DEL ESTADO CARABOBO</b> .....	51
<b>CAPITULO III</b> .....	55
<b>MARCO METODOLOGICO</b> .....	55
<b>Tipo de investigación</b> .....	55
<b>Diseño de la investigación</b> .....	56
<b>Fases de la investigación</b> .....	57

<b>Procesamiento de datos:</b> .....	58
<b>Análisis estadístico:</b> .....	61
<b>Análisis de series de tiempo:</b> .....	63
<b>Proyecciones de variables</b> .....	65
<b>Ajuste de distribuciones:</b> .....	67
<b>Diseño de la pequeña central hidroeléctrica</b> .....	69
<b>Propuesta</b> .....	70
<b>Cálculo de pérdida total</b> .....	71
<b>Pérdida por fricción</b> .....	72
<b>Pérdidas por accesorios o perdidas menores</b> .....	77
<b>Obtención de la altura útil</b> .....	78
<b>Criterio uno</b> .....	78
<b>Obtención de la Potencia de la turbina</b> .....	79
<b><i>Dimensionamiento de la turbina</i></b> .....	80
<b>Análisis de costos</b> .....	87
<b>RENTABILIDAD DEL PROYECTO</b> .....	87
<b>CAPITULO IV</b> .....	89
<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS</b> .....	89
<b>Variable elevación del agua del embalse Pao Cachinche</b> .....	89
<b>Variable volumen del embalse Pao Cachinche</b> .....	95
<b>Variable área del embalse Pao Cachinche</b> .....	99
<b>Análisis comparativo</b> .....	103
<b>Variable caudal de entrada del embalse Pao Cachinche</b> .....	105
<b>Variable caudal de salida del embalse Pao Cachinche</b> .....	110
<b>Variable caudal de alivio del embalse Pao Cachinche</b> .....	114
<b>Variable caudal ecológico del embalse Pao Cachinche</b> .....	119
<b>Variable caudal de bombeo o extracción, del embalse Pao Cachinche</b> .....	124
<b>Series de tiempo para la variables hidroenergéticas</b> .....	129
<b><i>Resumen estadístico de las variables hidroenergéticas del embalse Pao Cachinche</i></b> .....	132
<b><i>Potencial Hidroeléctrico</i></b> .....	133
<b>Obras de ingeniería del embalse Pao Cachinche</b> .....	135

<b>Obras de toma</b> .....	135
<b>Túnel De Desviación</b> .....	137
Compuerta de Emergencia .....	138
Bifurcación de la toma .....	138
Descarga.....	139
Aliviadero .....	140
Bibliografía.....	153

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Central hidroeléctrica de pie de presa .....	40
<b>Figura 2:</b> Esquema general de un aprovechamiento hidroeléctrico a pequeña escala .....	42
<b>Figura 3:</b> Turbina pelton in situ.....	50
<b>Figura 4:</b> Embalse Guataparo (Google Earth, 2016).....	52
<b>Figura 5:</b> Ficha técnica embalse Guataparo (Ambiente, 2016). .....	52
<b>Figura 6:</b> Embalse Cachinche (Google Earth, 2016).....	53
<b>Figura 7:</b> Ficha técnica Embalse Pao Cachinche (Ambiente, 2016).....	53
<b>Figura 8:</b> Embalse Canoabo (Google Earth, 2016).....	54
<b>Figura 9:</b> Ficha técnica embalse Canoabo (Ambiente, 2016).....	54
<b>Figura 10:</b> Inicio de software. STATGRAPHICS. ....	59
<b>Figura 11:</b> Fuente de datos. STATGRAPHICS. ....	60
<b>Figura 12:</b> Origen de los datos. STATGRAPHICS.....	61
<b>Figura 13:</b> Representación inicial de los datos. STATGRAPHICS. ....	61
<b>Figura 14:</b> Análisis de variables. STATGRAPHICS.....	62
<b>Figura 15:</b> Selección de variables. STATGRAPHICS. ....	62
<b>Figura 16:</b> Gráficas análisis de una variable. STATGRAPHICS.....	63
<b>Figura 17:</b> Series de tiempo. STATGRAPHICS. ....	64
<b>Figura 18:</b> Series de tiempo, Selección de variable. STATGRAPHICS. ....	64
<b>Figura 19:</b> Series de tiempo, Resultados. STATGRAPHICS. ....	65
<b>Figura 20:</b> Pronósticos. STATGRAPHICS.....	66
<b>Figura 21:</b> Resultados de pronósticos. STATGRAPHICS. ....	66
<b>Figura 22:</b> Ajuste de datos. STATGRAPHICS.....	67
<b>Figura 23:</b> Ajuste de distribuciones. STATGRAPHICS.....	68
<b>Figura 24:</b> Gráficas de ajuste de distribuciones. STATGRAPHICS. ....	68
<b>Figura 25:</b> Perfil longitudinal esquemático de la toma (Suarez, 1999). ....	71
<b>Figura 26:</b> Viscosity and Density of Water at 1atm (White, 2000).....	73
<b>Figura 27:</b> Recommended roughness values (White, 2000).....	75
<b>Figura 28:</b> Diagrama de Moody (White, 2000). ....	76
<b>Figura 29:</b> Selección de la turbina. (Castro, 2006) .....	79
<b>Figura 30:</b> Velocidades posibles del campo giratorio en generadores.....	82
<b>Figura 31:</b> Dimensiones del rodete (Zapico, 2002).....	84
<b>Figura 32:</b> Dimensiones del caracol (Zapico, 2002). ....	86
<b>Figura 33:</b> Dimensiones de la cámara espiral (Zapico, 2002). ....	86
<b>Figura 34:</b> Histograma de la variable elevación. ....	91
<b>Figura 35:</b> Dispersión de ocurrencia de datos para la variable elevación.....	92
<b>Figura 36:</b> Frecuencia relativa para la variable Elevación. ....	93
<b>Figura 37:</b> Frecuencia relativa para la variable Elevación. Embalse Pao Cachinche. ....	94
<b>Figura 38:</b> curvas de ajuste de distribuciones para la variable Volumen .....	96

<b>Figura 39:</b> Gráfica de distribución suavizada para la variable Elevación..	97
<b>Figura 40:</b> Gráfica de dispersión para la variable Volumen.	97
<b>Figura 41:</b> Histograma de frecuencia relativa para la variable Volumen.	98
<b>Figura 42:</b> Distribución de probabilidades para la variable Área.	100
<b>Figura 43:</b> Gráfico de dispersión para la variable Área.....	101
<b>Figura 44:</b> Histograma de frecuencia relativa para la variable Área .....	101
<b>Figura 45:</b> Gráficos de caja y bigote para variables Volumen, .....	104
<b>Figura 46:</b> Ajuste de distribuciones del Caudal de Entrada. ....	106
Figura 47: Función de densidad para caudal de entrada. ....	107
<b>Figura 48:</b> Gráfico de dispersión para la variable Caudal de Entrada.....	107
<b>Figura 49:</b> Gráfico de caja y bigotes para la variable Caudal de Entrada.....	108
<b>Figura 50:</b> Histograma de frecuencia para la variable Caudal de Entrada. ....	109
<b>Figura 51:</b> Gráfica de ajuste de distribuciones para la variable Caudal de Salida. .	111
<b>Figura 52:</b> Gráfico de dispersión para la variable Caudal de Salida.....	112
<b>Figura 53:</b> Gráfico de caja y bigotes para la variable Caudal de Salida. Embalse Pao Cachinche.....	112
<b>Figura 54:</b> Histograma de frecuencia relativa para la variable Caudal de Salida. ...	113
<b>Figura 55:</b> Ajuste de distribuciones para la variable Caudal de Alivio. Embalse Pao Cachinche.....	115
<b>Figura 56:</b> Gráfica función de densidad para variable Caudal de Alivio.....	116
<b>Figura 57:</b> Gráfico de dispersión para la variable Caudal de Alivio. Embalse Pao Cachinche.....	117
<b>Figura 58:</b> Gráfico de caja y bigotes para la variable Caudal de Alivio. Embalse Pao Cachinche.....	117
<b>Figura 59:</b> Histograma de frecuencia para la variable Caudal de Alivio. Embalse Pao Cachinche.....	118
<b>Figura 60:</b> Ajuste de distribuciones para la variable Caudal Ecológico. Embalse Pao Cachinche.....	120
<b>Figura 61:</b> Gráfico de densidad suavizada para el Caudal Ecológico. Embalse Pao Cachinche.....	121
<b>Figura 62:</b> Gráfico de dispersión para la variable Caudal Ecológico. Embalse Pao Cachinche.....	122
<b>Figura 63:</b> Gráfico de caja y bigotes para la variable Caudal Ecológico.....	122
<b>Figura 64:</b> Histograma de frecuencia relativa para la variable Caudal Ecológico. Embalse Pao Cachinche.....	123
<b>Figura 65:</b> Ajuste de distribuciones para la variable Caudal de extracción. Embalse Pao Cachinche. ....	125
<b>Figura 66:</b> Gráfico de densidad para la variable Caudal de Extracción. Embalse Pao Cachinche.....	126
<b>Figura 67:</b> Gráfico de densidad para la variable Caudal de Extracción. Embalse Pao Cachinche.....	127
<b>Figura 68:</b> Histograma de frecuencia relativa para la variable Caudal de Extracción. Embalse Pao Cachinche.....	127

<b>Figura 69:</b> Series de tiempo para las variables: Elevación, Volumen y Área. Embalse Pao Cachinche. (2006-2016).....	129
<b>Figura 70:</b> Gráfica de comparación de caudales representativos. Embalse Pao Cachinche.....	131
<b>Figura 71:</b> Función de supervivencia para la variable caudal ecológico. Embalse Pao Cachinche.....	134
<b>Figura 72:</b> Pronósticos para la variable Elevación. Embalse Pao Cachinche. ....	134
<b>Figura 73:</b> Esquema de la Torre Toma. (Suarez, 1999) .....	137
<b>Figura 74:</b> Perfil longitudinal esquemático de la toma y descarga. (Suarez, 1999)	139

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Tipología de pequeñas centrales hidroeléctricas según ONG Soluciones Prácticas.	38
<b>Tabla 2:</b> Resumen Estadístico del Embalse Pao Cachinche. Elevación (m.s.n.m.) para la Variable Elevación de agua. STATGRAPHICS.	90
<b>Tabla 3:</b> Comparación de distribuciones alternas para la elevación del agua en el embalse Pao Cachinche	91
Tabla 4: Frecuencias para la variable Elevación ( m.s.n.m.)	93
Tabla 5: Resumen estadístico para la variable Volumen	95
<b>Tabla 6:</b> Comparación distribución de probabilidad para la variable Volumen.	96
<b>Tabla 7:</b> Histograma de frecuencia para el variable volumen (Hm <sup>3</sup> ).	98
<b>Tabla 8:</b> Resumen estadístico para la variable Área ( Ha).	99
<b>Tabla 9:</b> Comparación de Distribuciones Alternas para la variable Área.	100
<b>Tabla 10:</b> Histograma de frecuencias para la variable Área.	102
<b>Tabla 11:</b> Análisis comparativo de las variables Área, Volumen, Elevación.	103
<b>Tabla 12:</b> Resumen estadístico de la variable Caudal de entrada (m <sup>3</sup> /s).	105
Tabla 13: Comparación de Distribuciones Alternas para la variable Caudal de Entrada (m <sup>3</sup> /s).	106
<b>Tabla 14:</b> Frecuencias para Caudal de Entrada. Embalse Pao Cachinche.	109
<b>Tabla 15:</b> Resumen estadístico de la variable Caudal de Salida. Embalse Pao Cachinche.	110
<b>Tabla 16:</b> Tabla de Comparación de Distribuciones Alternas para la variable Caudal de Salida. Embalse Pao Cachinche	111
<b>Tabla 17:</b> Histograma de frecuencia relativa para la variable Caudal de Salida. Embalse Pao Cachinche.	113
<b>Tabla 18:</b> Resumen estadístico para la variable Caudal de Alivio. Embalse Pao Cachinche.	114
<b>Tabla 19:</b> Distribución de probabilidades para la variable Caudal de Alivio. Embalse Pao Cachinche.	116
<b>Tabla 20:</b> Frecuencias para la variable Caudal de Alivio (m <sup>3</sup> /s).	118
Tabla 21: Resumen Estadístico para Caudal Ecológico (m <sup>3</sup> /s).	119
<b>Tabla 22:</b> Comparación de Distribuciones Alternas para la variable Caudal Ecológico.	120
<b>Tabla 23:</b> Frecuencias para Caudal Ecológico (m <sup>3</sup> /s). Embalse Pao Cachinche.	123
<b>Tabla 24:</b> Resumen Estadístico para la variable Caudal de bombeo m <sup>3</sup> /s.	124
<b>Tabla 25:</b> Comparación de Distribuciones Alternas para la variable Caudal de Extracción (m <sup>3</sup> /s)	125
<b>Tabla 26:</b> Frecuencias para la variable Caudal de Extracción (m <sup>3</sup> /s). Embalse Pao Cachinche.	128
<b>Tabla 27:</b> Resumen estadístico de las variables hidroenergéticas. Embalse Pao Cachinche.	132
<b>Tabla 28:</b> Nivel de los puntos medios de las compuertas de la Torre- Toma. Embalse Pao Cachinche (HIDROCENTRO).	136

## **CAPITULO I**

### **EL PROBLEMA**

#### **Planteamiento del problema**

Las energías con altas emisiones de gases de efecto invernadero constituyen hoy cerca del 80% de la energía que se consume en el mundo. En 2015 se celebró en la ciudad de París en Francia la COP21, según este organismo la temperatura máxima del planeta no debe aumentar por encima de 2°C para que no se produzcan efectos meteorológicos irreversibles que pongan en serio peligro amplias zonas del mundo.

Según IRENA (2015) se calcula que se necesitará un 50% más de energía en 2030 en comparación con la actualidad. Durante una de las conferencias de la Cuarta Asamblea, Adnan Z. Amin, Director General de IRENA, declaró que existen fuertes motivos económicos y medioambientales para realizar una transición hacia las energías renovables, como la mitigación del cambio climático y frenar el impacto para la salud debido a la contaminación y por otro lado la creación de empleo.

La energía renovable se convertirá en la mayor fuente individual de electricidad en los próximos cinco años, señaló la agencia internacional de energía en un informe (AIE, 2015).

Venezuela es el país con mayor consumo de energía eléctrica per cápita en Latinoamérica, según cifras de la Comisión de Integración Energética Regional (CIER, 2014). Las autoridades nacionales han confirmado el alto consumo de electricidad y lo han atribuido a la amplia oferta, a la capacidad instalada y a las bajas tarifas del servicio, así lo evidencia la cifra de consumo

nacional que para el 2012 se ubicó en 18000 megavatios y la alta capacidad de generación instalada, en la que Venezuela ocupa el primer lugar entre los países de la región.

Venezuela cuenta con una generación neta de 4.179 kilovatios por hora por habitante (BM, 2015; INE, 2014; CEPAL, 2013). Por su parte, el Ministerio para la Energía Eléctrica, refiere que el Sistema Eléctrico Nacional comprende actualmente un equipamiento y capacidad instalada de generación que supera los 25.000 megavatios, de los cuales más del 70% son de tipo hidráulico y representan el 2,6 del total de este tipo de sistema de generación en el mundo (MPPEE, 2015).

Los problemas de electricidad en Venezuela no son recientes. La deficiencia del sistema nacional de energía se ha evidenciado con decenas de miles de apagones desde hace varios años en diversas comunidades a lo largo y ancho del país. Aparece otro factor que tiene que ver con fallas en el suministro de energía, lo que ha hecho que la capacidad de generación sea superada por la demanda. La crisis energética nacional que se extendió entre los años 2009-2013 dejó secuelas que aún se padecen. Hoy en Venezuela son constantes los apagones e interrupciones del servicio eléctrico, que deteriora la calidad de vida de los venezolanos, tan sólo en el año 2014, los apagones aumentaron hasta en un 185%, según datos extra oficiales que maneja el Comité de Afectados por los Apagones (2015). El comité de afectados por los apagones (2014) lleva un registro por entidad sobre la cantidad de interrupciones en el suministro del servicio eléctrico en el país, desde enero de 2012 hasta mayo de 2014 esta organización ha cuantificado 59020 apagones.

El ingeniero Winston Cabas, director ejecutivo de la Comisión Eléctrica del Colegio de Ingenieros de Venezuela, declara: en los últimos años no se han

instalado las líneas de transmisión adecuadas. El especialista asegura que el sistema eléctrico de Venezuela tiene una capacidad instalada de entre 25 y 30 mil megavatios pero que, en contraste, tiene una disponibilidad operativa de apenas 18 mil megavatios, por el deterioro de las instalaciones y de las líneas de transmisión. Según Cabas, la demanda actual de energía eléctrica en el país ronda los 17 y 19 mil megavatios. Luis Motta Domínguez, ministro para la Energía Eléctrica (2016), informó que Venezuela podría verse envuelto en un colapso energético para el mes de abril si no se racionaba, pero, la sobreutilización de 110 gigavatios hora diarios del embalse de Guri podría acelerar la fecha.

En esta investigación se presenta una propuesta de adaptación del embalse Pao Cachinche con fines de generación hidroenergética; lo que podría suponer cubrir la demanda eléctrica de sectores del Estado Carabobo en aquellas situaciones donde se requiera hacer mantenimiento del Sistema Eléctrico Nacional.

### **Formulación del problema**

1. ¿Cuáles son las variables hidroenergéticas del embalse Pao Cachinche?
2. ¿Cuál es la capacidad hidroenergética del embalse Pao Cachinche?
3. ¿Cuál es la factibilidad técnico económica de instalar una turbina en los embalse Pao Cachinche?

## **Objetivo general**

Analizar la capacidad hidroenergética del embalse Pao Cachinche.

## **Objetivos específicos**

1. Describir las variables hidroenergéticas de embalse Pao Cachinche.
2. Diseñar el sistema de generación hidroeléctrica.
3. Analizar la factibilidad económica del sistema de generación hidroeléctrica.

## **Justificación**

Mediante el presente trabajo se propone realizar un análisis hidroenergético de la capacidad del embalse Pao Cachinche, este análisis es un paso previo a la posible instalación de una pequeña central hidroeléctrica y la selección de su turbina. Es necesario un suministro energético abundante, fiable y respetuoso con el medio ambiente, la transición a un modelo energético bajo en emisiones de gases de efectos invernaderos va a ser larga y serán los avances tecnológicos los que fomentaran el cambio.

La producción de electricidad a través de pequeñas centrales hidroeléctricas no es solución definitiva a la problemática existente en Venezuela, sin embargo ayudaría a mitigar dicha problemática y mejorar la

calidad de vida de los ciudadanos, colaborando de esta manera con el bienestar social de la población. La energía producida a través del uso de pequeñas centrales hidroeléctricas será incorporada al sistema nacional de energía y de esta manera ayudar a satisfacer la demanda de energía debido al incremento de la población y las industrias.

El presente trabajo contribuye y consolida la línea de investigación del Centro de Investigaciones Hidrológicas y Ambientales de la Universidad de Carabobo (CIHAM-UC) además sirve de base para futuros análisis hidroenergéticos que podrían realizarse en otras casas de estudio e instituciones del país, que así lo requieran.

### **Alcances y limitaciones**

En la presente investigación solo se propone el análisis hidroenergético del embalse Pao Cachinche ubicado en el estado Carabobo, no se tomara en cuenta las estadísticas o datos de la demanda y oferta de energía en el Estado Carabobo.

Para este estudio se tiene como datos los balances hídricos del embalse Cachinche desde el año 1983 hasta el año 2016, suministrados por Hidrocentro.

## **CAPITULO II**

### **FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

En el presente capítulo se presentan los antecedentes y bases teóricas que respaldan el presente trabajo de investigación.

#### **Antecedentes**

En enero del año 2016 fue presentado en Quito capital de la república del Ecuador, el trabajo “Estudio de prefactibilidad eléctrica para el proyecto de generación hidroeléctrica Santa Ana para la empresa PIL-HIDRO”. Este estudio fue presentado por Carlos Alberto Vélez ante la Escuela Politécnica Nacional, previo a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico. Este análisis se fundamenta en aspectos técnicos y establece criterios generales para la evaluación inicial del proyecto, desde el punto de vista eléctrico y económico. Se evalúa la información referente a las características hídricas particulares del proyecto, en contraste con el salto neto que presta su topografía. Una vez establecidas estas características iniciales se describe el equipamiento eléctrico y electromecánico de la casa de máquinas, tal es el caso de las turbinas y el generador eléctrico. Finalmente se hace una estimación del costo

de la infraestructura y equipamiento necesarios para llevar a cabo el proceso de generación de energía eléctrica.

En el año 2015 Eduardo Martínez Prado presento su tesis Doctoral ante la Universidad de la Rioja con sede en España, esta tesis Doctoral tiene por título “Optimización de minicentrales hidroeléctricas dedicadas a otros usos”. De todos los sistemas de generación de energía este estudio se centra en los hidroeléctricos, en concreto en la optimización de minicentrales hidroeléctricas dedicadas a otros usos, de centrales de agua fluyente y presión media, implementadas en instalaciones de tratamiento de agua potable, (ETAP) cuyo principal objetivo no es la producción de energía eléctrica. Las características particulares de este tipo de instalaciones (ETAP), hace que se necesiten sistemas de predicción y gestión, distintos y adaptados, esencialmente diferentes de los puramente destinados a la generación de energía eléctrica y hacer que sean más eficaces, eficientes, ecológicas, sostenibles, económicas y rentables, y que supone el principal objetivo de esta tesis.

En el año 2014 la revista Ciencia & Futuro, revista científica del instituto superior minero metalúrgico con sede en Cuba, divulgo la investigación realizada por Yonk Maikel Borges Matos la cual llevo por título “Evaluación de la generación de la pequeña central hidroeléctrica de Moa”. Se realizó una evaluación del impacto económico que ha tenido la generación de energía eléctrica de la Pequeña Central Hidroeléctrica de Moa, para ello se realizó una caracterización de la instalación y del sistema de distribución municipal. Se describieron los resultados del análisis de la demanda y la generación, además, se realizó la valoración económica y ambiental determinando los costos, tanto de agua consumida, en función de la generación, como la cantidad y valor del combustible ahorrado.

En el año 2014 Christopher Canchaya y Luis Chero presentaron en Lima Perú su tesis de grado ante la Universidad Peruana de las Ciencias (UPC), para optar al título profesional de Ingeniero Civil, este trabajo tiene como título “Estudio y diseño a nivel preliminar de una pequeña central hidroeléctrica en el distrito de Comas, provincia de Concepción perteneciente al departamento de Junín”. La presente tesis enuncia y pretende demostrar la viabilidad de desarrollar un proyecto de una pequeña central Hidroeléctrica en el pueblo de Comas, en la provincia de Concepción del departamento de Junín, para lo cual se realiza un análisis tanto de la demanda del recurso hídrico como de la demanda energética de la zona, con lo que posteriormente se realiza un predimensionamiento de las estructuras hidráulicas y de los demás equipos electromecánicos para obtener un presupuesto. Finalmente mediante un análisis económico en el que se evalúan distintos escenarios, se sustenta y a su vez se propone la mejor alternativa para garantizar la viabilidad del proyecto.

En Venezuela en Mayo de 2016 los bachilleres González Noriuska y María Hoyles presentaron su trabajo especial de grado ante la ilustre Universidad de Carabobo para optar al título de Ingeniero Civil, este trabajo llevo por título “Análisis de la capacidad hidroenergética del embalse pao la balsa, estado Cojedes”. Esta investigación se caracterizó por ser del tipo descriptiva, ya que a través de la recolección de datos fueron analizadas las variables hidroenergéticas del embalse; este estudio se llevó a cabo mediante el uso de un software estadístico, encontrando que las mismas han presentado poca variabilidad en el período 2005 – 2015. Por otro lado, este estudio se limitó solo al diseño de las obras que conforman el sistema de generación hidroeléctrica, no se toman en cuenta las áreas de influencia de la central en conjunto con los sistemas eléctricos de distribución asociados al embalse. Con la aplicación de criterios de diseño, la alternativa de caudal 1 m<sup>3</sup>/s y salto neto de 7,883 m es capaz de generar 73,394 kW de potencia, mientras que la alternativa II de

caudal 0,5 m<sup>3</sup>/s y salto de 15,872 m es capaz de generar 73,884kW de potencia, ambas a través de una turbina tipo Francis. Asimismo, se determinó que ambas alternativas son factibles económicamente.

En Venezuela en el año 2015 los bachilleres Rebolledo Marioxy y Gonzales Cesar presentaron ante la Universidad de Carabobo su tesis de grado titulada “Análisis de la capacidad hidroenergética de los embalses del estado Lara”, para optar al título de Ingeniero Civil. Este estudio Analiza el potencial hidroeléctrico de uno de los cuatro embalses ubicados en el estado Lara, como es el llamado “Dos Cerritos” localizado a cuatro (4) Km de la población de El Tocuyo y cuyo propósito es el abastecimiento de agua potable. Para alcanzar la meta planteada fue necesario realizar un análisis de los balances hídricos del embalse “Dos Cerritos”, estudiando particularmente el periodo comprendido entre los años 1988 y 2009. El estudio se limitó solo al mencionado embalse. El estudio de las variables hidráulicas se realizó a través del programa STATGRAPHICS, Centurion 15.2, obteniendo como resultado que el embalse Dos Cerritos, para valores promedio de caudal y carga, es capaz de generar 503.41 kW de potencia, mediante una turbina Francis, y que el costo de instalar una pequeña central hidroeléctrica es más económico, si se compara con otras fuentes de energía eléctrica como las centrales termoeléctricas.

En el año 2012 en Venezuela los bachilleres Alba Montes y Anna Sudano presentaron ante la Universidad Rafael Universidad su trabajo de grado el cual llevó por título “Diseño hidráulico de pequeñas centrales hidroeléctricas en ríos de bajo caudal”. Esta investigación tuvo por objetivo realizar el diseño hidráulico de microcentrales hidroeléctricas para ríos de bajo caudal con la ayuda de una extensa revisión bibliográfica. Datos obtenidos en el ministerio del poder popular para el ambiente (MINAMB), el instituto nacional de

estadística (INE) y el Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar (IVGSB). Esta investigación se caracterizó por ser un estudio descriptivo ya que mediante la recolección de datos se realizaron estudios sobre el diseño hidráulico, encontrando la altura neta, caudal de diseño, potencia y rendimiento entre otros; Se seleccionó la turbina y el tipo de turbina a utilizar. Su técnica de recolección de datos fue principalmente la revisión documental. Para el diseño de la pequeña central hidroeléctrica, se utilizó como referencia el río Guasare, ubicado en el estado Zulia, con el fin de contar con datos alusivos a un río de bajo caudal; lo que se pretende dejar claro con esto, es que dicho diseño servirá para cualquier río de bajo caudal que cumpla con las especificaciones nombradas en el desarrollo del mismo.

En Venezuela en el año 2010 el bachiller Esteban Grossmann Otaola presento ante la Universidad Metropolitana su tesis de grado titulada “Estudio hidráulico en la cuenca del río caroni para ubicación de una microcentral hidroeléctrica”. El propósito de esta investigación consistió en la realización de un estudio hidráulico en la desembocadura del río Karuay en el río Caroní, para determinar la ubicación de una microcentral hidroeléctrica, específicamente hidrocínética, que transforme la energía cinética del río Caroní en energía eléctrica útil para abastecer la demanda energética de la Comunidad de Karuaiken durante todo el año. Para ello fue necesaria la recolección de información hidrológica sobre la desembocadura del río Karuay y una estimación de la demanda energética de la Comunidad de Karuaiken. Luego se determinó la ubicación de la microcentral basado en las condiciones hidráulicas del río y características técnicas de la misma. Finalmente se realizó un estudio del potencial hidroeléctrico y se presentó una propuesta económica. Así mismo, se determinó que una turbina de río ubicada en la desembocadura del río Karuay, de eje inclinado con respecto al nivel del agua, con un diámetro nominal de 1,35 m. es capaz de generar suficiente hidroelectricidad para

abastecer la demanda energética de la Comunidad de Karuaiken durante todo el año. Inclusive, en algunos meses del año podría ser capaz de generar suficiente electricidad como para abastecer la demanda energética de 15 comunidades de igual consumo eléctrico.

## **MARCO LEGAL**

La presente investigación se enmarca dentro del decreto N°624, De fecha 7 de diciembre de 1989, el cual establece lo siguiente:

Considerando que los embalses y sus áreas adyacentes por ser de alto valor escénico y productivo ofrecen otras opciones de usos adicionales a las de abastecimiento poblacional, riego, defensa contra inundaciones y suministro de energía eléctrica y pueden ser aprovechados racionalmente como zonas para el turismo y la recreación, educación, investigación científica y producción de alimentos.

### **Capítulo I**

**Artículo 1:** el presente decreto tiene por objeto establecer las normas generales por las cuales se regirá el aprovechamiento, la administración y manejo de los embalses, incluyendo el cuerpo de agua propiamente dicho y sus áreas adyacentes, en cuanto a la asignación de los usos permisibles regulación de las actividades y las modalidades de administración propiamente dichas para asegurar que tales espacios puedan ser aprovechados atendiendo a los principios de conservación, defensa y mejoramiento del ambiente.

## Capítulo II

### Sección I, del uso de las aguas

**Artículo 5:** los usos primarios de los embalses abarcan el abastecimiento a poblaciones, riego, generación de hidroelectricidad, control de crecientes y control de la calidad de las aguas. Otros usos asociados a estos son el turístico y recreacional, el educacional, el de investigación científica, la acuicultura y la pesca.

**Artículo 6:** el aprovechamiento de las aguas se realizará de acuerdo a los usos primarios para los cuales fué constituido el embalse y contemplará otros usos siempre y cuando estos no generen conflictos con los usos primarios, conforme a lo dispuesto en estas normas y al ordenamiento legal vigente sobre la materia.

**Artículo 7:** el uso turístico y recreacional deberá cumplir las condiciones que para cada caso se asignan al uso de las aguas y al de preservación paisajística, contenido en los planes de ordenación del territorio y aprovechamiento de recursos hidráulicos.

**Artículo 8:** los usos turísticos y recreacionales que podrán permitirse en las áreas adyacentes de protección del embalse y en la zona no inundada del vaso de almacenamiento son:

- Construcción de canchas deportivas, áreas de juegos infantiles y balnearios.

- Instalación de miradores, cominerías y similares.
- Sitios de camping, kioscos, áreas para carpas.
- Campamentos turísticos, contempla alojamiento en cabañas las cuales deben ser dotadas de servicios sanitarios, así como de otros servicios complementarios como sistemas de deposición y control de desechos sólidos y líquidos.
- Sitio de resguardo de embarcaciones.
- Posadas turísticas, contempla alojamiento en cabañas, preferiblemente construida con materiales propios del lugar, que no alteren los valores paisajísticos, debe contar con servicios sanitarios y complementarios idénticos a los de campamentos turísticos
- Rampas de inspección de embarcaciones, comprende la carga y descarga de personas y amarre temporal de embarcaciones.
- Patios de estacionamiento de automotores y remolque de lanchas.

Las actividades permitidas en el embalse serán; paraguisismo y velerismo y actividades deportivas con embarcaciones a remo a motor, pesca deportiva y natación.

La casa con fines deportivos se permitirá en aquellos embalses que se han prestado hasta el presente a ese propósito y en todo caso será regulado por el respectivo reglamento de uso.

El baño y la natación podrán permitirse en aquellos embalses cuyo uso y destino del agua no sea el de abastecimiento de poblaciones, en estas últimas, esas actividades podrán permitirse cuando su volumen y extensión superficial le confieran suficiente capacidad de autodepuración de la contaminación orgánica y ello será establecido en el respectivo reglamento de uso, de conformidad con el instituto regional de obras sanitarias.

### **Sección III, de la investigación científica**

**Artículo 11:** se consideran actividades de investigación aquellas que tengan por objeto realizar estudios o investigaciones científicas para el control cabal de los ecosistemas representativos del área y del comportamiento de especies introducidas que coadyuven a mejorar el aprovechamiento, trabajo, administración del área inundada del vaso de almacenamiento del embalse y de sus áreas adyacentes.

**Artículo 13:** la investigación científica la podrán realizar personas o instituciones nacionales o extranjeras que cumplan con los requisitos exigidos por nuestra legislación. Los resultados de toda investigación serán puestos a disposición de la nación, a través de un centro de información coordinado por el Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables.

### **Sección IV, del uso educacional**

**Artículo 14:** se consideran actividades educativas aquellas destinadas a transmitir al público en general información sobre la finalidad de los embalses y los recursos naturales existentes en el área a regular, así como la necesidad y conveniencia de conservarlos, mejorarlos y defenderlos. A tales efectos el Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables y el Instituto Nacional de Obras Sanitarias, elaborarán programas de educación ambiental específicos para embalse.

**Artículo 15:** el uso educacional se podrá dar bajo la modalidad de educación no formal.

En cuanto a las actividades a desarrollarse en el área adyacente de protección de los embalses tenemos:

Giras interpretativas que consistirán en un recorrido guiado por sitios de mayor interés, así como senderos naturales que contarán con la asistencia de guías o del material autoguiado a los fines de realizar una interpretación de la naturaleza.

En el área inundada del vaso de almacenamiento: giras interpretativas.

Esta investigación también se enmarca dentro de la Gaceta Extraordinaria N°4599 de fecha 1 de julio de 1993, esta gaceta establece lo siguiente:

*“plan de ordenamiento y reglamento de uso de la zona protectora de la cuenca alta y media del río Pao”.* Garantizar la conservación integral si como el potencial como fuente generadora y reguladora del recurso hídrico de la zona protectora de la cuenca alta y media del río Pao.

## **Capítulo II**

### **De las unidades de ordenamiento**

**Unidad IV:** Denominada “protección de embalses y áreas adyacentes”, abarca una superficie de 20813,6 hectáreas, que corresponden al 7,8% en relación al área total de la cuenca. Comprende las tierras ubicadas alrededor de los embalses guataparo, pao-cachinche y pao-la balsa, así como los espejos de agua respectivos. Los linderos que demarcan estas áreas se

establecen por los polígonos de expropiación correspondiente a cada uno de los embalses.

Actualmente están establecidos usos agrícolas y pecuarios de mediana a alta rentabilidad, uso recreacional, usos urbanos y aprovechamiento de la fauna, lo cual amerita con carácter prioritario elaborar los planes de ordenamiento y la reglamentación respectiva a escala más detallada, siguiendo las normas generales para el uso de los embalses construidos por el estado venezolano y sus áreas adyacente.

### **Capítulo III**

#### **De los programas operativos**

**Artículo 5:** los programas operativos son instrumentos dirigidos al ejercicio de la actividad de control de todos aquellos ámbitos necesarios para garantizar el objetivo de la zona protectora. Comprenderán las actividades de regulación del aprovechamiento de los recursos naturales renovables, la recuperación de las áreas degradadas, la prevención y control de la contaminación, la educación ambiental, la investigación, la prevención de incendios, entre otros y son los siguientes:

Programa de conservación de suelos y aguas.

Programa de extensión conservacionista.

Programa de prevención y defensa del ambiente.

Programa proyectos de investigación. Subdividido en el siguiente **subprograma:** subprograma recurso agua, el cual tiene como finalidad profundizar en el conocimiento y estudios de los recursos hídricos en la cuenca.

Esta investigación también se enmarca dentro de la Ley Orgánica Del Sistema Y Servicio Eléctrico (Gaceta Oficial N° 39.573 del 14 de diciembre de 2010) en sus artículos:

## **TÍTULO I**

### **DISPOSICIONES FUNDAMENTALES**

#### **Capítulo I**

##### **Principios Rectores y Aspectos Fundamentales**

**Artículo 10. Soberanía Tecnológica.** El Estado, atendiendo al principio de soberanía tecnológica, dictará medidas que propicien la inversión nacional para fortalecer el sector eléctrico, mediante la creación y consolidación de empresas, cooperativas o asociaciones del Poder Popular que construyan obras, produzcan y suministren bienes y servicios que sirvan de insumos a las actividades del Sistema Eléctrico Nacional. El operador y prestador del servicio a que se refiere esta Ley deberá privilegiar en sus procesos de contratación la participación efectiva de talento humano y la adquisición de bienes y servicios nacionales en las actividades del Sistema Eléctrico Nacional. El Estado, a través del operador y prestador del servicio a que se refiere esta Ley, podrá conformar empresas mixtas destinadas a la construcción de obras, producción y suministro de bienes y servicios que sirvan de insumos a las actividades del Sistema Eléctrico Nacional. A tal efecto, el Estado se reservará el control de las decisiones y operación de las mismas, al mantener una participación no menor del sesenta por ciento (60%) de su capital social.

## **Capítulo II**

### **De la Planificación para la Prestación del Servicio Eléctrico.**

**Artículo 18. Desarrollo de áreas estratégicas y uso racional y eficiente de fuentes primarias.** La Planificación de las actividades del Sistema Eléctrico Nacional para la prestación del servicio estimulará el desarrollo de áreas estratégicas y el uso racional y eficiente de las fuentes primarias de producción de energía eléctrica, sin perjuicio de las áreas pobladas, agrícolas, forestales, mineras y bajo régimen de administración especial, conforme a los principios rectores, con sujeción a la presente Ley, su Reglamento y la legislación aplicable.

**Artículo 21. Contenido del Plan de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional.** El Plan de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional se enmarcará en el Plan Nacional de Desarrollo Económico y Social de la Nación, en concordancia con los lineamientos de política económica, energética y ordenamiento territorial del Estado. Contendrá, al menos:

1. Políticas de desarrollo del sector, con especial atención a las áreas no servidas.
2. Estimación de la demanda eléctrica nacional.

3. Estrategias y proyectos para la expansión del Sistema Eléctrico Nacional.

4. Acciones orientadas a impulsar el uso de las fuentes alternativas de energía, renovables y ambientalmente sostenibles.

5. El uso racional y eficiente de la energía eléctrica.

6. Las demás que el Ministerio del Poder Popular con competencia en materia de energía eléctrica considere necesarias.

## TÍTULO II

### DE LAS PERSONAS QUE INTERVIENEN EN LA PRESTACIÓN DEL SERVICIO ELÉCTRICO

#### Capítulo V

##### De la Participación.

**Artículo 40. Apoyo de las instituciones de educación y centros de investigación.** Las instituciones de educación y los centros de investigación apoyarán al Ministerio del Poder Popular con competencia en materia de energía eléctrica, al operador y prestador del servicio y a las organizaciones del Poder Popular, para el desarrollo del sector eléctrico. Asimismo, el Ministerio del Poder Popular con competencia en materia de energía eléctrica y el operador y prestador del servicio deberán colaborar con las instituciones de educación superior en las pasantías, trabajos de grado, tesis, entre otros, afines al sector eléctrico.

**Artículo 41. Mesas Técnicas de Energía.** Las Mesas Técnicas de Energía como integrantes de la estructura del Poder Popular, tienen la responsabilidad de participar en la planificación para la prestación del servicio eléctrico en sus comunidades, para lo cual el operador y prestador del servicio debe asistirles en la definición de las características y especificaciones técnicas requeridas para la elaboración de proyectos relacionados con sus necesidades.

### **TÍTULO III**

## **DE LAS ACTIVIDADES DEL SISTEMA ELÉCTRICO NACIONAL PARA LA PRESTACIÓN DEL SERVICIO**

### **Capítulo I**

#### **De la Generación, Transmisión y Despacho del Sistema Eléctrico**

**Artículo 44. Generación en Sistemas Independientes.** El operador y prestador del servicio eléctrico es el encargado de la instalación y operación de las plantas de generación en sistemas independientes, dándose prioridad al empleo de fuentes alternativas de energía y de bajo impacto al ambiente, de conformidad con el Plan de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional y demás normas vigentes.

De igual manera esta investigación también estará enmarcada bajo la Ley Orgánica Del Ambiente (Gaceta Oficial N°5.833 viernes 22 de diciembre de 2006) en sus artículos:

**TÍTULO III**  
**DE LA PLANIFICACIÓN DEL AMBIENTE**  
**Capítulo I**  
**De la Planificación del Ambiente**

**Artículo 22. Finalidad.** La planificación del ambiente constituye un proceso que tiene por finalidad conciliar el desarrollo económico y social con la gestión del ambiente, en el marco del desarrollo sustentable.

**Artículo 23. Lineamientos para la planificación del ambiente.**

Los lineamientos para la planificación del ambiente son:

1. La conservación de los ecosistemas y el uso sustentable de éstos asegurando su permanencia.
2. La investigación como base fundamental del proceso de planificación, orientada a determinar el conocimiento de las potencialidades y las limitaciones de los recursos naturales, así como el desarrollo, transferencia y adecuación de tecnologías compatibles con desarrollo sustentable.
3. La armonización de los aspectos económicos, socioculturales y ambientales, con base en las restricciones y potencialidades del área.
4. La participación ciudadana y la divulgación de la información, como procesos incorporados en todos los niveles de la planificación del ambiente.

5. La evaluación ambiental como herramienta de prevención y minimización de impactos al ambiente.

6. Los sistemas de prevención de riesgos para garantizar su inserción en los planes nacionales.

**Artículo 24. Dimensión ambiental.** La planificación del ambiente forma parte del proceso de desarrollo sustentable del país. Todos los planes, programas y proyectos de desarrollo económico y social, sean de carácter nacional, regional, estatal o municipal, deberán elaborarse o adecuarse, según proceda, en concordancia con las disposiciones contenidas en esta Ley y con las políticas, lineamientos, estrategias, planes y programas ambientales, establecidos por el ministerio con competencia en materia de ambiente.

## **DEFINICIONES DE TERMINOS**

### **Embalse**

Es un depósito de agua que se forma de manera artificial. Lo habitual es que se cierre la boca de un valle a través de una presa o de un dique, almacenando el agua de un río o de un arroyo. Con dichas aguas, se puede abastecer a poblaciones cercanas, producir energía eléctrica o regar terrenos.

La definición de lo que es una pequeña central hidroeléctrica P.C.H se aborda desde distintos puntos de vista. Generalmente se busca el ángulo cuantitativo y técnico, es decir, su capacidad instalada, el salto de agua o caudal, su vinculación con el sistema eléctrico global, tipo de tecnología, etc.

Tomando como base esos parámetros, se presenta a continuación la definición y clasificación adoptada por la OLADE.

### **Definición general de p.c.h.**

Una pequeña central hidroeléctrica es una instalación donde se utiliza la energía hidráulica para generar reducidas cantidades de electricidad, desde 5 kW hasta 5.000 kW aproximadamente, por medio de uno o más conjuntos o grupos turbina-generador. Las centrales hidroeléctricas aprovechan la energía potencial de una caída de agua (natural o artificial), energía creada por el desnivel entre los puntos extremos de la caída. La energía potencial se transforma en energía cinética que las centrales convierten en energía mecánica mediante una turbina y luego en energía eléctrica mediante un generador.

La potencia de una central hidroeléctrica es proporcional a la caída y al caudal y permite determinar el tamaño de una central. Pero no existe un consenso para definir las potencias a las cuales se considera que una central hidroeléctrica es una microcentral. En la literatura disponible destacan en general límites desde 5 Kw como potencia mínima hasta centenas de kilovatios como máximo, por ejemplo 100, 300 o 500 kW. La clasificación adoptada por la ONG Soluciones Prácticas es la siguiente:

	<b>Picocentral</b>	<b>Microcentral</b>	<b>Minicentral</b>
<b>Potencia</b>	100 W – 10 kW	10 kW – 100 kW	100 kW – 1 MW

*Figura 1: Tipología de pequeñas centrales hidroeléctricas según ONG Soluciones Prácticas.*

Las MCH pueden ser clasificadas en diferentes categorías, tampoco rígidas:

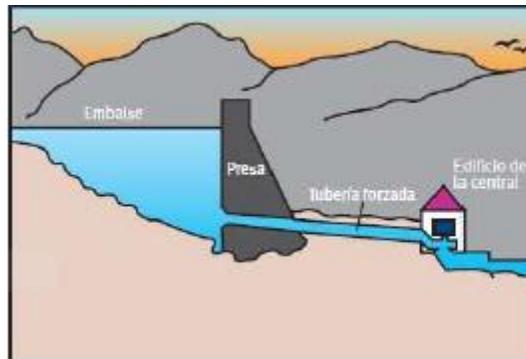
- Centrales de alta caída: > 100 m
- Centrales de media caída: 30-100 m
- Centrales de baja caída: 2-30 m

Esta clasificación por altura de caída es importante porque ya conlleva una información sobre la máquina que deberá ser utilizada.

Otra clasificación existe, por el tipo de régimen de flujo, que está condicionado por las características topográficas de la ubicación:

1. **Centrales de agua fluyente o de filo de agua o de pasada:** utilizan una parte del flujo de un río, desviada hasta la central para generar electricidad. Luego esta es echada de nuevo al cauce del río. Operan de forma continua, con una constante de vaciado inferior a 2 horas; este funcionamiento continuo puede limitar la potencia instalada, ya que se puede utilizar solo el agua disponible en el momento considerado.
2. **Centrales de embalse o de pie de presa:** se utiliza un embalse para reservar el agua, se aprovecha el desnivel creado por la propia presa. Es el tipo más frecuente entre las grandes centrales. Sin embargo, es posible considerar la implementación de una MCH sobre un embalse que ya fue construido por otros fines, sean riego o abastecimiento de agua en poblaciones. En el caso contrario, la inversión necesitada sería demasiado alta para una central de pequeño tamaño. En las minicentrales

hidroeléctricas el volumen de almacenado suele ser pequeño, permitiendo por ejemplo producir energía eléctrica un número de horas durante el día, y llenándose el embalse durante la noche. Si la regulación es semanal, se garantiza la producción de electricidad durante el fin de semana, llenándose de nuevo el embalse durante el resto de la semana.



**Figura 1:** Central hidroeléctrica de pie de presa (Forget, 2011)

3. Centrales integradas a un canal de riego o de abastecimiento de agua: se distinguen dos tipos de centrales dentro de este grupo:  
Aquellas que utilizan el desnivel existente en el propio canal. Mediante la instalación de una tubería forzada, paralela a la vía rápida del canal de riego, se conduce el agua hacia la central, devolviéndola posteriormente a su curso normal en canal.  
Aquellas que aprovechan el desnivel existente entre el canal y el curso de un río cercano. La central en este caso se instala cercana al río y se turbinan las aguas excedentes en el canal.

## **Componentes de un aprovechamiento hidroeléctrico a pequeña escala:**

La figura 1 muestra un esquema general de un aprovechamiento hidroeléctrico a pequeña escala. A continuación se describirán sus principales componentes.

### **Presas o dique derivador**

La presa es la obra que se construye para cerrar una garganta y conformar el vaso de almacenamiento en aquellos desarrollos con regulación. Esta puede ser construida con diversos materiales como piedra con mortero, ladrillos con mortero, tierra, enrocado, y concreto entre otros.

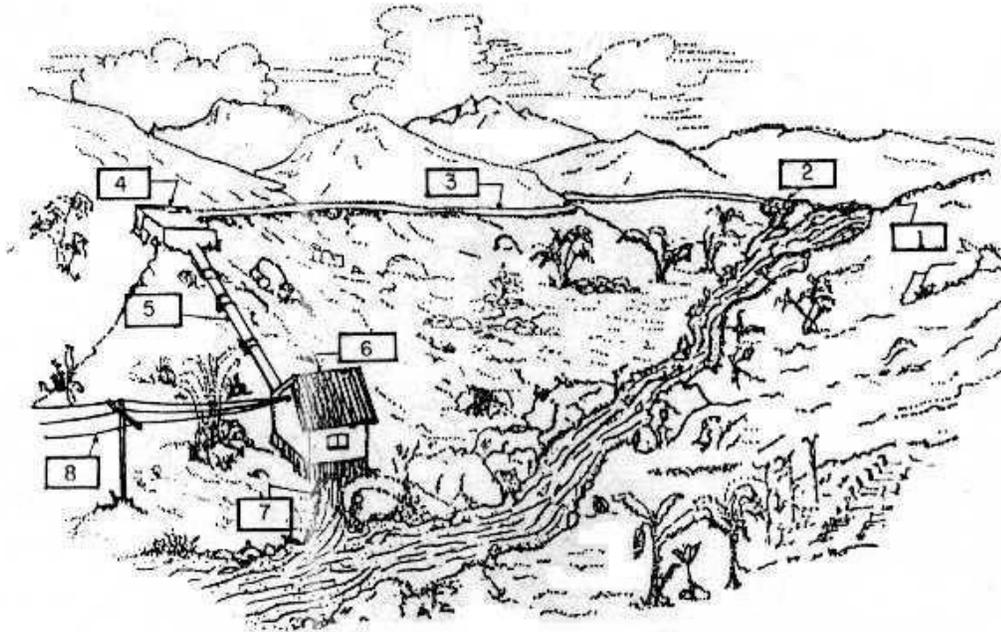
El dique derivador es una estructura hidráulica de baja altura cuya finalidad es dar a las aguas en el río durante el estiaje, la energía potencial necesaria para ser derivadas o captadas a través de la obra de toma. En épocas de lluvia el dique derivador funciona como un vertedero libre, permitiendo el paso de las crecidas en forma segura y controlada. La geometría del dique derivador puede ser desde una sofisticada forma hidrodinámica, hasta una sencilla y práctica forma trapecial. Los materiales para su construcción son muy diversos: concreto, piedra con mortero, enrocado, ladrillo con mortero, madera con enrocado, entre otros.

### **Obra de Toma**

Se denominan obras de toma u obras de captación a toda estructura hidráulica construida sobre el cauce de un río o canal con el fin de captar parcialmente el agua que acarrea.

La obra de toma tiene la función de captar las aguas del embalse o del río. Generalmente está constituida por sistemas de protección (rejillas) y sistemas

de control y regulación de flujo (válvulas y compuertas). En instalaciones a filo de agua en ríos de montaña, se aconseja incluir una cámara pre-sedimentadora o desgravador en la obra de toma, con la finalidad de retener partículas de arena gruesa y pequeñas piedras que logren atravesar las rejillas de protección, y evitar que pasen y circulen por el canal de derivación.



**Figura 2:** Esquema general de un aprovechamiento hidroeléctrico a pequeña escala  
(Carrillo G, 2000).

**Partes:**

1. Presa o dique derivador.
2. Obra de toma.
3. Canal de derivación.
4. Desarenador y cámara de carga.
5. Tubería forzada.

6. Casa de máquinas.
7. Canal de restitución.
8. Línea de transmisión y red de distribución.

### **Canal de derivación**

El canal de derivación es un cauce artificial, el cual tiene por finalidad llevar las aguas desde la obra de toma hasta la cámara de presión, en forma tal que éstas ganen progresivamente energía potencial respecto al cauce del río. El canal puede ser abierto o cerrado. El canal cerrado tiene la ventaja que evita el riesgo de entrada de material sólido, perjudicial para los equipos de generación. Ya que esta obra debe ser construida en ladera de pendiente fuerte, muchas veces durante su recorrido se encontrarán obstáculos naturales como discontinuidades en las laderas, producto de antiguos deslizamientos, pequeñas quebradas, zanjas y deslizamientos activos. Según sea el caso habrá que salvar estos obstáculos con estructuras tan variadas como tramos elevados de canal, sifones hidráulicos y entubamientos del canal. La longitud del canal puede variar desde decenas de metros hasta kilómetros. Es recomendable que el canal sea revestido para evitar que se erosione y cambie de sección. Si las condiciones del terreno permiten diseñar y construir un canal estable, no revestido, resultaría más económico. En este último caso los desarenadores deberían colocarse preferiblemente aguas abajo del canal de derivación, antes de la cámara de presión. Las secciones más usadas son trapecial, rectangular y media circunferencia. Los materiales para recubrir esta obra pueden ser concreto, piedra en mortero, ladrillo con mortero, bitúmenes y membranas plásticas, entre otros.

## **Desarenador y Cámara de presión**

El desarenador tiene como función retener ciertas partículas sólidas, especialmente arenas, transportadas por la turbulencia de las aguas, evitando así que pasen a la tubería forzada y de allí a las turbinas, donde podrían ocasionar daños importantes. Algunos autores sostienen que el desarenador no es más que un ensanchamiento del canal de derivación. La idea básica de un desarenador es crear unas condiciones de flujo propicias para que las partículas suspendidas caigan por su propio peso al fondo del sedimentador.

La cámara de presión es la estructura hidráulica que proporciona una transición entre el canal de derivación o el desarenador y la tubería forzada. Adicionalmente puede cumplir otras funciones como mantener un nivel de agua constante sobre la tubería forzada, proporcionar la última protección con su rejilla a la tubería de presión y por lo tanto a las turbinas y en algunas centrales puede proporcionar un volumen de agua que permita realizar una regulación relativamente corta para incrementos en la demanda.

## **Tubería Forzada**

La tubería forzada es un conducto a presión que conduce las aguas desde la cámara de presión hasta las turbinas. Tuberías en acero son las más utilizadas para construir este conducto, por su alta resistencia a la presión y a la corrosión. El hierro fundido es otro material muy usado. Actualmente los avances en la industria de los polímeros, han puesto en el mercado mangueras de polietileno de alta densidad (PEAD), las cuales pueden satisfacer los requerimientos de resistencia propios de las tuberías forzadas, además de ser más livianas y fáciles de transportar.

En la selección del tipo de tubería para un lugar específico, deben ser considerados los siguientes factores:

- La presión de operación y el diámetro.
- El tipo de unión o acople de las tuberías.
- El peso, la facilidad de transporte y acceso al sitio.
- La disponibilidad en el mercado local.
- Requerimientos de mantenimiento y su vida útil.
- Naturaleza del terreno donde se instalará la tubería.
- Los efectos sobre la tubería de la calidad de las aguas y los causados por los agentes de la intemperie.

### **Casa de máquinas**

La casa de máquinas es el recinto que alberga los equipos electromecánicos que realizan la transformación de la energía mecánica en energía eléctrica. Esta edificación puede ser desde una simple choza hasta una instalación arquitectónicamente concebida. Los materiales para su construcción son muy diversos: madera, paja, tierra, piedra con mortero, ladrillo con mortero, acero y concreto, entre otro.

### **Canal de restitución**

Este canal tiene por función entregar nuevamente al cauce natural las aguas turbinadas. La restitución se inicia normalmente en un conducto a cielo abierto bajo la casa de máquinas y se prolonga hasta alcanzar el río o la

quebrada donde se realiza la entrega de las aguas mansas. Para evitar que el canal se socave y ponga en peligro la estructura de la casa de máquinas, es recomendable recubrirlo, por lo menos hasta que el canal salga de la casa de máquinas, prolongando el recubrimiento una distancia prudente aguas abajo. Los materiales para el revestimiento pueden ser: concreto, piedra con mortero y ladrillo con mortero, entre otros. La sección de este canal será preferiblemente rectangular o trapecial.

### **Línea de transmisión y red de distribución de energía eléctrica.**

La línea de transmisión tiene la función de transportar la energía eléctrica desde la casa de máquinas hasta el centro de consumo. En aquellos casos donde el lugar de consumo dista algunos kilómetros será necesario transmitir la energía. Estas líneas de transmisión son básicamente cables eléctricos de determinada capacidad de conducción, soportados por postes o torres con sus respectivos elementos aislantes. La red de distribución está constituida por un conjunto de cables eléctricos cuya finalidad es llevar y entregar la energía eléctrica a las viviendas o unidades de consumo. En cada unidad de consumo existe un contador o medidor de energía, que es el punto de conexión entre la red pública de distribución y la red interna de cada unidad de consumo.

### **Equipo electromecánico**

Se conoce así a todos los equipos que se encuentran dentro de la casa de máquinas: turbina, generador, regulador, tablero de control y otros.

## **Turbinas**

Son máquinas que transforman la energía del agua en energía mecánica mediante un rotor que gira por la fuerza del agua.

Existen diferentes tipos de pequeñas turbinas adecuadas para las MCH. Su desarrollo debe ser basado en pruebas de laboratorios para asegurar los valores de rendimiento. La energía potencial del agua puede ser transformada en energía mecánica por la turbina según dos mecanismos:

La presión del agua es totalmente convertida en energía cinética antes de llegar a la parte móvil de la turbina (la rueda), mediante un dispositivo estático (por ejemplo un inyector). Este tipo de turbinas es llamado turbinas a acción.

El agua bajo presión crea una fuerza sobre las caras de los alabes de la turbina. Mientras que el agua atraviesa la turbina, la presión se reduce, ya que esta sido transformada en energía mecánica de rotación y transmitida al generador mediante el palier de transmisión. La rueda de la turbina, llamada a reacción, está totalmente sumergida y el armazón de la turbina debe ser diseñado para sostener la presión de servicio.

Varios parámetros entran en cuenta al escoger un modelo de turbina; los más importantes son la altura de caída y el caudal con aquellos la turbina tendrá que trabajar. Se debe recordar que la altura de la caída no variara pero que el caudal puede variar según la estación del año u otros parámetros.

Un parámetro llamado velocidad específica de la turbina, notada 'M, permite evaluar para que tipos de altura y de caudal la turbina es adecuada. Es el número de revoluciones que haría una turbina de misma geometría ( semejanza) trabajando con una caída de 1 m para proporcionar una potencia de 1 kW con el rendimiento máximo. Además esta ley de semejanza permite hacer ensayos en laboratorio con turbinas de tamaño reducido. Inicialmente expresa en las unidades del sistema imperial, la velocidad específica se expresa de la manera siguiente en el sistema métrico, en *rpm*:

$$n_s = 0.2626n * \frac{P^{\frac{1}{5}}}{h^4} \quad (2.1)$$

Donde:

n: es la velocidad de rotación de la turbina [rpm]

P: es la potencia de la turbina [Kw]

h: es la altura de caída [m]

También intervienen en la decisión el rendimiento mecánico de la turbina y su costo. Existen dos grandes familias de turbinas: las turbinas a acción, que utilizan solo la energía cinética del agua (toda la presión siendo transformada en energía cinética antes) y turbinas a reacción que utilizan la energía potencial de presión del agua.

## Turbinas a acción

### Turbina Pelton

- Rendimiento mecánico: hasta 91%
- Medianas a altas caídas: por encima de 30 m, hasta 1800 m
- Pequeños caudales, de 0.1 a 50 m<sup>3</sup>/s
- Potencia: 1 kW – 300 MW
- Velocidad específica: 4-26 rpm

El agua pasa por uno o varios inyectores que le dan presión; el o los chorros producidos impactan los alabes de la turbina, que tienen forma de cucharas. La energía potencial del agua, al salir por los chorros, se convierte casi sin pérdidas en energía cinética, que es aprovechada por los alabes; se dispone de la energía cinética máxima cuando el agua incide tangencialmente sobre el rodete. El diseño de los alabes debe ser pensado para maximizar la transformación de la energía cinética en energía mecánica (toda la energía cinética que sale de los alabes estará perdida). La turbina puede ser de eje vertical u horizontal, este siendo lo más común en el caso de la pequeña hidroelectricidad. Siempre debe estar colocada arriba del nivel del nivel de agua más abajo, en una cota indicada por el fabricante.

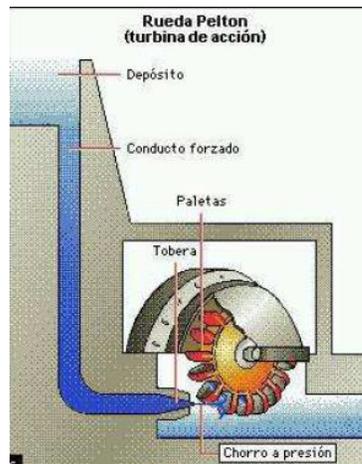


Figura 3: Turbina pelton in situ.

## Clases de turbinas

Existen varios tipos de turbinas que se instalan de acuerdo a las condiciones del caudal (cantidad de agua) y la altura de la tubería de presión.

## Tipos de turbinas

- Turbina tipo Pelton: para grandes alturas o caídas por encima de 30 m y pequeños caudales de agua.
- Turbina Michel Banki: para alturas medianas (entre 20 y 40 m) y caudales de agua medianos.
- Turbina tipo Francis: para alturas pequeñas y medianas (entre 10 y 40 m) y caudales de agua medianos.
- Turbina axial o de hélice: para caídas bajas (entre 3 y 10 m) y caudales de agua medianos.

## **El generador de electricidad (alternador o dínamo)**

Esta máquina recibe el giro de la turbina y transforma la energía mecánica del eje de la turbina, en energía eléctrica.

## **Reguladores y tableros de control**

- Se encargan de mantener constante el voltaje de trabajo. Evitan las subidas y bajadas de voltaje que puedan dañar a los artefactos o equipos de los usuarios.

- Los reguladores pueden ser de velocidad (electromecánicos u oleohidráulicos) o de carga.

- Los reguladores electrónicos de carga son los más utilizados en MCH por su bajo costo, fácil operación y mantenimiento.

- En el tablero se encuentran los instrumentos de control y protección: voltímetro, amperímetro, medido de frecuencia y medidor de potencia y energía.

## **EMBALSES DEL ESTADO CARABOBO**

### **Embalse Guataparé**

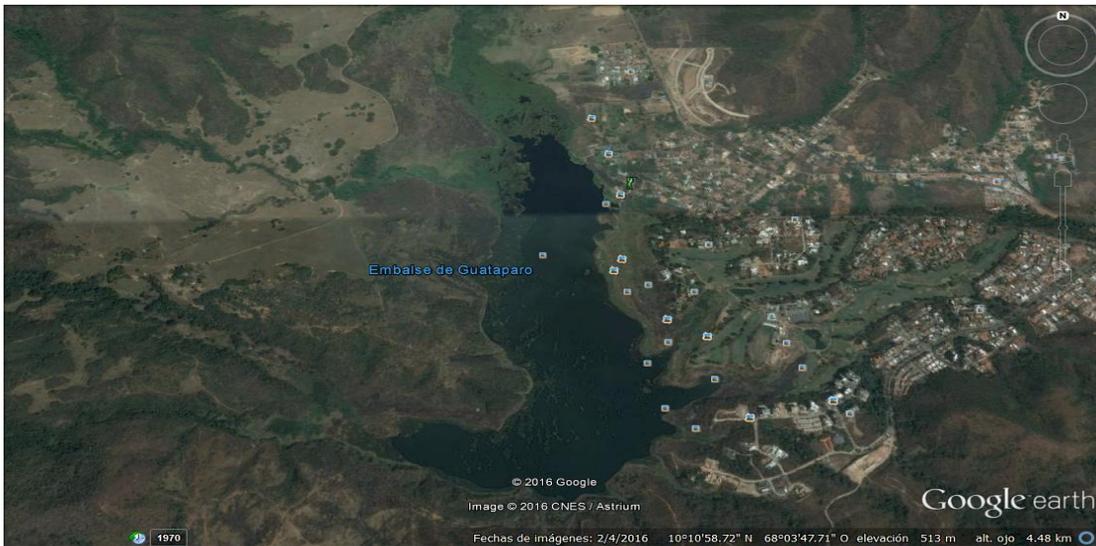


Figura 4: Embalse Guataparo (Google Earth, 2016).

### Embalse Guataparo

<p><b>EMBALSE GUATAPARO</b> Nombre de la Presa: Guataparo ESTADO CARABOBO</p> <p><b>IDENTIFICACION:</b> Ubicación: Sobre el Río Cabritales, a 2 km de Valencia Estado: Carabobo. Propósito: Abastecimiento y Riego. Proyectista: INOS Constructor: INOS Cronología: 1948 - 1948 Operación: HIDROCENTRO</p> <p><b>CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA:</b> Cuenca principal: Río Guataparo. Afluentes principales: Río Guataparo. Área de la cuenca: 5000 Ha</p> <p><b>EMBALSE:</b> Capacidad normal: 28,9 Hm3 Capacidad muerta: 0,10 Hm3 Capacidad útil: 28,8 Hm3 Superficie del embalse: 330 Ha Vida útil: 100 años</p>		<p><b>PRESA:</b> Tipo: De tierra zonificada con núcleo impermeable de grava arcillosa Altura máxima: 30 m Longitud de cresta: 108 m Ancho de cresta: 6 m Pendiente de Talud: Aguas arriba: 2,5 : 1 Aguas abajo: 2,0 : 1 Volumen del terraplén: 120.000 m3</p> <p><b>ALIVIADERO:</b> Ubicación: En el estribo izquierdo de la presa. Tipo: Descarga libre de eje curvo Longitud de cresta: 32 m Carga sobre el vertedero: 3,12 m Descarga máxima: 353 m3/s</p> <p><b>OBRA DE TOMA:</b> Ubicación: Situada en el estribo derecho Tipo: Torre toma con 2 compuertas deslizantes de 1,70 x 1,70 m Gasto máximo: 3 m3/s</p> <p><b>BENEFICIO:</b> Abastecimiento a la ciudad de Valencia y riego de 2.500 Ha</p>	
---	--	--	--

**Gobierno Bolivariano de Venezuela** |
 Ministerio del Poder Popular para el Ambiente

**Venezuela**  
AHORA ES DE TODOS

Figura 5: Ficha técnica embalse Guataparo (Ambiente, 2016).

## Embalse Cachinche

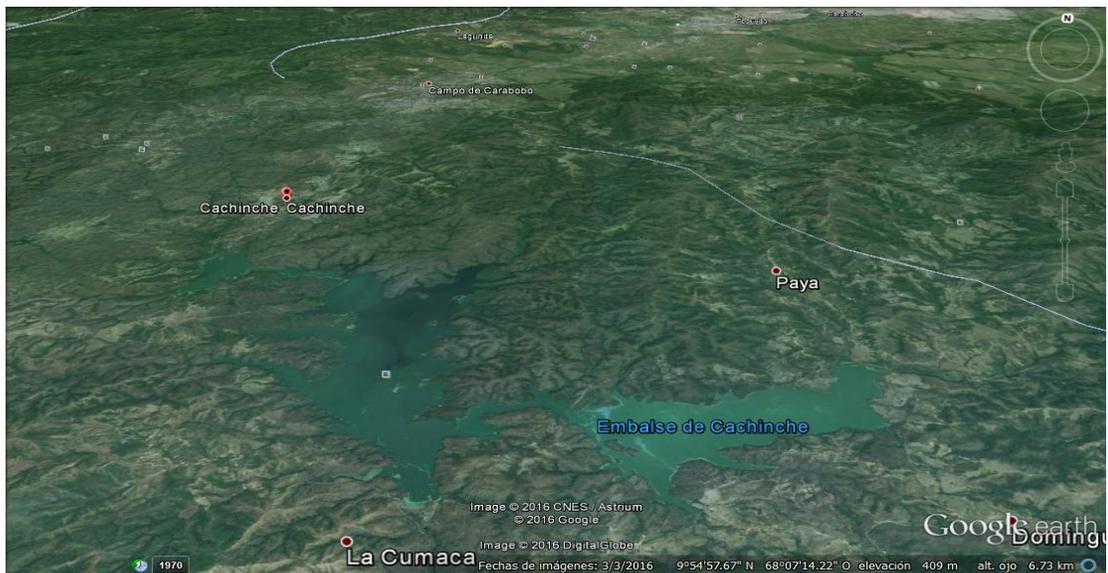


Figura 6: Embalse Cachinche (Google Earth, 2016).

<b>Embalse Pao-Cachinche</b>	
<p><b>EMBALSE PAO-CACHINCHE</b>            Nombre de la Presa: Sesquicentenario de la Batalla de Carabobo            ESTADO CARABOBO</p>	
<p><b>IDENTIFICACION:</b>            Ubicación: Sobre el Río Pao, a 4 Km aguas abajo de la confluencia de los ríos Palto y Chirgua Estado Carabobo            Propósito: Abastecimiento de agua potable, y riego.            Proyectista: ANTONIO J. de GURUCEAGA.            Constructor: Constructora Palace            Cronología: 1971 - 1974            Operación: HIDROCENTRO</p>	
<p><b>CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA:</b>            Cuenca principal: Río Pao            Afluentes principales: Río Pao            Área de la cuenca: 121.068 Ha            Escorrentía medio anual: 220 Hm3</p>	
<p><b>EMBALSE:</b>            Capacidad máxima: 241 Hm3            Capacidad normal: 170 Hm3            Capacidad mínima: 5 Hm3            Capacidad útil: 165 Hm3            Superficie del embalse: 1.650 Ha            Vida útil: 100 años</p>	
<p><b>PRESA:</b>            Tipo: De tierra zonificada            Altura máxima: 53 m            Longitud de cresta: 260 m            Ancho de cresta: 11 m            Pendiente de Talud: Aguas arriba: 3 : 1            Aguas abajo: 2,5 : 1            Volumen del terraplén: 677.000 m3</p>	
<p><b>ALIVIADERO:</b>            Ubicación: En el estribo izquierdo de la presa            Tipo: De vertedero curvo en forma de abanico de descarga libre, una sección de control y un canal rápido de 234 m de longitud que descarga al río.            Longitud de cresta: 32 m            Carga sobre el vertedero: 4,52 m            Descarga máxima: 760 m3/s</p>	
<p><b>OBRA DE TOMA:</b>            Ubicación: Aguas arriba del talud de la presa            Tipo: Tome toma sumergida, conducto de 1,82 m de diámetro, válvula de regulación para riego, gasto ecológico y descarga de fondo            H.B. = 36"            Gasto máximo: 7 m3/s</p>	
<p><b>BENEFICIOS:</b>            Abastecimiento de agua a la ciudad de Valencia y riego de 6.000 Ha</p>	

Figura 7: Ficha técnica Embalse Pao Cachinche (Ambiente, 2016).

## Embalse Canoabo



Figura 8: Embalse Canoabo (Google Earth, 2016).

Embalse Canoabo	
<p><b>EMBALSE CANOABO</b>  <b>Nombre de la Presa: Ing. Pedro Palacios Herrera</b>  <b>ESTADO CARABOBO</b></p>	
<p><b>IDENTIFICACION:</b></p> <p>Ubicación: Sobre el río Canoabo, aproximadamente a unos 27 Km al Sur-Oeste de Morón  Estado Carabobo  Propósito: Abastecimiento de agua potable a poblaciones e industrias.  Proyectista: CONSULTAS Y PROYECTOS S.A.  Constructor: Constructora Milli  Cronología: 1977 - 1995  Operación: HIDROCENTRO</p>	
<p><b>CARACTERISTICAS DE LA CUENCA:</b></p> <p>Cuenca principal: Río Canoabo  Afluentes principales: Río Canoabo  Área de la cuenca: 14.447 km<sup>2</sup>  Escorrentamiento medio anual: 10 Hm<sup>3</sup></p>	
<p><b>EMBALSE:</b></p> <p>Capacidad máxima: 80 Hm<sup>3</sup>  Capacidad normal: 64,30 Hm<sup>3</sup>  Capacidad mínima: 2,5 Hm<sup>3</sup>  Capacidad útil: 61,80 Hm<sup>3</sup>  Superficie del embalse: 534 Ha  Vida útil: 100 años</p>	
<p><b>PRESA:</b></p> <p>Tipo: De enrocado, con pantalla de concreto en el talud aguas arriba  Altura máxima: 55 m  Longitud de cresta: 333 m  Ancho de cresta: 7 m  Pendiente de Talud: Aguas arriba: 1,50 : 1  Aguas abajo: 1,50 : 1  Volumen del terraplén: 564.000 m<sup>3</sup></p>	
<p><b>ALIVIADERO:</b></p> <p>Ubicación: Sobre la parte central de la presa  Tipo: Canal rectangular, con vertedero de descarga libre del tipo perfil OGEE modificado según Abecasis y en su estructura terminal, lanzador de fondo circular  Longitud de cresta: 10 m  Carga sobre el vertedero: 3 m  Descarga máxima: 130 m<sup>3</sup>/s</p>	
<p><b>OBRA DE TOMA:</b></p> <p>Ubicación: Aguas arriba, en la parte central de la presa hacia el estribo derecho  Tipo: Torre toma circular de concreto de 51 m de altura, con 5 compuertas en la torre, túnel de 247 m de longitud y 3,50 m de diámetro el túnel tipo herradura, más la de descarga de fondo. Tubería de 42" de diámetro que descarga a través de una válvula de camisa de 20" de diámetro, aguas abajo de la presa.  Gasto máximo: 13,2 m<sup>3</sup>/s</p>	
<p><b>BENEFICIOS:</b></p> <p>Abastecimiento de Morón, Zona Industrial de Morón, Petroquímica y Puerto Cabello.</p>	

Figura 9: Ficha técnica embalse Canoabo (Ambiente, 2016).

## **CAPITULO III**

### **MARCO METODOLOGICO**

En el presente capítulo se define el diseño y tipo de investigación así como la metodología para analizar las variables hidroenergéticas de los embalses para cumplir los objetivos planteados en el presente trabajo de investigación.

#### **Tipo de investigación**

La clasificación de la investigación define el desarrollo correcto de la investigación. Según Dr. Roberto Hernández Sampieri et al (2015), la *“investigación descriptiva Busca especificar propiedades, características y rasgos importantes de cualquier fenómeno que se analice. Describe tendencias de un grupo o población”*.

En base a la definición anterior se puede decir que esta investigación es de tipo descriptivo, debido a que a partir de los datos suministrados por la compañía hidrológica tales como: nivel del embalse y caudales de entrada y salida respectivos, se desarrolla un análisis hidroenergético de la capacidad del embalse Pao Cachinche, también se hará un análisis de la factibilidad económica para la posible instalación del sistema de generación de para una PCH.

### **Diseño de la investigación**

Según Dr. Roberto Hernández Sampieri et al (2015), las investigaciones no experimentales “*son estudios que se realizan sin la manipulación deliberada de variables y en los que solo se observan los fenómenos en su ambiente natural para después analizarlos*”.

En base a la definición anterior, podemos decir que el diseño de esta investigación es no experimental debido a que los datos necesarios para el análisis hidroenergético serán suministrados por la compañía hidrológica, no hará falta el uso de ensayos ni instrumentos para recolectar datos por parte de los bachilleres a cargo de esta investigación.

### **Población y muestra**

### **Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

## **Fases de la investigación**

Se realizará el proyecto en seis fases dadas a continuación:

### **Fase I: Antecedentes de investigación.**

Esta fase comprenderá revisión de investigaciones, documentos, enfocados en la generación de energía renovable donde se ha considerado la energía hidráulica. Aquellas investigaciones que hayan sido satisfactorias en la instalación de PCH a nivel nacional e internacional y aportan una base referencial de desarrollo de la investigación.

### **Fase II: Definición de variables de los embalses.**

Se seleccionaran y clasificaran las variables hidráulicas suministradas por HIDROCENTRO, C.A. para analizar estadísticamente y determinar el patrón de comportamiento energético y la capacidad del embalse Cachinche.

Las variables seleccionadas son: la cota del embalse referido al nivel del mar expresado en msnm, volumen diario del embalse en  $Hm^3$ , área en  $Ha$ , caudal ecológico en  $m^3/s$ , caudal de bombeo en  $m^3/s$  así como el caudal de alivio en  $m^3/s$  y el caudal de entrada en  $m^3/s$  y el caudal de salida en  $m^3/s$ .

### **Fase III: Recolección de las variables hidráulicas seleccionadas.**

Las variables obtenidas en campo recolectadas mediante instrumentos de medición en los embalses, son suministradas por la compañía hidrológica del centro mejor conocida como HIDROCENTRO, C.A. Las variables hidráulicas permitirán realizar la fase de pre-diseño de la PCH más adecuada considerando el comportamiento obtenido del embalse.

### **Fase IV: Pre- diseño de las pequeñas centrales hidroeléctricas.**

Las variables obtenidas en campo, una vez analizados y obtenidos patrones de comportamiento estadístico, se estimará la solución más factible

en cuanto a la elección de la turbina a emplear, tomando en consideración los detalles de diseño y construcción apropiados de acuerdo al embalse analizado.

#### **Fase V: Factibilidad técnica.**

Se estudiara la factibilidad económica para establecer las pequeñas centrales hidroeléctricas como fuente alternativa de generación de energía en la zona adyacente, así como su potencial como suministro constante de energía la cual funcionará como instalación sin ejercer impacto ambiental y suministro de servicio público.

#### **Fase VI: Análisis y conclusiones.**

1.-Luego de haber realizado las fases previas, se comienza a hacer revisión de estas a fin de cumplir las condiciones analizadas en conjunto para determinar la factibilidad de los embalses.

2.-El análisis se llevara a cabo luego de haber concluido las fases previas de estudio de las variables hidráulicas de los embalses y factibilidad técnico-económica, el análisis a realizar suministra información concluyente perteneciente al diseño de pequeñas centrales hidroeléctricas en los embalses.

#### **Procesamiento de datos:**

El análisis de las variables y los datos se realizaran con el programa STATGRAPHICS Centurión XV Versión 15.2.06, con el cual se realizará el estudio estadístico de las variables hidroenergéticas seleccionadas para el embalse, a continuación se muestra la metodología para el análisis estadístico usando la herramienta:

## Inicio del programa

- 1) Al iniciar el programa, emerge una ventana en la cual se selecciona el tipo de análisis a realizar, se selecciona la opción “Introducir nuevos datos o importarlos de una fuente externa” luego emerge otra ventana en la cual se selecciona “En un archivo de datos existentes”. Se muestra el procedimiento en la figura 10.

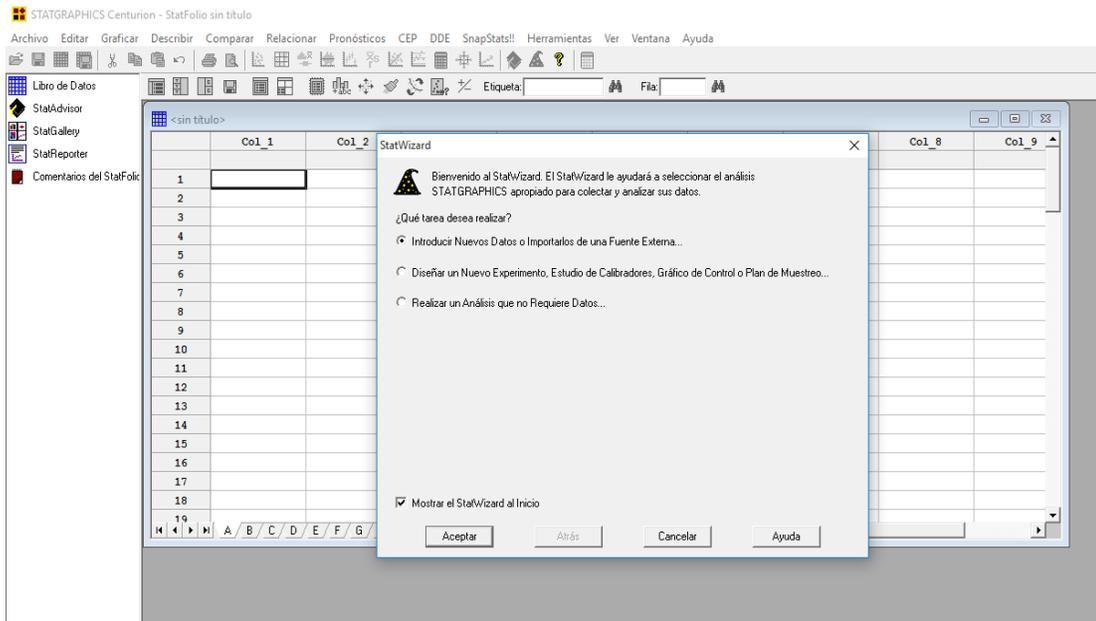
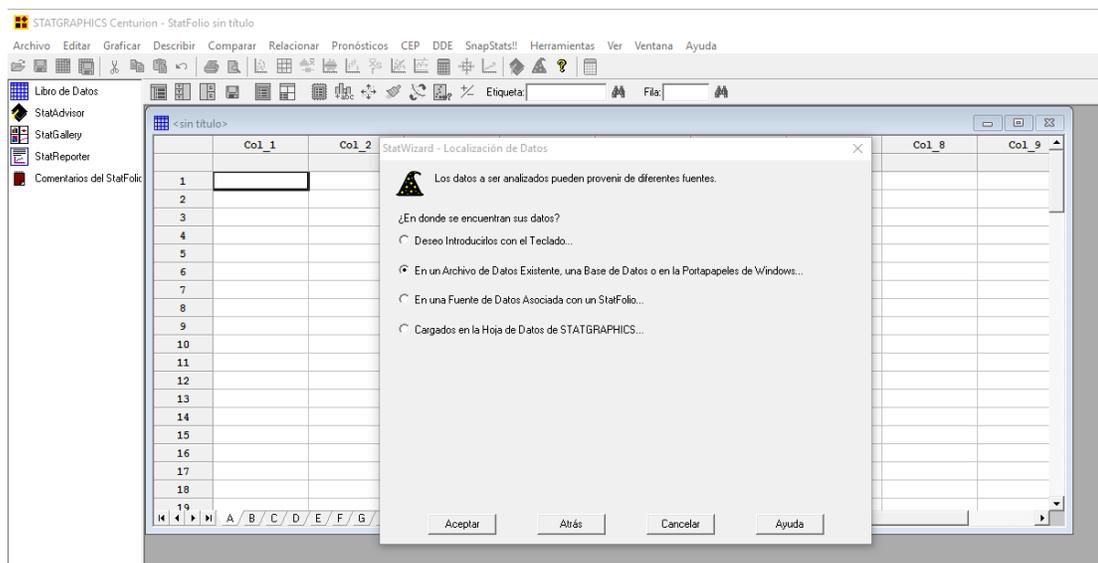


Figura 10: Inicio de software. STATGRAPHICS.

- 2) Luego emerge otra ventana donde se debe seleccionar la fuente de los datos, se escoge la opción “Introducir Nuevos Datos o Importarlos de una Fuente Externa...” por estar los datos contenidos en una hoja de Excel. Se muestra en la figura 11.



**Figura 11:** Fuente de datos. STATGRAPHICS.

3) Emerge una ventana donde se debe introducir la hoja de Excel que previamente ha sido organizada con las variables respectivas para el análisis estadístico, para ello se selecciona la opción “Abrir”, luego emerge una ventana con cuatro opciones, por ser un archivo de Excel se selecciona “Archivo de Datos Externo”. Se localiza el archivo, se indica el contenido del encabezado de la hoja de cálculo y se aceptan los datos como se muestra en la figura 12 . Se muestra la hoja con los datos organizados, con un total de 3888 datos históricos por cada variable a estudiar, la figura 13 ilustra como quedan expresados.

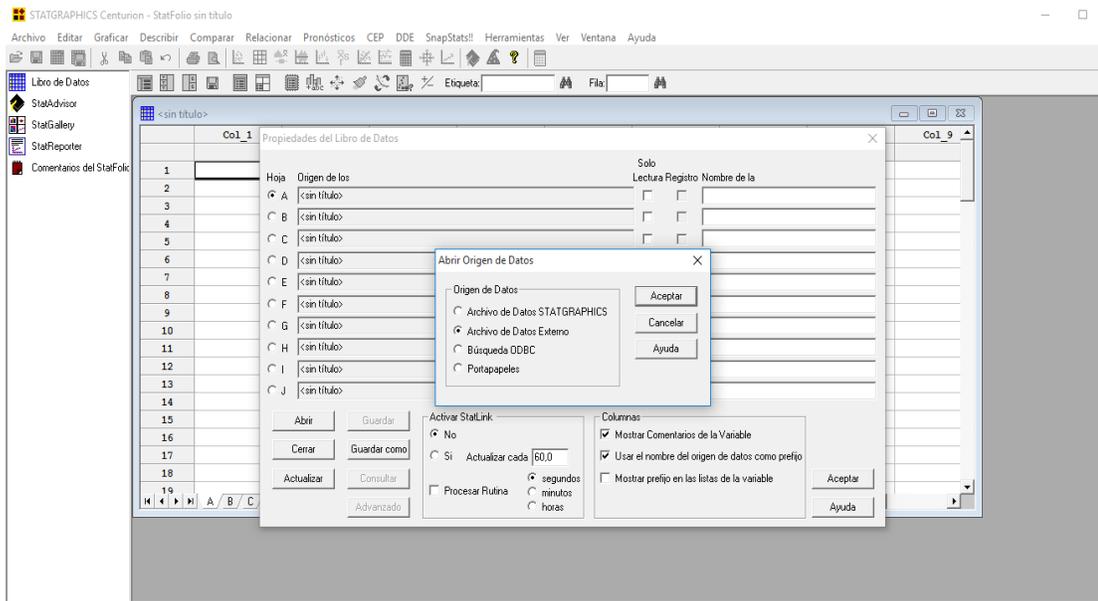


Figura 12: Origen de los datos. STATGRAPHICS.

	GASTO ECOLOGICO	BOMBEO	ALIVIO	COPA	VOLUMEN	AREA	CAUDAL ENTRADA	CAUDAL SALIDA	Col_9
1	0,835	6,2	3,352	353,42	159,4	1330	10,94	11,54	
2	0,835	6,2	3,352	353,42	159,4	1330	11,061	11,061	
3	0,835	6,2	3,352	353,42	159,4	1330	11,171	11,171	
4	0,835	5,3	3	353,41	159,3	1329	8,66	9,818	
5	0,835	5,3	3	353,41	159,3	1329	9,853	9,853	
6	0,835	6,8	3	353,41	159,3	1329	11,198	11,198	
7	0,835	6,8	2,66	353,4	159,2	1328	9,857	11,015	
8	0,835	6,8	2,335	353,39	159	1328	7,898	10,213	
9	0,835	6,8	2,335	353,39	159	1328	10,724	10,724	
10	0,835	6,8	2,335	353,39	159	1328	10,789	10,789	
11	0,835	6,8	2,024	353,38	158,9	1327	9,045	10,202	
12	0,835	6,8	1,728	353,37	158,8	1326	8,974	10,132	
13	0,835	6,8	1,728	353,37	158,8	1326	10,035	10,035	
14	0,835	6,8	1,448	353,36	158,7	1326	8,457	9,614	
15	0,835	6,8	1,448	353,36	158,7	1326	9,718	9,718	
16	0,835	6,8	1,728	353,37	158,8	1326	11,163	10,006	
17	0,835	6,8	1,728	353,37	158,8	1326	10,087	10,087	
18	0,835	6,8	1,448	353,36	158,7	1326	8,713	9,87	
19	0,835	6,8	1,185	353,35	158,5	1325	7,157	9,472	
20	0,835	6,8	1,185	353,35	158,5	1325	9,978	9,978	
21	0,835	6,8	0,941	353,34	158,4	1324	7,967	9,124	
22	0,835	6,8	0,716	353,33	158,3	1324	7,722	8,879	
23	0,835	6,8	0,716	353,33	158,3	1324	8,905	8,905	
24	0,835	6,8	0,512	353,32	158,1	1323	6,46	8,775	
25	0,835	6,8	0,512	353,32	158,1	1323	8,763	8,763	

Figura 13: Representación inicial de los datos. STATGRAPHICS.

## Análisis estadístico:

- 1) Para realizar el análisis de las variables se selecciona la pestaña “describir” seguido de la opción “datos numéricos” y luego “análisis de una variable” como se muestra a continuación en la figura 14 , se selecciona la variable a analizar de la manera mostrada en la figura 15.

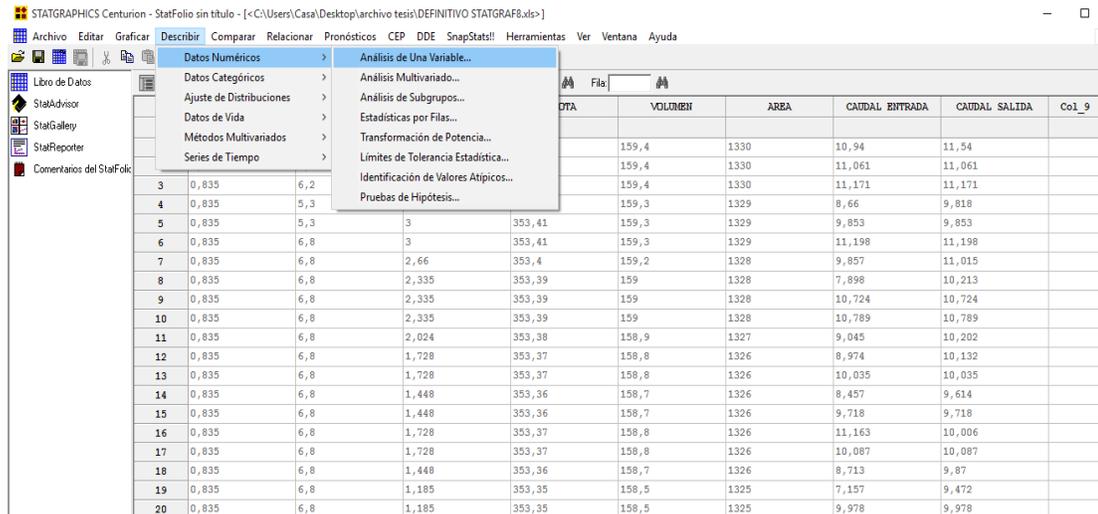


Figura 14: Análisis de variables. STATGRAPHICS.

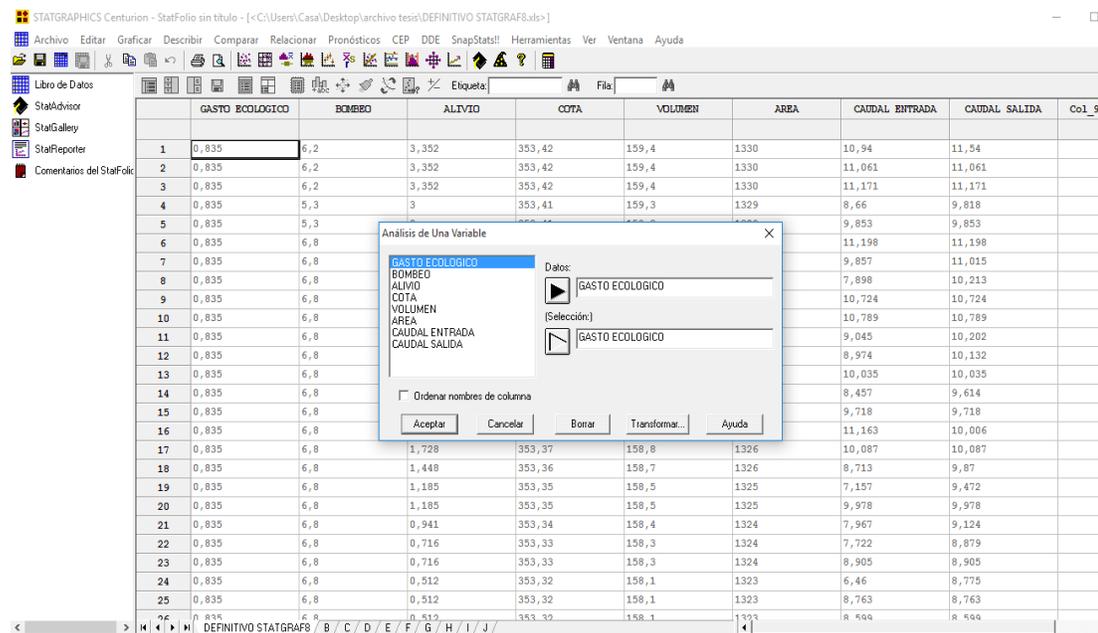


Figura 15: Selección de variables. STATGRAPHICS.



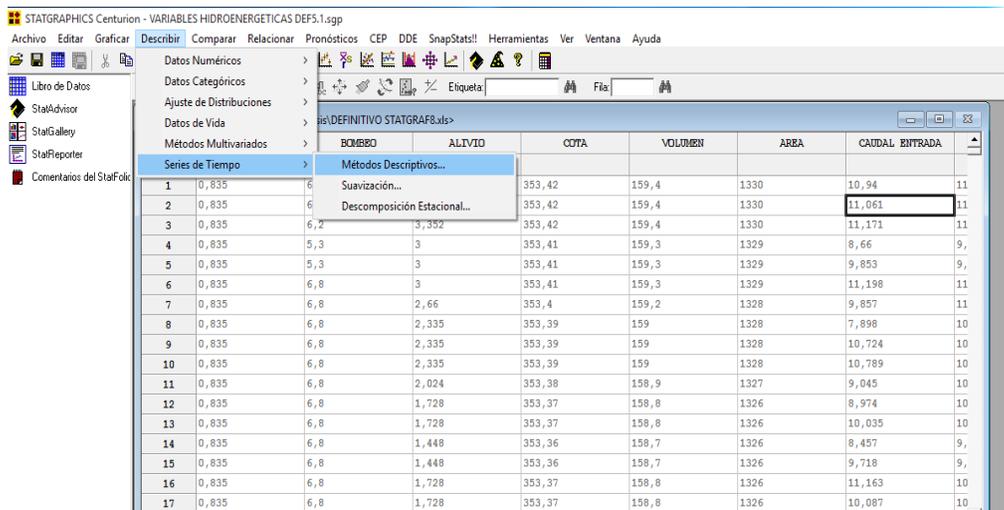


Figura 17: Series de tiempo. STATGRAPHICS.

2) Se selecciona la variable a analizar, seleccionandola y definiendole un intervalo de “uno cada: 1” por ser datos tomados en campo diariamente, se establece la fecha de inicio, de acuerdo a los ultimos diez años de datos tal como aparece en la figura 18.

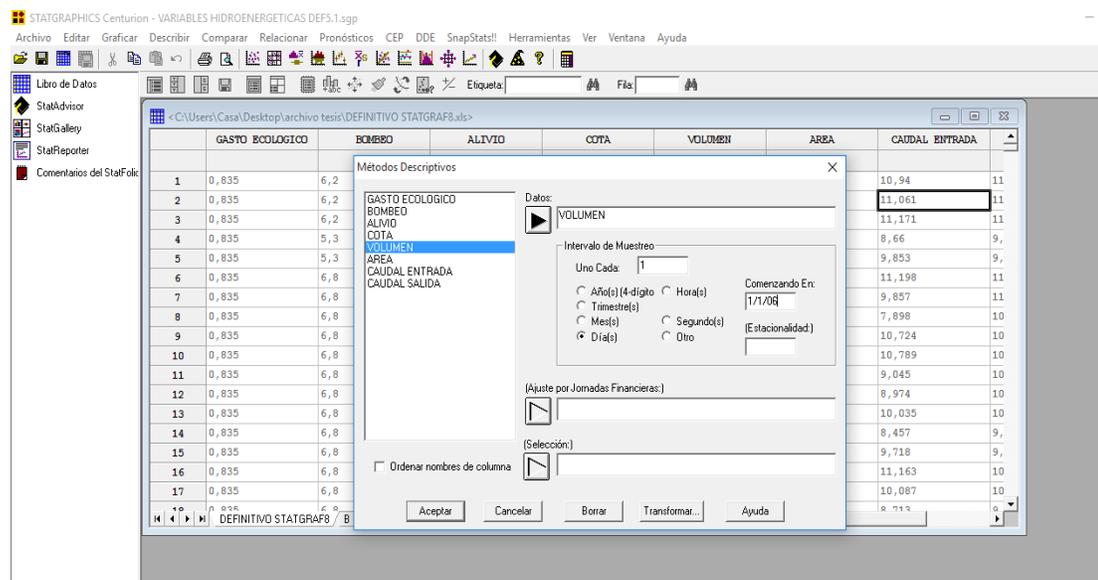


Figura 18: Series de tiempo, Selección de variable. STATGRAPHICS.

3) Se muestra el gráfico de serie de tiempo y las autocorrelaciones para la variable analizada. Ver figura 19.

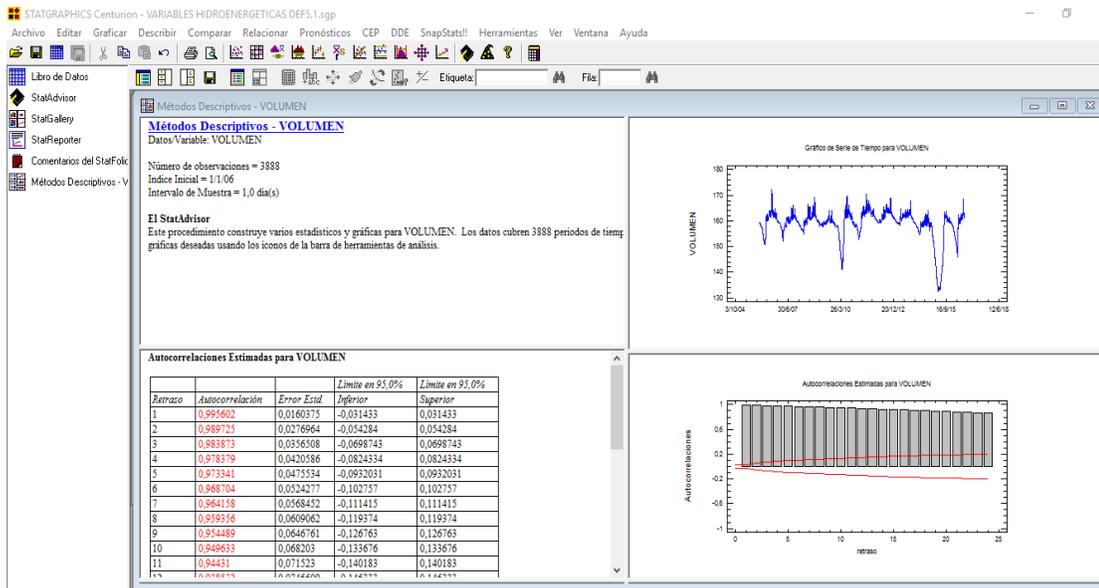


Figura 19: Series de tiempo, Resultados. STATGRAPHICS.

### Proyecciones de variables

Se pronostica el comportamiento de la variable en el periodo de los días restantes para determinar con la tendencia cual será el caudal estimado. El procedimiento de describe a continuación.

1) Ir a la pestaña “Pronósticos” en la barra de herramientas seguido de “pronosticos automaticos” luego de haber ubicado y seleccionado dicha opcion en el programa se muestra un menu tal como se muestra en la figura 20 el cual es semejante al de “Análisis de Series de Tiempo”. Donde se muestra de la siguiente manera.

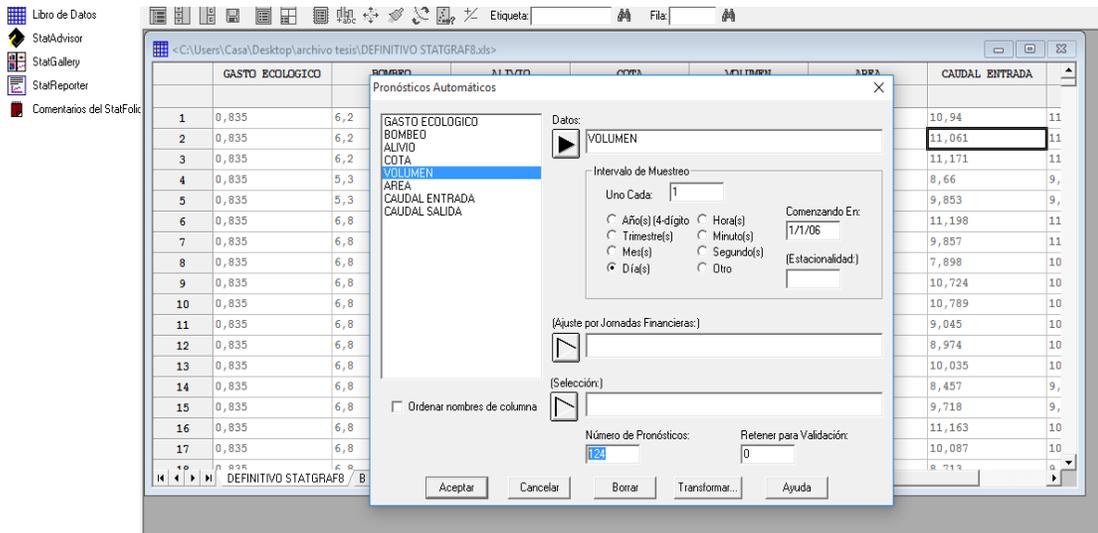


Figura 20: Pronósticos. STATGRAPHICS.

2) Se grafican los resultados del Pronóstico de la variable con límites de confianza del 95% y las autocorrelaciones, junto con el resumen de Pronóstico. Ver figura 21.

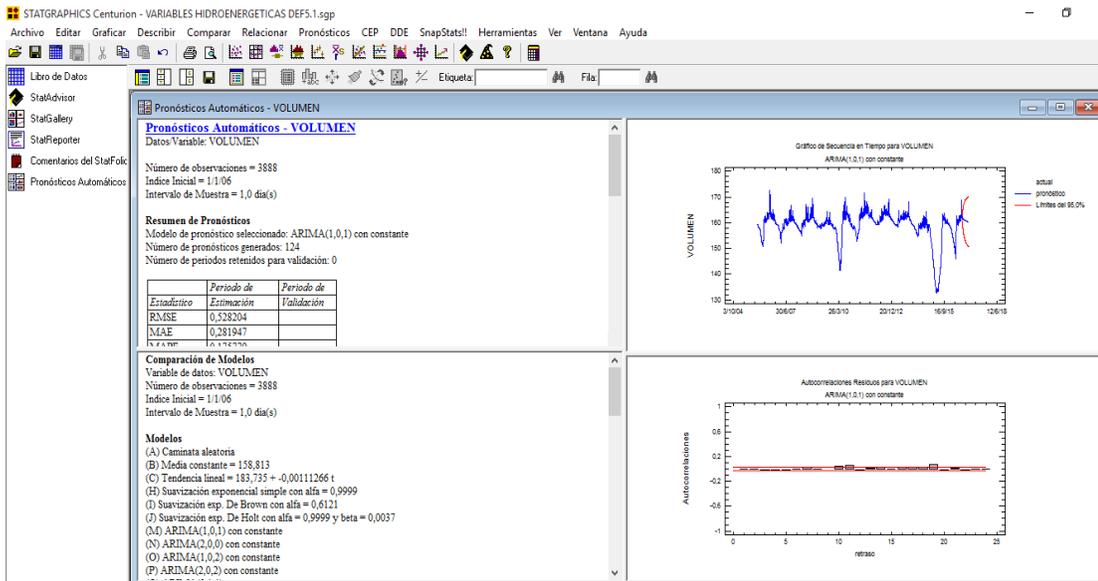


Figura 21: Resultados de pronósticos. STATGRAPHICS.



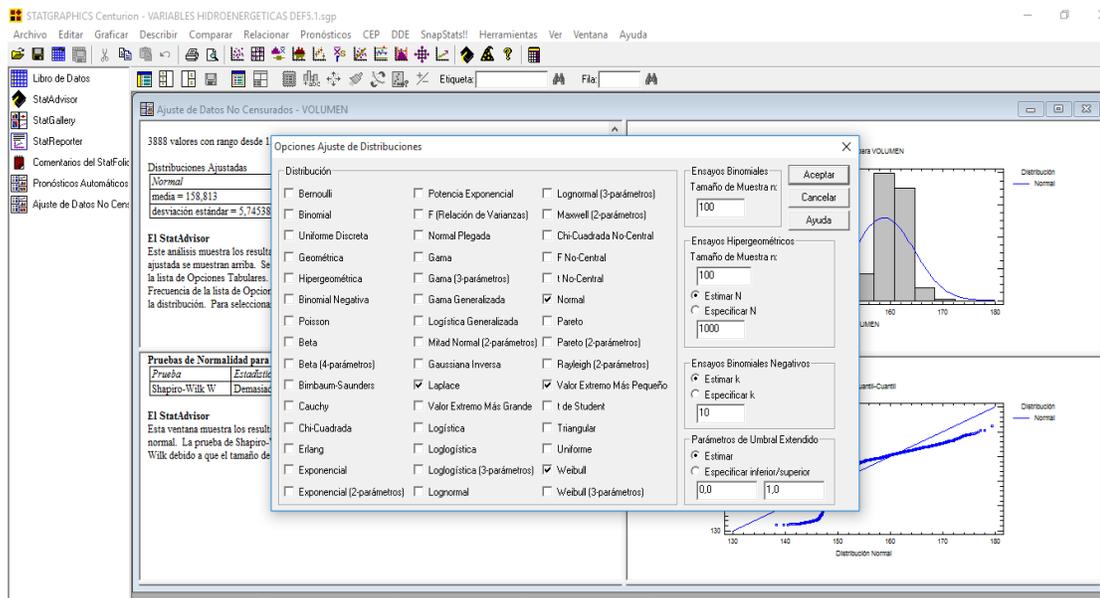


Figura 23: Ajuste de distribuciones. STATGRAPHICS.

3) Se seleccionará la distribución que más se acerque o ajuste a tal fin de estudio. Ver figura 24.

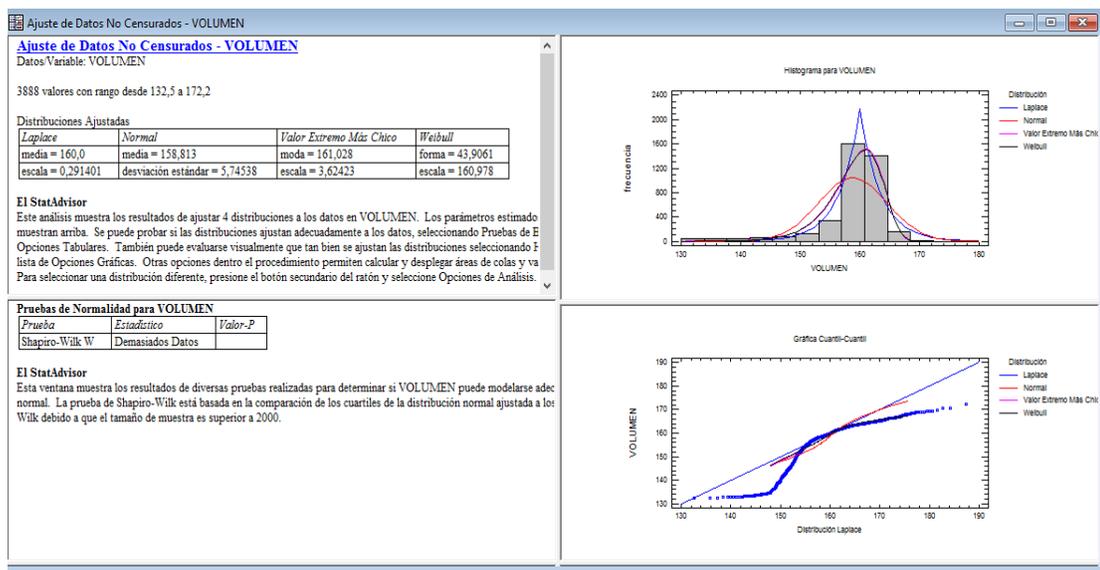


Figura 24: Gráficas de ajuste de distribuciones. STATGRAPHICS.

## **Diseño de la pequeña central hidroeléctrica**

Se diseñará partir de los datos obtenidos mediante el programa STATGRAPHICS, perfiles longitudinales y datos relevantes proporcionados por la hidrológica, y a partir de estos se realiza el diseño hidráulico, civil y eléctrico necesarios para determinar la factibilidad, se toma como punto de partida la obra de captación, túnel de conducción, tubería forzada, turbina y túnel de desagüe y demás necesarios para mantener el curso natural del caudal existente.

### **Conexión directa con descarga para gasto ecológico**

Al existir una descarga a pie de la presa diseñada para gasto ecológico, se plantea la el diseño por derivación parcial o total del caudal, tomando en consideración la altura neta, la pérdida por accesorios (túnel de derivación, obra de captación, etc.) es en menor medida debido a esta condición, la restitución del caudal al Rio Pao se hará por encima del nivel del cauce. Para determinar el diseño de este modelo se procede de la siguiente manera

### **Diseño de la pequeña central hidroeléctrica**

A continuación se describe la metodología empleada para el análisis y diseño de cada una de las obras civiles que forman parte del sistema de generación hidroeléctrica en la alternativa que se plantea en la presente investigación.

Este análisis y diseño inicia desde la base de la torre toma, seguido del túnel que se encuentra vinculado a dicha torre toma y que atraviesa la presa que forma parte del embalse, hasta desembocar en el cauce del rio Pao, aguas abajo de la presa. Es necesario acotar que el túnel de desviación ya fue

diseñado y actualmente se encuentra en funcionamiento, en esta investigación solo daremos detalles del túnel de desviación y se calculara las pérdidas que sufre el flujo al transitar por el túnel de desviación. También se describe el método utilizado para el cálculo de la carga hidráulica y el criterio para la selección de la turbina.

## **Propuesta**

Las obras civiles que forman parte de esta propuesta son las siguientes:

- Túnel de desviación.
- Turbinas.
- Casa de máquinas.

### ***Obtención de la carga hidráulica***

Para obtener este parámetro es necesario conocer el nivel del embalse y la cota de fondo en la torre toma.

- 1- El nivel del embalse lo obtendremos a partir de un análisis estadístico y la grafica de supervivencia para el caudal ecológico, este análisis fue descrito en páginas anteriores.
  
- 2- La cota de fondo se obtuvo a través del perfil longitudinal del túnel de conducción donde se observa la cota en el codo de 90°, 310 msnm.

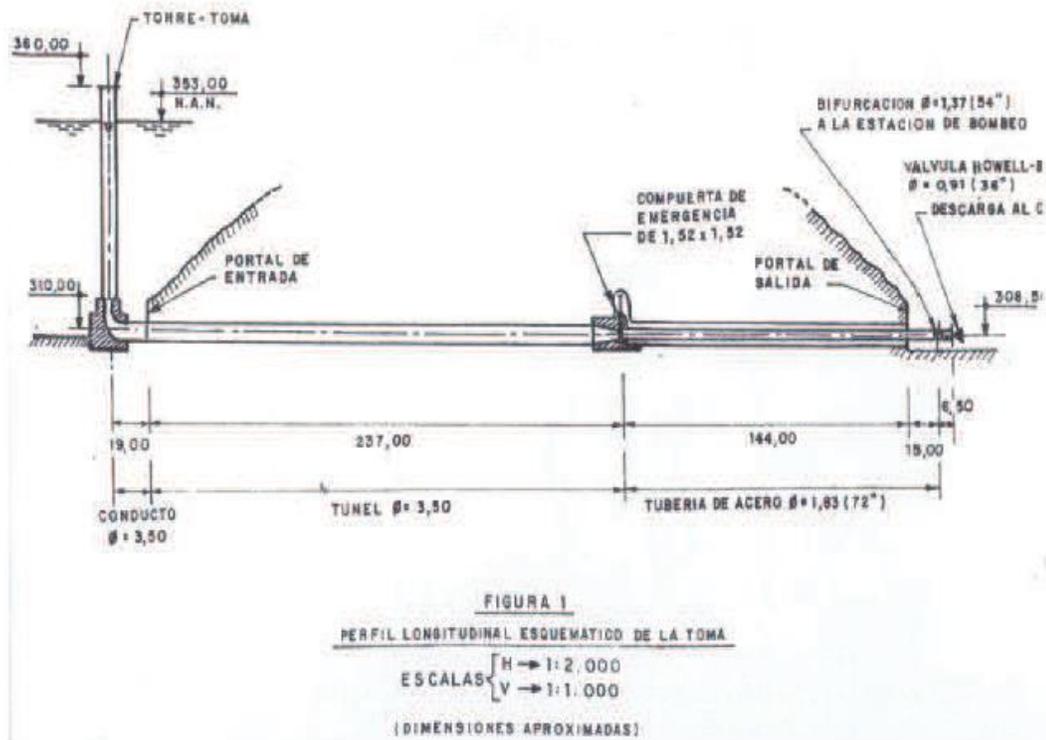


Figura 25: Perfil longitudinal esquemático de la toma (Suarez, 1999).

- 3- Una vez obtenidas ambas cotas, se procede a realizar la diferencia del nivel del embalse y la cota de fondo, el resultado de esta diferencia representa la carga hidráulica.

### Cálculo de pérdida total

Se obtendrán las pérdidas de carga hidráulica que experimenta el flujo debido a la rugosidad en las paredes del túnel de desviación y accesorios tales como codos, válvulas, reducción, expansión, entre otros. La sumatoria de cada uno de los diferentes tipos de pérdidas será igual a la pérdida total. A continuación se mencionan los diferentes tipos de pérdidas que se calcularán en esta investigación

- a) Pérdidas por fricción en dos tramos distintos.
- b) Pérdidas por accesorios (codo de 90°)

### **Pérdida por fricción**

La longitud de estudio se divide en dos tramos, en cada uno de ellos se calcula el número de Reynolds para determinar su régimen (laminar o turbulento). Una vez determinado el régimen al cual pertenece cada tramo se procede a determinar las pérdidas mediante el uso de la ecuación de Darcy.

$$h_L = f \times \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2g} \quad (3.1)$$

$h_L$ : pérdida de energía debido a la fricción [m]

$f$ : factor de fricción (adimensional)

$L$ : longitud de la tubería [L]

$D$ : diámetro de la tubería [m]

$v$ : velocidad promedio del flujo [m/s]

$g$ : gravedad [ $m/s^2$ ]

#### **Tramo I**

El primer tramo inicia en la base de la torre toma y termina en la compuerta, este tramo está sometido a presión. Se le conoce el diámetro, longitud, pendiente, temperatura, tipo de material y caudal.

#### **Tramo II**

El segundo tramo inicia en la compuerta y culmina antes de la descarga sobre el rio Pao, este tramo no está sometido a presión. Se le conoce el diámetro, longitud, pendiente, temperatura, tipo de material y caudal.

### Determinación del número de Reynolds y clasificación del flujo.

- 1) Calcular el área de la sección transversal de la tubería en cada tramo mediante el uso de ecuaciones geométricas que dependen del diámetro.
- 2) Para este estudio se asumió una temperatura promedio de 25°C y mediante tablas de propiedades del agua se determino su densidad y viscosidad dinámica para esa temperatura, se utilizo la siguiente tabla.

$T, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{kg/m}^3$	$\mu, \text{N} \cdot \text{s/m}^2$	$\nu, \text{m}^2/\text{s}$	$T, ^\circ\text{F}$	$\rho, \text{slug/ft}^3$	$\mu, \text{lb} \cdot \text{s/ft}^2$	$\nu, \text{ft}^2/\text{s}$
0	1000	1.788 E-3	1.788 E-6	32	1.940	3.73 E-5	1.925 E-5
10	1000	1.307 E-3	1.307 E-6	50	1.940	2.73 E-5	1.407 E-5
20	998	1.003 E-3	1.005 E-6	68	1.937	2.09 E-5	1.082 E-5
30	996	0.799 E-3	0.802 E-6	86	1.932	1.67 E-5	0.864 E-5
40	992	0.657 E-3	0.662 E-6	104	1.925	1.37 E-5	0.713 E-5
50	988	0.548 E-3	0.555 E-6	122	1.917	1.14 E-5	0.597 E-5
60	983	0.467 E-3	0.475 E-6	140	1.908	0.975 E-5	0.511 E-5
70	978	0.405 E-3	0.414 E-6	158	1.897	0.846 E-5	0.446 E-5
80	972	0.355 E-3	0.365 E-6	176	1.886	0.741 E-5	0.393 E-5
90	965	0.316 E-3	0.327 E-6	194	1.873	0.660 E-5	0.352 E-5
100	958	0.283 E-3	0.295 E-6	212	1.859	0.591 E-5	0.318 E-5

Figura 26: Viscosity and Density of Water at 1atm (White, 2000).

- 3) Como se conoce el caudal y el área en cada tramo, procedemos a calcular la velocidad en cada tramo apoyándonos en la ecuación de continuidad.
- 4)

$$Q = V \times A \quad (3.2)$$

Q: caudal [ $m^3/s$ ]

V: velocidad [ $m/s$ ]

A: área de la sección transversal [ $m^2$ ]

5) Determinar el número de Reynolds mediante la siguiente ecuación

$$N_R = \frac{V \cdot D \cdot \rho}{n} \quad (3.3)$$

V: velocidad [ $m/s$ ]

D: diámetro [m]

$\rho$ : densidad [ $kg/m^3$ ]

n: viscosidad dinámica [Pa.s]

6) El número de Reynolds es adimensional. Si el número de Reynolds es menor que 2000 entonces el flujo es laminar, si el número de Reynolds es mayor que 4000 entonces el flujo es turbulento, en caso que el resultado obtenido este entre 2000 y 4000 es imposible decir que flujo existe.

### **Obtención del factor de fricción**

1) En caso de que el flujo sea laminar, obtendremos el factor de fricción mediante la siguiente ecuación:

$$f = \frac{64}{N_R} \quad (3.4)$$

$N_R$ : numero de Reynolds (adimensional)

- 2) Si el flujo es turbulento obtendremos el factor de fricción mediante el diagrama de Moody. Para acceder a este diagrama primero obtenemos la rugosidad relativa mediante el siguiente cuadro, la rugosidad relativa depende del material.

Material	Condition	$\epsilon$		Uncertainty, %
		ft	mm	
Steel	Sheet metal, new	0.00016	0.05	± 60
	Stainless, new	0.000007	0.002	± 50
	Commercial, new	0.00015	0.046	± 30
	Riveted	0.01	3.0	± 70
	Rusted	0.007	2.0	± 50
Iron	Cast, new	0.00085	0.26	± 50
	Wrought, new	0.00015	0.046	± 20
	Galvanized, new	0.0005	0.15	± 40
	Asphalted cast	0.0004	0.12	± 50
Brass	Drawn, new	0.000007	0.002	± 50
Plastic	Drawn tubing	0.000005	0.0015	± 60
Glass	—	Smooth	Smooth	
Concrete	Smoothed	0.00013	0.04	± 60
	Rough	0.007	2.0	± 50
Rubber	Smoothed	0.000033	0.01	± 60
Wood	Stave	0.0016	0.5	± 40

Figura 27: Recommended roughness values (White, 2000).

- 3) Con la rugosidad relativa y el número de Reynolds entramos al diagrama de Moody y obtenemos el factor de fricción.

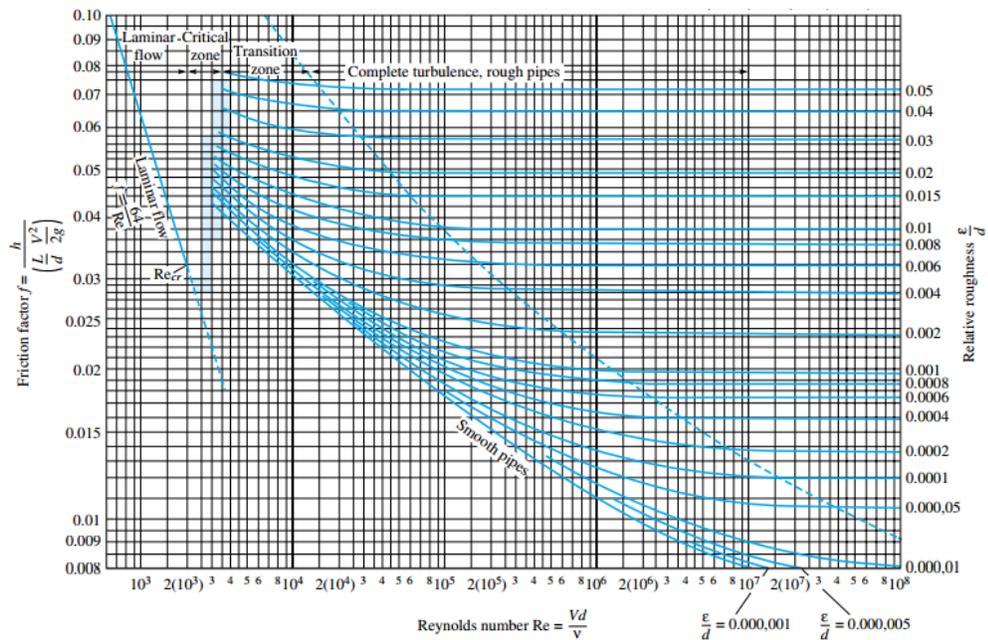


Figura 28: Diagrama de Moody (White, 2000).

- 4) Otro método alternativo para obtener el factor de fricción en flujos turbulentos es mediante la siguiente ecuación:

$$f = \frac{0.25}{\left[ \log \left( \frac{1}{3.7 \left( \frac{D}{\epsilon} \right)} + \frac{5.74}{N_R^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (3.5)$$

$\frac{D}{\epsilon}$  : rugosidad relativa (adimensional)

$N_R$  : número de Reynolds (adimensional)

Esta ecuación produce valores de  $f$  que están  $\pm 1.0\%$  dentro del rango de rugosidad relativa  $D/\epsilon$  de 100 a  $1 \times 10^6$  y para números de Reynolds de  $5 \times 10^3$  a  $1 \times 10^8$ . Esta zona es virtualmente toda la zona turbulenta del diagrama de Moody.

### **Pérdidas por accesorios o perdidas menores**

- 1) En esta parte de la investigación se calculara las pérdidas que ocasiona el codo de 90° ( $\varnothing=3.5\text{m}$ ) que se encuentra en el fondo de la torre toma y está conectado con el túnel de desviación. Para este cálculo usaremos la ecuación 3.6.

$$h_L = Kx \frac{v^2}{2g} \quad (3.6)$$

$h_L$ : perdidas menores [m]

$v$ : velocidad promedio del flujo [m/s]

$g$ : gravedad [ $m/s^2$ ]

K: coeficiente o factor de resistencia

- 2) El factor de resistencia se obtiene mediante la siguiente grafica, en esta investigación se trabajara con las pérdidas para un diámetro de tres pulgadas y de esta manera tener un análisis más conservador.
- 3) Una vez obtenido el factor de fricción, se procede a calcular las perdidas.

### **Obtención de la altura útil**

Este parámetro es fundamental para poder seleccionar la turbina, se evaluarán dos criterios y al final se escogerá uno de ellos.

#### **Criterio uno**

A la carga hidráulica se le resta las pérdidas por fricción y por accesorios.

#### **Criterio dos**

A la carga hidráulica se le resta el 10% de esa misma carga hidráulica, este es un criterio ampliamente usado por proyectistas.

### ***Selección de la turbina***

Una vez obtenido la altura útil y el caudal, procedemos a seleccionar la turbina apoyándonos en la siguiente gráfica.

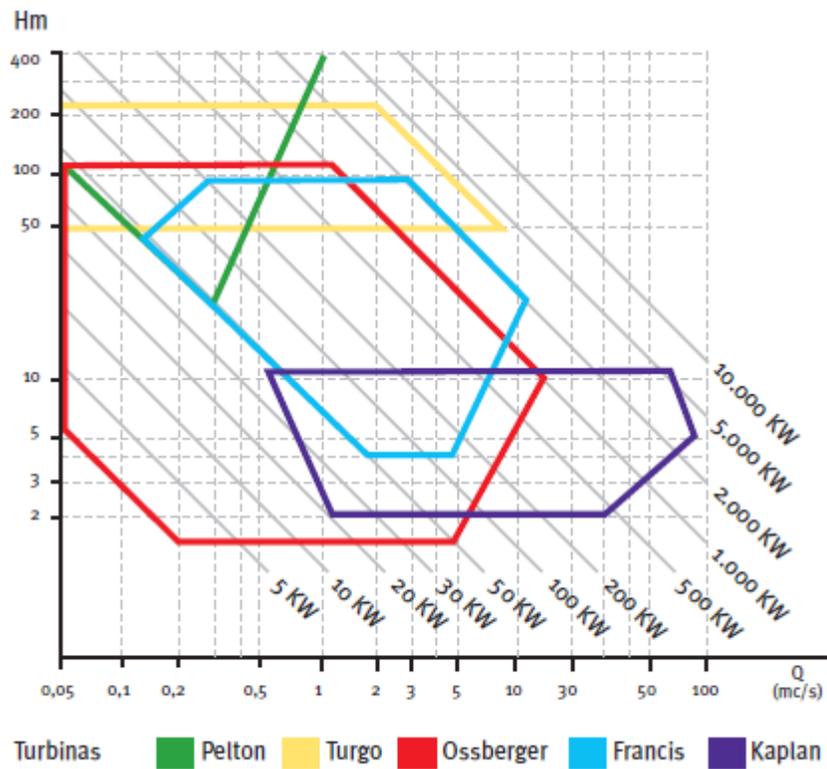


Figura 29: Selección de la turbina. (Castro, 2006)

Entraremos a la gráfica leyendo el caudal en el eje horizontal y la altura útil en el eje vertical, interceptamos ambos valores y obtendremos la turbina más adecuada para esa altura y ese caudal.

### Obtención de la Potencia de la turbina

La expresión que nos proporciona la potencia instalada es la siguiente:

$$P = 9,81 \times Q \times H_n \times e \quad (3.7)$$

P: potencia [kW]

Q: caudal [ $m^3/s$ ]

Hn: altura útil [m]

e: factor de eficiencia, es adimensional

### ***Dimensionamiento de la turbina***

Lo primero es determinar el número específico de revoluciones, aplicando la fórmula:

$$N_s = \frac{n}{H} \sqrt{\frac{P}{\sqrt{H}}} \quad (3.8)$$

$N_s$ : numero específico de revoluciones (adimensional)

n: revoluciones de la turbina (r.p.m)

P: potencia de la turbina (cv)

H: altura útil (m)

Sin embargo como se puede ver en la fórmula anterior tenemos dos incógnitas, por un lado la velocidad específica o adimensional de la turbina y por otro las revoluciones del eje de la misma. Aun no podemos resolver nada.

A partir del salto o altura útil H (m) y del caudal ecológico Q ( $m^3/s$ ) se puede calcular una aproximación de  $N_s$  y n aplicando las siguientes ecuaciones.

$$N_S = \frac{3470}{H^{0,625}} \quad (3.9)$$

$$n = \frac{1164 \times H^{0,125}}{\sqrt{Q}} \quad (3.10)$$

De esta manera se obtiene un primer tanteo de ambos valores. Sin embargo el número de revoluciones  $n$  se mueve en una serie discreta de valores marcados por la frecuencia de la red y que son función de la misma, como se puede apreciar en la siguiente tabla.

Nº de pares de polos por fase	50Hz		60Hz	
	Rev/s	rpm	Rev/s	rpm
1	50	3.000	60	3.600
2	25	1.500	30	1.800
3	16,66	1.000	20	1.200
4	12,50	750	15	900
5	10	600	12	720
6	8,33	500	10	600
7	7,14	428	8,57	514
8	6,25	375	7,5	450
9	5,55	333,33	6,66	400
10	5	300	6	360
11	4,54	272,72	5,45	327,27
12	4,16	250	5	300
13	3,84	230,76	4,61	276,92
14	3,57	214,28	4,28	257,14
15	3,33	200	4	240
16	3,12	187,5	3,75	225
17	2,94	176,47	3,53	211,76
18	2,77	166,66	3,33	200
19	2,63	157,89	3,16	189,47
20	2,5	150	3	180

**Figura 30:** *Velocidades posibles del campo giratorio en generadores Interconectados a la red eléctrica (Zapico, 2002)*

Entre los valores de dicha tabla tomaremos los cercanos a los de  $n$  que hemos tanteado en la fórmula (3.10) y luego sustituiremos en la fórmula (3.8), de esta forma se obtiene el número específico de revoluciones y las revoluciones del eje de la turbina.

A continuación se dimensiona el rodete, para ello primero se estima el coeficiente de velocidad específica ( $k_u$ ) mediante la siguiente ecuación

$$4 \quad k_u = 0,31 + \frac{N_s}{400} \quad (3.11)$$

$N_s$ : numero especifico de revoluciones (adimensional)

$k_u$ : coeficiente de velocidad especifica

Luego de haber obtenido  $k_u$  se sustituye en la formula (3.12) y se despeja  $D_3$ .

$$k_u = \frac{D_3 \times n}{84,55 \times \sqrt{H}} \quad (3.12)$$

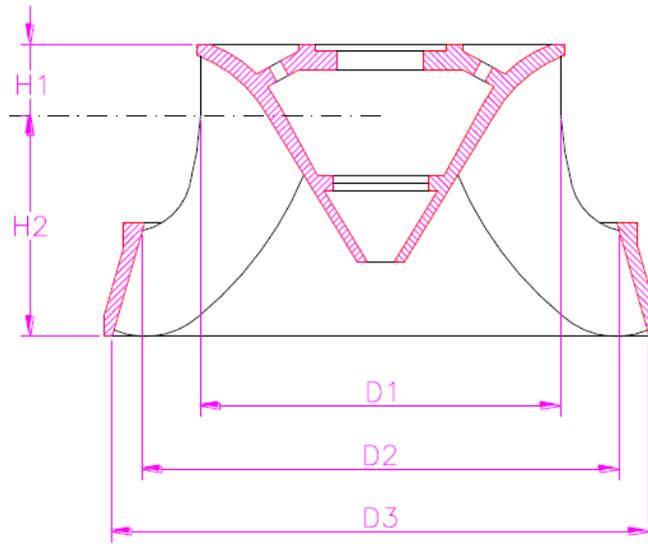
Una vez obtenido el valor de  $D_3$  se puede calcular en función de dicho valor las dimensiones de la turbina aplicando las siguientes expresiones para el rodete

$$D_1 = \left(0,4 + \frac{94,5}{N_s}\right) * D_3 \quad (3.13)$$

$$D_2 = \frac{D_3}{0,96 + 0,00028N_s} \quad (3.14)$$

$$H_1 = \left(0,094 + \frac{N_s}{4000}\right) * D_3 \quad (3.15)$$

$$H_2 = \left(-0,05 + \frac{42}{N_s}\right) * D_3 \quad (3.16)$$



**Figura 31:** Dimensiones del rodete (Zapico, 2002).

La cámara espiral o caracol se dimensiona a partir de las fórmulas que se presentan a continuación:

$$A = \left(1,2 - \frac{19,6}{N_s}\right) * D_3 \quad (3.17)$$

$$B = \left(1,1 + \frac{54,8}{N_s}\right) * D_3 \quad (3.18)$$

$$C = \left(1,32 + \frac{49,25}{N_s}\right) * D_3 \quad (3.19)$$

$$D = \left(1,5 + \frac{48,8}{N_s}\right) * D_3 \quad (3.20)$$

$$E = \left(0,98 + \frac{63,6}{N_s}\right) * D_3 \quad (3.21)$$

$$F = \left(1 + \frac{131,4}{N_s}\right) * D_3 \quad (3.22)$$

$$G = \left(0,89 + \frac{96,5}{N_s}\right) * D_3 \quad (3.23)$$

$$H = \left(0,79 + \frac{81,75}{N_S}\right) * D_3 \quad (3.24)$$

$$I = \left(0,1 + \frac{N_S}{1538,5}\right) * D_3 \quad (3.25)$$

$$L = \left(0,88 + \frac{N_S}{2040}\right) * D_3 \quad (3.26)$$

$$M = \left(0,6 + \frac{N_S}{66,667}\right) * D_3 \quad (3.27)$$

$$N = \left(1,54 + \frac{203,5}{N_S}\right) * D_3 \quad (3.28)$$

$$O = \left(0,83 + \frac{140,7}{N_S}\right) * D_3 \quad (3.29)$$

$$P = \left(1,37 - \frac{N_S}{1785,7}\right) * D_3 \quad (3.30)$$

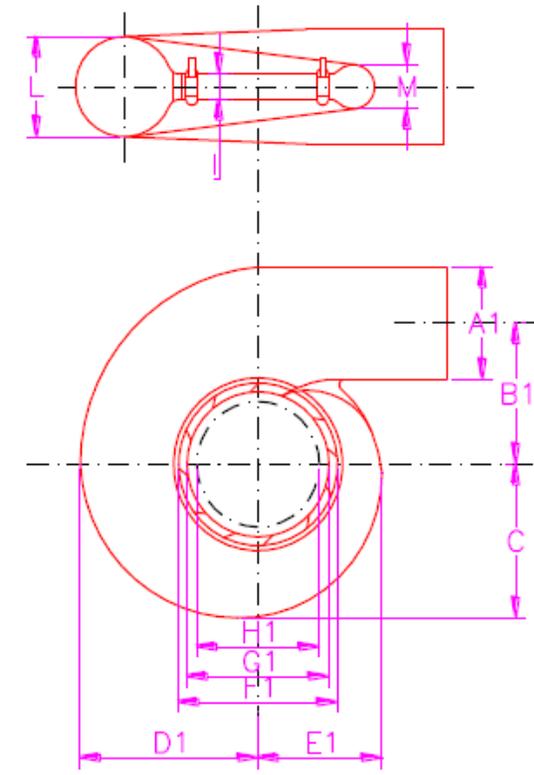
$$Q = \left(0,58 + \frac{22,6}{N_S}\right) * D_3 \quad (3.31)$$

$$R = \left(1,6 - \frac{0,0013}{N_S}\right) * D_3 \quad (3.32)$$

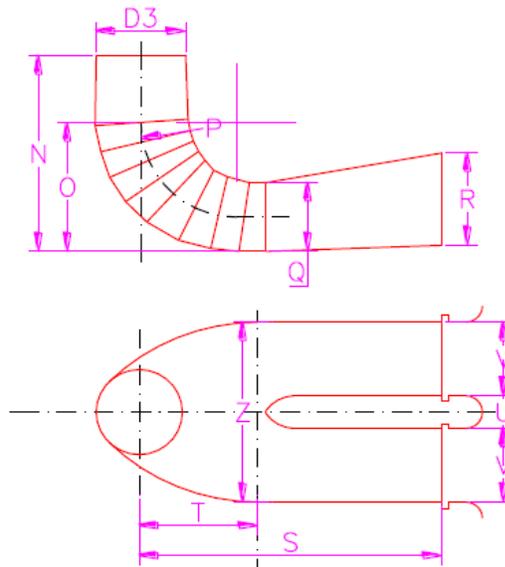
$$S = \left(\frac{D_3}{0,25 - \frac{9,28}{N_S}}\right) * D_3 \quad (3.33)$$

$$T = \left(1,5 + \frac{N_S}{5263,2}\right) * D_3 \quad (3.34)$$

$$Z = \left(2,63 + \frac{33,8}{N_S}\right) * D_3 \quad (3.35)$$



**Figura 32:** Dimensiones del caracol (Zapico, 2002).



**Figura 33:** Dimensiones de la cámara espiral (Zapico, 2002).

## Análisis de costos

Para el estudio de costos, se procede de la siguiente manera:

1. Se calcula el costo del equipo turbo – generador (turbina, generador, tableros de control, mecanismos de regulación y control, válvulas de regulación, tubos de aspiración, etc.), según la ecuación propuesta por “North West Hydro Resource Model, Lancaster University”.
2. Posteriormente, se calculan los costos que involucra la construcción de obras civiles que conforman el sistema de generación de energía hidroeléctrica, mediante la ecuación propuesta por la “Organización Latinoamericana de Energía” (OLADE). Estos costos abarcan: excavaciones, accesorios y casa de máquinas.
3. Seguidamente se calculan los costos asociados al transporte y colocación del equipo. En este ítem se hizo una estimación, utilizando como referencia los resultados obtenidos en el trabajo de investigación “Análisis de la capacidad hidroenergética de los embalses del Estado Lara”.

## **RENTABILIDAD DEL PROYECTO**

La factibilidad económica o rentabilidad, es un índice que permite conocer de manera anticipada el resultado global de la operación de un proyecto, desde el punto de vista económico.

A continuación se muestran todos los aspectos que deben tomarse en cuenta en el cálculo de la rentabilidad, de cualquier central hidroeléctrica.

1. **Inversión inicial:** Con la sumatoria de los costos asociados del equipo turbo – generador, transporte, colocación y obras civiles, se obtiene la inversión que se deberá hacer para iniciar con el proyecto.
2. **Costo de operación y mantenimiento:** Estos costos también llamados costos operacionales, son estimados de acuerdo a cifras de la “U.S Energy Information Administration” (EIA). Estos costos representan los desembolsos que se requieren para que el proyecto una vez puesto en funcionamiento continúe operando normalmente.
3. **Ingresos:** Se estiman los ingresos que se generan con la puesta de funcionamiento de la central hidroeléctrica a pequeña escala, durante los primeros 25 años (vida útil), calculando la ganancia que se produce por c/kW generado.
4. **Valor actual (VA):** El valor actual expresa la rentabilidad de un proyecto. Para su cálculo solo se tomó la inversión inicial, ingresos y costos operacionales. Además, se establece un máximo de 25 años en este tipo de obras, para la recuperación del capital invertido inicialmente, de acuerdo con esto, el proyecto será o no rentable.
5. **Tasa interna de retorno (TIR):** Expresa el beneficio neto anual. Para el cálculo de la tasa interna de retorno, se realiza un tanteo, de manera tal que se encuentre el valor de interés donde se igualen las ganancias y pérdidas en el proyecto. Si el valor es mayor o igual a cero, se está en presencia de un proyecto factible, si ocurre lo contrario, el proyecto no es factible desde el punto de vista económico.

## **CAPITULO IV**

### **ANÁLISIS DE RESULTADOS**

En este capítulo se presenta, estudia y discute el análisis estadístico obtenido con el programa STATGRAPHICS para las variables hidroenergéticas: elevación, volumen, caudal ecológico, caudal de bombeo, área, caudal de entrada, caudal de salida, caudal de alivio para el embalse Pao Cachinche. El análisis abarca un periodo de 10 años comenzando en enero de 2006 hasta agosto de 2016, con un total de 3888 datos para cada variable a analizar usando una confiabilidad del 95% empleando la herramienta STATGRAPHICS.

#### **Variable elevación del agua del embalse Pao Cachinche.**

El nivel del espejo de agua depende de las variables climatológicas tales como la evaporación, precipitación, aportes de ríos, etc. Del resultado del análisis estadístico de la variable ELEVACION se obtiene el comportamiento mostrado en la siguiente tabla:

**Tabla 2:** Resumen Estadístico del Embalse Pao Cachinche. Elevación (m.s.n.m.) para la Variable Elevación de agua. STATGRAPHICS.

Recuento	3888
Promedio	353,369
Mediana	353.46
Desviación Estándar	0,447936
Coefficiente de Variación	0,126762%
Mínimo	351,28
Máximo	354,41
Rango (m)	3,13
Sesgo Estandarizado	-62,3348
Curtosis Estandarizada	92,5782

Con un recuento de 3888 datos analizados se obtuvo un promedio de 353.369 m.s.n.m., se compara esta información con la suministrada por la hidrológica para la cual se tiene el nivel normal de operación de diseño del embalse el cual es 353,28 m.s.n.m. Se analiza el comportamiento de la variable elevación lo largo del periodo de estudio 2006 – 2016 y clasifica dentro del rango operativo normal del embalse. El valor máximo y mínimo se encuentran cercanos al valor medio, dichos valores generan un rango de 3.13m alrededor de la cota normal de operación y con una desviación estándar de 0.447m. Por otro lado el nivel de cota promedio es saludable respecto al nivel de cota muerta 312,93 m.s.n.m. y al nivel mínimo de operación del embalse 319,51 m.s.n.m. de acuerdo a la hoja técnica del embalse proporcionada por HIDROCENTRO, C.A. por lo que se toma el nivel medio como valor representativo de la variable hidroenergética elevación.

### Ajuste de distribuciones para la variable elevación:

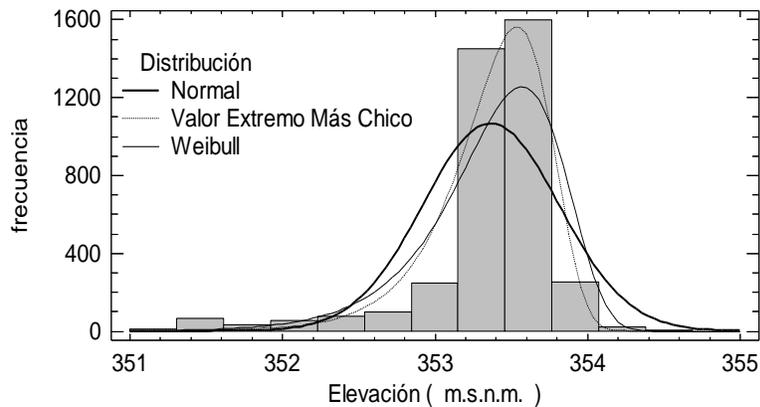


Figura 34: Histograma de la variable elevación.

<i>Distribución</i>	<i>Parámetros Estadísticos.</i>	<i>Log Verosimilitud</i>	<i>KS D</i>
*Valor Extremo Más Chico	2	-1322,53	0,122525
Laplace	2	-1395,39	0,091454 3
Weibull	2	-1503,04	0,147686
Normal	2	-2393,86	0,215783

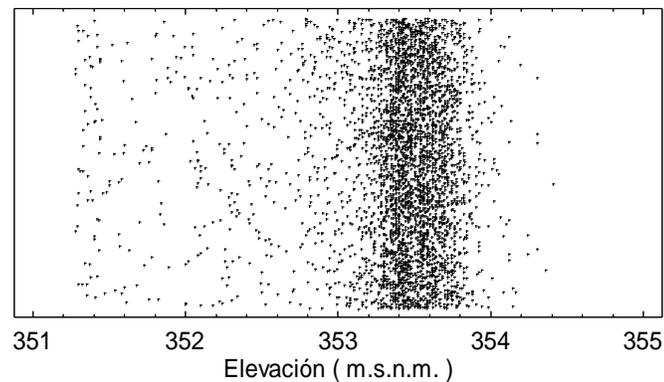
Tabla 3: Comparación de distribuciones alternas para la elevación del agua en el embalse Pao Cachinche

Nota: \*distribución que más se acerca a la variable en estudio.

En el análisis realizado se obtienen los valores de distribuciones alternas en el cual el que más se ajusta a la variable Elevación es la distribución Valor

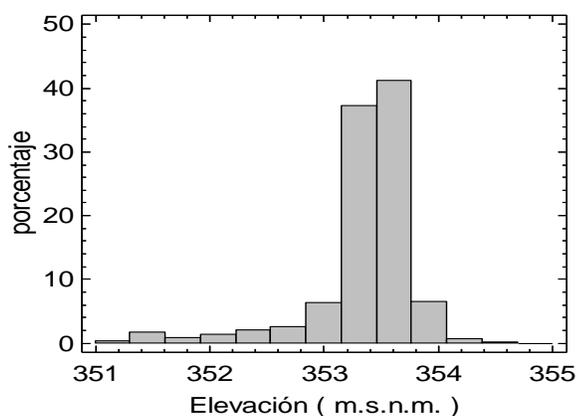
Extremo Más Chico con un valor de Log Verosimilitud de -1322.53 más ajustado.

La dispersión de ocurrencia de los eventos para la variable Elevación se muestra en la siguiente gráfica:



**Figura 35:** *Dispersión de ocurrencia de datos para la variable elevación*

La figura **35** muestra la concentración en los datos, se muestra una concentración de ocurrencias alrededor del valor promedio 353,369 m.s.n.m. con un rango de 3.13m dentro de los límites de operatividad favorables del embalse por lo que la distribución de los eventos es concentrada, así mismo no hay ocurrencia de eventos por debajo del límite mínimo de operatividad como se aprecia en la gráfica anterior.



**Figura 36:** Frecuencia relativa para la variable Elevación.

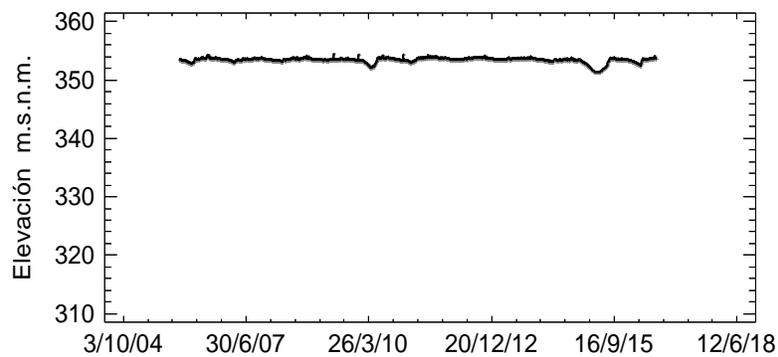
**Tabla 4:** Frecuencias para la variable Elevación ( m.s.n.m.)

Clase	Límite Inferior	Límite Superior	Punto Medio	Frecuencia	Frecuencia Relativa	Frecuencia Acumulada	Frecuencia Rel. Acum.
	menor	351,000		0	0,0000	0	0,0000
	o igual						
1	351,0	351,308	351,154	11	0,0028	11	0,0028
2	351,308	351,615	351,462	65	0,0167	76	0,0195
3	351,615	351,923	351,769	32	0,0082	108	0,0278
4	351,923	352,231	352,077	50	0,0129	158	0,0406
5	352,231	352,538	352,385	75	0,0193	233	0,0599
6	352,538	352,846	352,692	98	0,0252	331	0,0851
7	352,846	353,154	353,0	243	0,0625	574	0,1476
8	353,154	353,462	353,308	1447	0,3722	2021	0,5198
*9	353,462	353,769	353,615	1597	0,4108	3618	0,9306
10	353,769	354,077	353,923	248	0,0638	3866	0,9943
11	354,077	354,385	354,231	21	0,0054	3887	0,9997
12	354,385	354,692	354,538	1	0,0003	3888	1,0000
13	354,692	355,0	354,846	0	0,0000	3888	1,0000
	mayor de	355,0		0	0,0000	3888	1,0000

Media = 353,369 Desviación Estándar = 0,447936

Nota: \*valor que tiene mayor frecuencia.

De los valores que se muestra en la tabla 4 los eventos que tiene mayor incidencia están dentro de la clase 9 con un nivel de ocurrencia que tiene el orden de los 1597 eventos ocurridos en la clase respectivamente, incluyendo a la cota normal de operación 353.28 m.s.n.m. dentro de la clase 8 y una cota favorable para la clase 9.



**Figura 37:** Frecuencia relativa para la variable Elevación. Embalse Pao Cachinche.

Se evidencia en la figura anterior los picos mínimos y máximos de ocurrencia en los niveles del embalse observándose un nivel mínimo histórico en estudio de 351.28 m.s.n.m. registrando el periodo 2006-2016 valores muy por encima del nivel fondo de la torre toma 310 m.s.n.m. del embalse.

## Variable volumen del embalse Pao Cachinche.

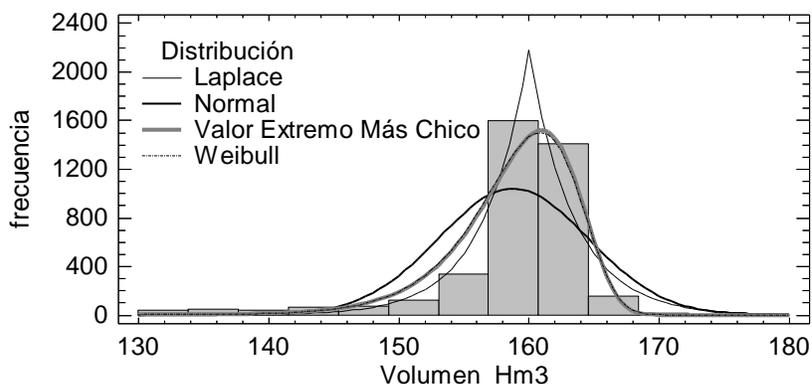
Se analizan y discuten los resultados estadísticos de la variable Volumen del embalse Pao Cachinche medida en hectómetros cúbicos  $Hm^3$  o millones de metros cúbicos, se muestra la tendencia del comportamiento del volumen en las distintas estaciones del año, evaluando con una confiabilidad del 95%, a continuación se describe en la siguiente tabla el resumen general de la variable.

**Tabla 5:** Resumen estadístico para la variable Volumen ( $Hm^3$ )

Recuento	3888
Promedio	158,813
Mediana	160,0
Desviación Estándar	5,7453
Coefficiente de Variación	3,6177%
Mínimo	132,5
Máximo	172,2
Rango	39,7
Sesgo Estandarizado	-60,2668
Curtosis Estandarizada	86,5804
Nivel de confianza	95%

Se muestra en la tabla 5 que para un total de recuento de 3888 datos analizados, se obtuvo en promedio de volumen para el periodo de estudio entre 2006 y 2016 de 158.813  $Hm^3$  comparando respecto al volumen diseño para garantizar la operatividad el cual es 165  $hm^3$  y al volumen útil de 150  $Hm^3$  entra en el rango operativo óptimo del embalse, adicionalmente la desviación estándar obtenida para el análisis es de 5.7453  $Hm^3$ , así mismo un valor mínimo y máximo de 132.5  $Hm^3$  y 172.2  $Hm^3$  respectivamente quedando estipulado un rango de 39.7  $Hm^3$ . El volumen operativo del periodo de estudio

se encuentra por encima del volumen muerto el cual es  $500.000\text{m}^3$ . El coeficiente de variabilidad igual a  $3.6177\%$  indica poca variabilidad respecto al valor medio indicando que la variable hidroenergética volumen es poco afectada a lo largo de las estaciones climáticas.



**Figura 38:** curvas de ajuste de distribuciones para la variable Volumen

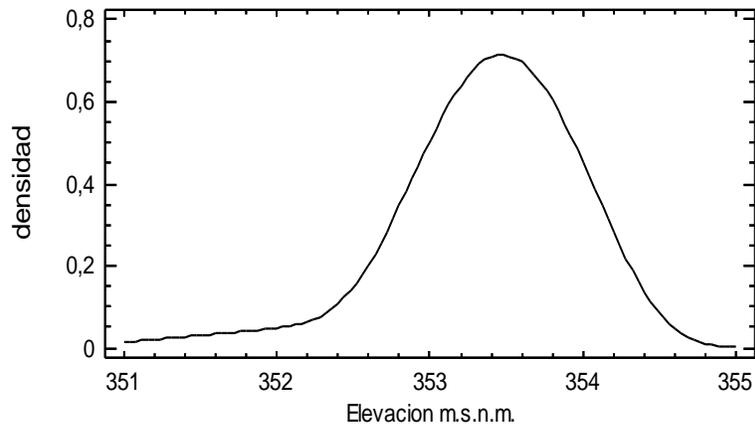
**Tabla 6:** Comparación distribución de probabilidad para la variable Volumen.

Distribución	Parámetros Est.	Log Verosimilitud	KS D
Valor Extremo Más Chico	2	-11270,4	0,116858
Weibull	2	-11314,9	0,121069
Laplace	2	-11377,1	0,0907524
Normal	2	-12314,1	0,211415

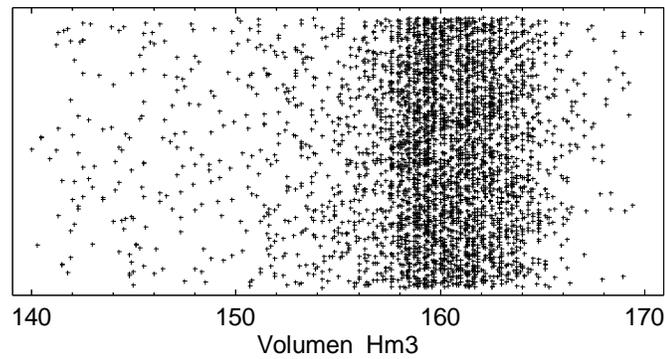
**Nota:** \*distribución que más se ajusta a la distribución.

De manera análoga al análisis de nivel, se evidencia la comparación de distribuciones, en donde se ajusta más la distribución: Valor Extremo Más Chico con un valor de Log Verosimilitud igual a  $-11270,4$ .

En la gráfica densidad volumen se puede apreciar la distribución que más se ajusta a la variable.

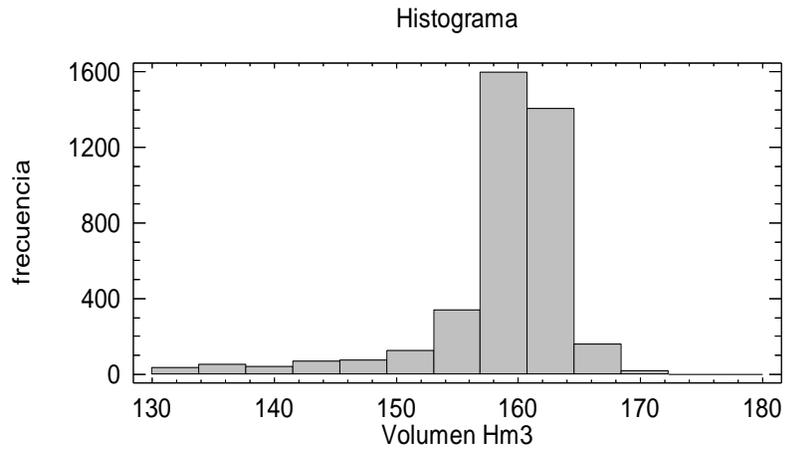


**Figura 39:** Gráfica de distribución suavizada para la variable Elevación..



**Figura 40:** Gráfica de dispersión para la variable Volumen.

Se muestra la distribución de eventos para la variable Volumen en la figura 40, se evidencia una concentración para valores de volumen del embalse alrededor del valor promedio, con una baja dispersión hacia límites inferiores, manteniéndose dentro de los niveles operativos del embalse.



**Figura 41:** Histograma de frecuencia relativa para la variable Volumen.

**Tabla 7:** Histograma de frecuencia para el variable volumen (Hm³).

Clase	Límite Inferior	Límite Superior	Punto Medio	Frecuencia	Frecuencia Relativa
	menor o	130,0		0	0,0000
	igual				
1	130,0	135,714	132,857	65	0,0167
2	135,714	141,429	138,571	51	0,0131
3	141,429	147,143	144,286	103	0,0265
4	147,143	152,857	150,0	148	0,0381
5	152,857	158,571	155,714	819	0,2106
*6	158,571	164,286	161,429	2456	0,6317
7	164,286	170,0	167,143	243	0,0625
	mayor de	170,0		3	0,0008

Media = 158,813 Desviación Estándar = 5,74538

Nota: \* valores que ocurren con mayor frecuencia.

De acuerdo a la tabla 7 y la figura 41 se tiene que para la clase 6 con el límite inferior de 158.57 Hm<sup>3</sup> y límite superior 164.286 Hm<sup>3</sup> con una frecuencia de 2456 eventos y con frecuencia relativa del 63.17%, estando por encima del

volumen útil de 150 millones m<sup>3</sup> muestra poca dispersión hacia valores bajos, como consecuencia el embalse está constantemente dentro del rango operativo promedio.

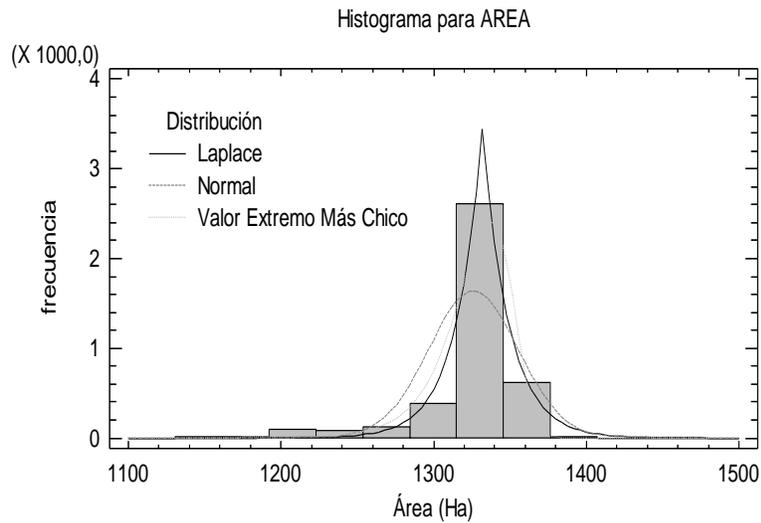
### **Variable área del embalse Pao Cachinche.**

Se analizan y discuten los resultados estadísticos de la variable Área del embalse Pao Cachinche medida en hectáreas Ha, la cual representa el espejo de agua, se muestra la tendencia del comportamiento, evaluando con una confiabilidad del 95%, a continuación se describe en la siguiente tabla el resumen general de la variable:

*Tabla 8: Resumen estadístico para la variable Área (Ha).*

Recuento	3888
Promedio	1326,35
Mediana	1332,0
Desviación Estándar	29,2738
Coefficiente de Variación	2,20709%
Mínimo	1136,0
Máximo	1393,0
Rango	257,0
Sesgo Estandarizado	-61,9318
Curtosis Estandarizada	92,0241

De acuerdo a la tabla 8 se tiene un valor promedio de espejo de agua de 1326.35 Ha con una mediana de 1332 Ha con una variabilidad de 29.27 Ha y un coeficiente de variación de 2.207% el valor promedio se aproxima al valor superior.



**Figura 42:** Distribución de probabilidades para la variable Área.

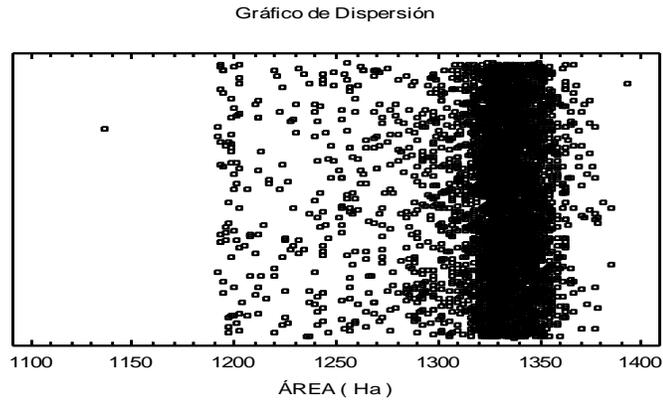
**Tabla 9:** Comparación de Distribuciones Alternas para la variable Área.

Distribución	Parámetros		KS D
	Est.	Log Verosimilitud	
*Valor Extremo Más Chico	2	-17543,1	0,118638
Laplace	2	-17655,3	0,0904297
Weibull	2	-17799,0	0,150721
Normal	2	-18625,7	0,212795

*Nota:* \*distribución que más se ajusta a la variable.

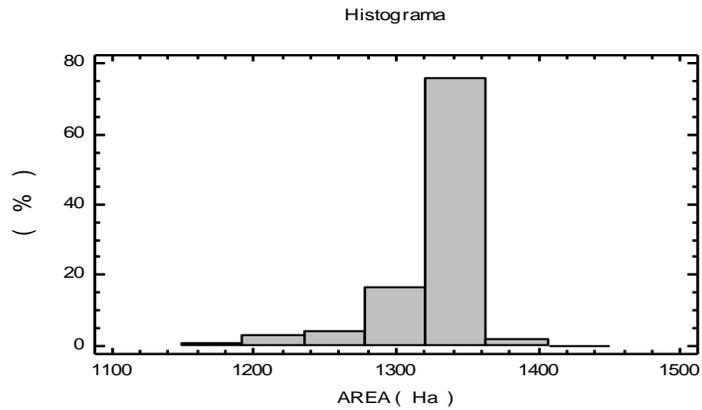
Se tiene en la tabla 9 que para un valor de Log Verosimilitud de -17543.1 para la distribución Valor Extremo Más Chico y es la que mejor se ajusta al comportamiento para la variable Área.

Los datos y la frecuencia que ocurren se muestran a continuación:



**Figura 43:** Gráfico de dispersión para la variable Área

En la gráfica 43 se muestra la distribución con un comportamiento similar al de la variable Volumen, presenta poca dispersión hacia valores de área bajos, y valores cercanos al valor promedio 1320 Ha según hoja de data técnica del embalse.



**Figura 44:** Histograma de frecuencia relativa para la variable Área

**Tabla 10:** Histograma de frecuencias para la variable Área.

Clase	Límite Inferior	Límite Superior	Punto Medio	Frecuencia	Frecuencia Relativa
	menor o	1150,0		1	0,0003
	igual				
1	1150,0	1192,86	1171,43	3	0,0008
2	1192,86	1235,71	1214,29	107	0,0275
3	1235,71	1278,57	1257,14	146	0,0376
4	1278,57	1321,43	1300,0	629	0,1619
*5	1321,43	1364,29	1342,86	2950	0,7595
6	1364,29	1407,14	1385,71	48	0,0124
7	1407,14	1450,0	1428,57	0	0,0000
	mayor de	1450,0		0	0,0000

Media = 1326,35 Desviación Estándar = 29,2738

Nota: \*variable que ocurre con mayor frecuencia.

Se tiene en la tabla 10 que el límite inferior es de 1321.43 Ha y un límite superior de 1364.29 Ha, encontrándose el valor promedio igual a 1326,35 Ha y un valor 1320 Ha para uso normal según la hoja técnica del embalse, se selecciona como valor representativo al promedio obtenido debido al bajo coeficiente de variación.

## Análisis comparativo

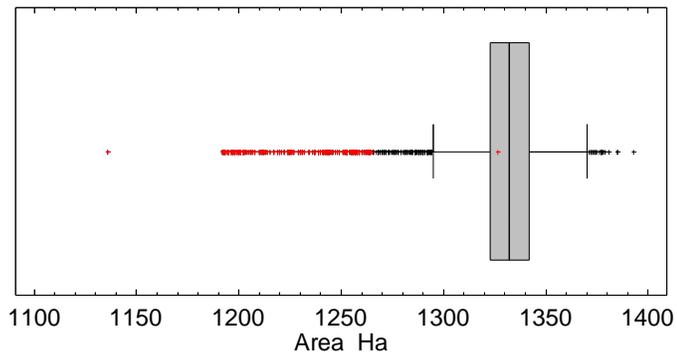
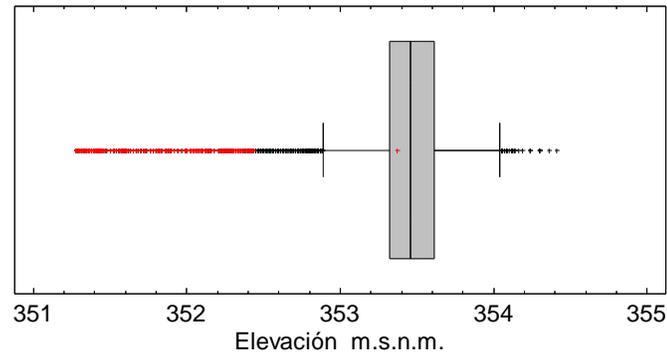
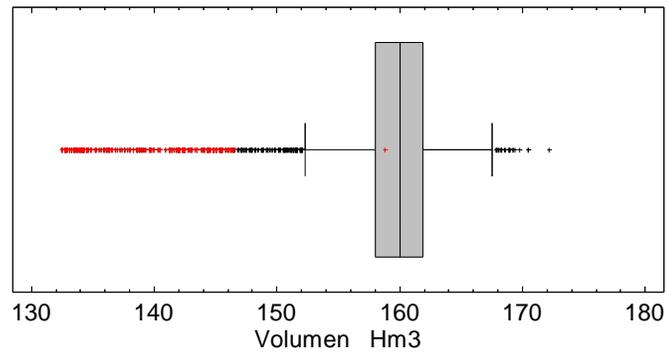
Se muestran y clasifican las variables estudiadas con el resultado estadístico correspondiente:

**Tabla 11:** Análisis comparativo de las variables Área, Volumen, Elevación.

VARIABLE	Media ( $\bar{X}$ )	Mediana ( $P_{50}$ )	Desviación estándar (S)	Coficiente de Variación	Coficiente de Variación (%)
ELEVACION (m.s.n.m)	353.369	353.46	0.4479	0.001267	0.1267
VOLUMEN (Hm <sup>3</sup> )	158.813	160.0	5.745	0.0361	3.6177
AREA (Ha)	1326.35	1332.0	29.2738	0.02207	2.207

De acuerdo a la Tabla 11, se tienen coeficientes de variación pequeños para las distintas variables, por lo que la variabilidad respecto al valor medio lo cual afecta poco a la tendencia central debido a la poca dispersión en el conjunto de datos.

Se muestran la siguiente comparación en las variables mediante el diagrama de caja y bigote:



**Figura 45:** Gráficos de caja y bigote para variables *Volumen*, *Elevación* y *Área*.

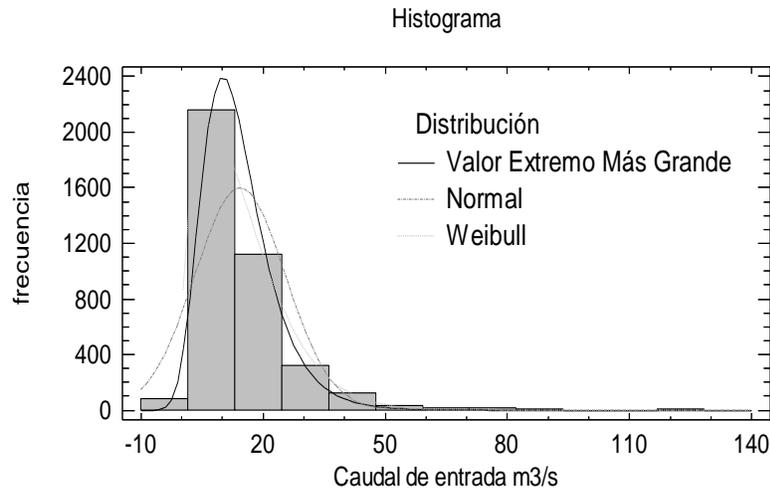
## Variable caudal de entrada del embalse Pao Cachinche.

Se describe y analiza la variable Caudal de Entrada del embalse Pao Cachinche. Dicho caudal es generado por la lluvia y el aporte que generan las distintas cuencas que fluyen en el embalse a través de afluentes como lo son el Rio Chirgua, Rio Paito, Rio San Pedro y Rio Paya. A continuación se da una breve descripción del análisis de la variable.

**Tabla 12:** Resumen estadístico de la variable Caudal de entrada ( $m^3/s$ ).

Recuento	3888
Promedio	14,4428
Mediana	11,197
Desviación Estándar	11,117
Coefficiente de Variación	76,9728%
Mínimo	0,012
Máximo	127,1
Rango	127,088
Sesgo Estandarizado	66,4145
Curtosis Estandarizada	154,784

Se tiene de acuerdo al análisis en tabla 12 un promedio en el caudal de entrada al embalse igual a 14.44  $m^3/s$  para un recuento de 3888 datos analizados con un coeficiente de variación de 76.97% lo que significa que se presentaron incrementos repentinos en el caudal de entrada producto de fuertes precipitaciones. El 50% de los valores de caudal de entrada diarios están en el orden de los 11.19  $m^3/s$ , teniendo en cuenta un mínimo de 0.012  $m^3/s$  y un máximo de 127.1  $m^3/s$  de dicho caudal en estación de estiaje y de lluvia respectivamente.



**Figura 46:** Ajuste de distribuciones del Caudal de Entrada.

**Tabla 13:** Comparación de Distribuciones Alternas para la variable Caudal de Entrada (m<sup>3</sup>/s).

Distribución	Parámetros Est.	Log Verosimilitud	KS D
Loglogística	2	-13573,6	0,0247643
*Valor Extremo Más Grande	2	-13700,7	0,0754227
Weibull	2	-13733,4	0,0753332
Laplace	2	-14147,7	0,124238
Normal	2	-14735,0	0,136938
Valor Extremo Más Chico	<sin ajuste>		

*Nota:* \* distribución que más se ajusta a la variable caudal de entrada.

La distribución que más se ajusta a la variable es la de Valor Extremo Mas Grande con un valor de Log Verosimilitud de -13700.7 y un coeficiente de forma de 0.0754 y de escala de 6.8204, proporcionando la distribución una alternativa a la distribución normal.

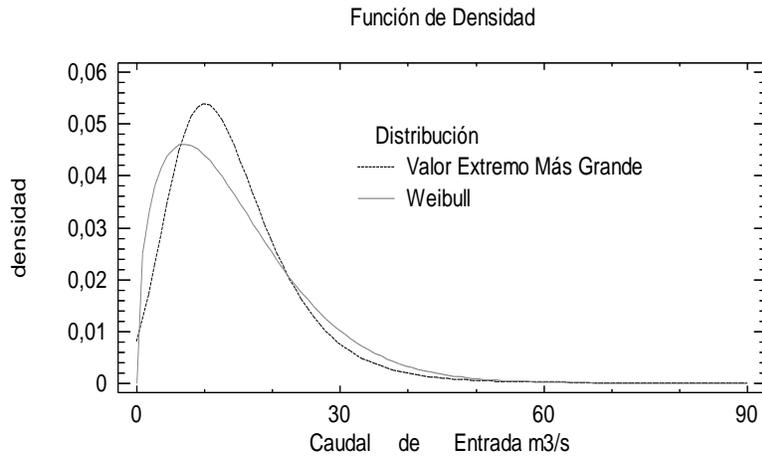


Figura 47: Función de densidad para caudal de entrada.

Se muestra un valor de densidad cercano al valor medio, y una ligera dispersión hacia valores pico de caudal de entrada, demostrando una tendencia favorable a lo largo del periodo de estudio. La dispersión del caudal a lo largo del periodo de estudio de la variable se muestra en la siguiente figura:

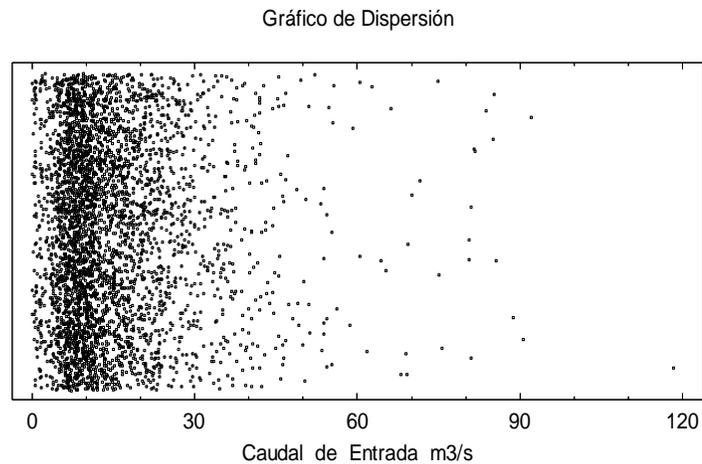


Figura 48: Gráfico de dispersión para la variable Caudal de Entrada.

Se tiene una tendencia hacia el valor medio. El alto valor del coeficiente de variación es debido a los caudales picos ocurridos durante las estaciones lluviosas, estudiando el comportamiento de la variable se demuestra que se mantiene alrededor del valor de la mediana  $11.197 \text{ m}^3/\text{s}$ .

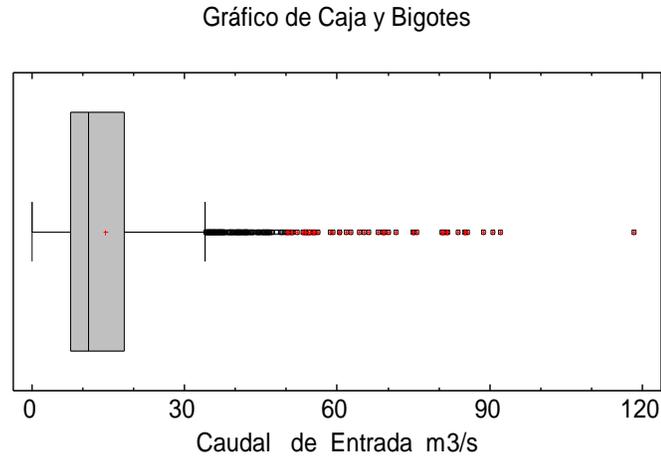
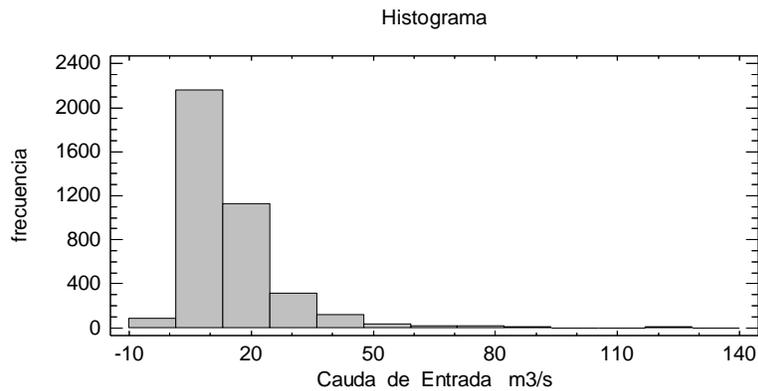


Figura 49: Gráfico de caja y bigotes para la variable Caudal de Entrada.

En la figura 49 se muestra la dispersión en los caudales de entrada debido a caudales picos ocurridos a lo largo del periodo de estudio demostrado en el coeficiente de variación, por lo que un valor representativo del promedio de la variable analizada es la mediana con un valor de  $11.197 \text{ m}^3/\text{s}$ .



**Figura 50:** Histograma de frecuencia para la variable Caudal de Entrada.

**Tabla 14:** Frecuencias para Caudal de Entrada. Embalse Pao Cachinche.

Clase	Límite Inferior	Límite Superior	Punto Medio	Frecuencia	Frecuencia Relativa
	menor o	-10,0		0	0,0000
	igual				
1	-10,0	1,53846	-4,23077	81	0,0210
*2	1,53846	13,0769	7,30769	2157	0,5603
3	13,0769	24,6154	18,8462	1121	0,2912
4	24,6154	36,1538	30,3846	314	0,0816
5	36,1538	47,6923	41,9231	116	0,0301
6	47,6923	59,2308	53,4615	30	0,0078
7	59,2308	70,7692	65,0	12	0,0031
8	70,7692	82,3077	76,5385	10	0,0026
9	82,3077	93,8462	88,0769	7	0,0018
10	93,8462	105,385	99,6154	0	0,0000
11	105,385	116,923	111,154	0	0,0000
12	116,923	128,462	122,692	2	0,0005
	mayor de	140,0		0	0,0000

Media = 14,4428 Desviación Estándar = 11,117

**Nota:** \*clase con mayor frecuencia relativa para la variable en estudio.

Según la tabla 14 se tiene un intervalo que está entre 1.53m<sup>3</sup>/s y 13.07 m<sup>3</sup>/s con un promedio de 7.30 m<sup>3</sup>/s obtenido con un registro de 2157 ocurrencias en el periodo de estudio y una frecuencia relativa del 56.03%, estando la mediana dentro de la clase con un valor de 11.197 m<sup>3</sup>/s.

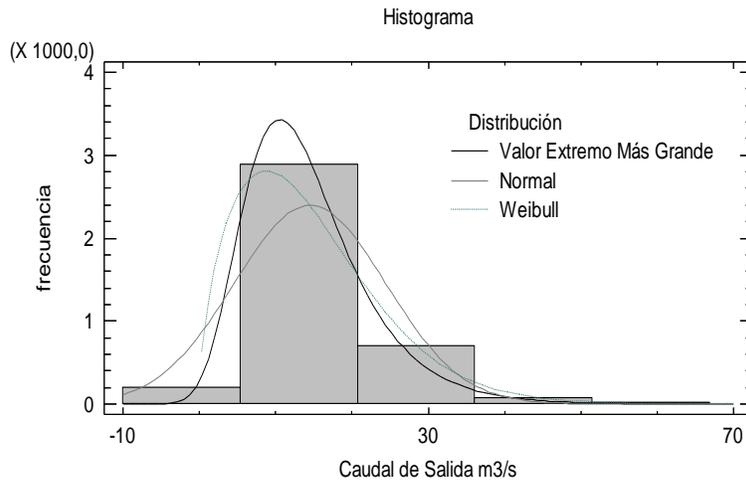
### **Variable caudal de salida del embalse Pao Cachinche.**

Se describe el comportamiento de la variable caudal de salida, cabe destacar que ésta es debida al caudal de extracción o bombeo, evaporación, caudal ecológico y cualquier otra forma de salida de agua del embalse, se tiene la siguiente tabla.

**Tabla 15:** *Resumen estadístico de la variable Caudal de Salida. Embalse Pao Cachinche*

Recuento	3878
Promedio	14,4868
Mediana	11,667
Desviación Estándar	9,93574
Coefficiente de Variación	68,5845%
Mínimo	0,708
Máximo	176,257
Rango	175,549
Sesgo Estandarizado	94,8149
Curtosis Estandarizada	510,836

De acuerdo a la tabla 15 se tiene un valor promedio de 14.48m<sup>3</sup>/s así como un mínimo de 0.708 m<sup>3</sup>/s y un máximo de 176.257 m<sup>3</sup>/s que corresponde a épocas de lluvia. Con un rango absoluto de 175.549 m<sup>3</sup>/s teniendo en cuenta esto, se procede a analizar la variable a profundidad.



**Figura 51:** Gráfica de ajuste de distribuciones para la variable Caudal de Salida.

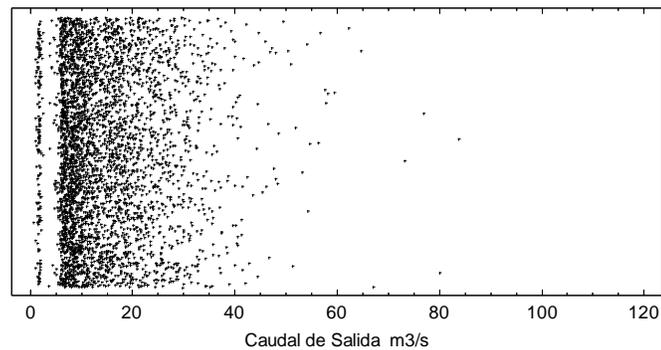
**Tabla 16:** Tabla de Comparación de Distribuciones Alternas para la variable Caudal de Salida. Embalse Pao Cachinche

Distribución	Parámetros	Log	KS D
	Est.	Verosimilitud	
Loglogística	2	-13419,4	0,0584041
*Valor Extremo Más Grande	2	-13471,6	0,07686
Weibull	2	-13594,3	0,116086
Logística	2	-13941,5	0,117912
Laplace	2	-13979,2	0,151472
Normal	2	-14406,6	0,132491
Valor Extremo Más Chico	<sin ajuste>		

*Nota: \*distribución que más se ajusta la variable.*

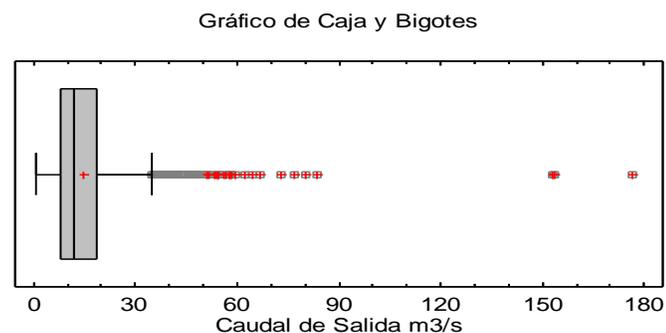
La figura 51 y la tabla 16 muestran el comportamiento de la variable caudal de salida, donde la distribución que más se ajusta es la de Valor Extremo Más Grande con un valor de Log Verosimilitud de -13471.6 y un parámetro de forma de 0.07686.

Se muestra a continuación la dispersión y la frecuencia de ocurrencia de valores de la variable Caudal de Salida.

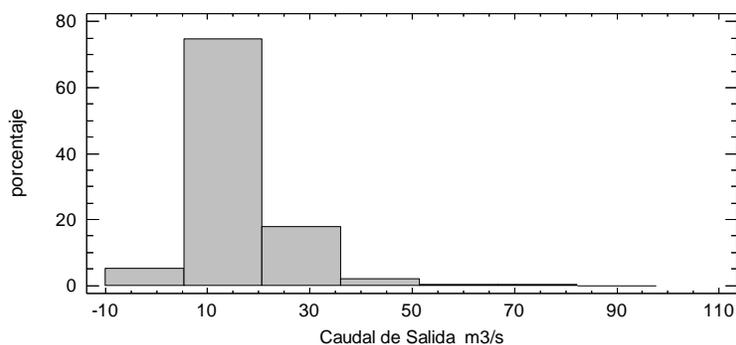


**Figura 52:** Gráfico de dispersión para la variable Caudal de Salida.

Se observa una concentración de valores alrededor del valor medio, y poca dispersión hacia caudales picos, lo que indica que el coeficiente de variación el cual es 68,5845% es un valor elevado debido a ocurrencia de eventos con caudales máximos de salida en el embalse, el siguiente gráfico se muestra la ocurrencia de los valores de caudales picos y su ocurrencia.



**Figura 53:** Gráfico de caja y bigotes para la variable Caudal de Salida. Embalse Pao Cachinche.



**Figura 54:** Histograma de frecuencia relativa para la variable Caudal de Salida.

*Embalse Pao Cachinche.*

**Tabla 17:** Histograma de frecuencia relativa para la variable Caudal de Salida. Embalse Pao Cachinche.

Clase	Límite Inferior	Límite Superior	Punto Medio	Frecuencia	Frecuencia Relativa
	menor o	-10,0		0	0,0000
	igual				
1	-10,0	6,66667	-1,66667	550	0,1418
*2	6,66667	23,3333	15,0	2731	0,7042
3	23,3333	40,0	31,6667	533	0,1374
4	40,0	56,6667	48,3333	50	0,0129
5	56,6667	73,3333	65,0	8	0,0021
6	73,3333	90,0	81,6667	3	0,0008
7	90,0	106,667	98,3333	0	0,0000
8	106,667	123,333	115,0	0	0,0000
9	123,333	140,0	131,667	0	0,0000
10	140,0	156,667	148,333	2	0,0005
11	156,667	173,333	165,0	0	0,0000
12	173,333	190,0	181,667	1	0,0003
	mayor de	190,0		0	0,0000

Media = 14,4868 Desviación Estándar = 9,93574

Nota: \*valores que ocurren con mayor frecuencia.

De acuerdo a la tabla 17 se tiene la mayor ocurrencia en el intervalo que está comprendido entre 6.66 m<sup>3</sup>/s y 23.33 m<sup>3</sup>/s donde se encuentra incluido dentro de esta clase el valor medio 14,4868 m<sup>3</sup>/s. de manera análoga se estudia el coeficiente de variación el cual es cercano al 100% con lo que se tiene que el valor representativo del conjunto de valores para la variable Caudal de Salida es la mediana con 11,667 m<sup>3</sup>/s.

#### Variable caudal de alivio del embalse Pao Cachinche.

Se analizan y discute de manera breve el análisis estadístico de la variable Caudal de Alivio como mecanismo de seguridad para evitar el desbordamiento y controlar los niveles operativos del embalse Pao Cachinche.

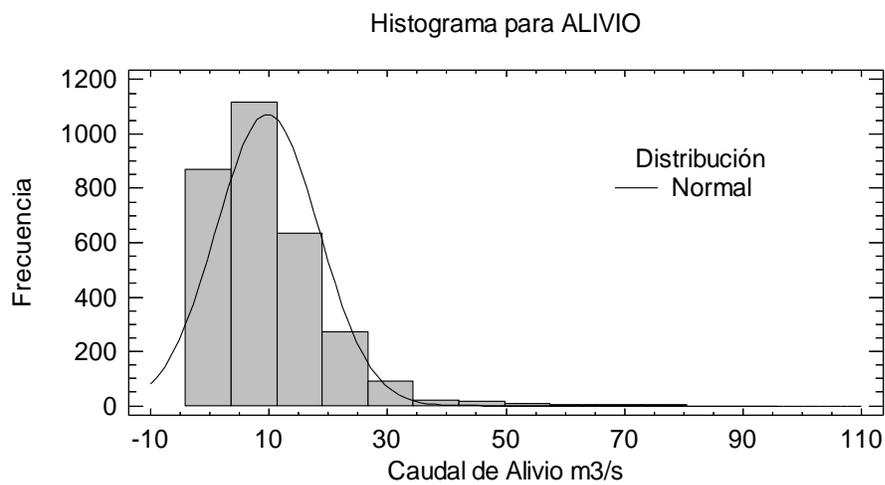
**Tabla 18:** Resumen estadístico para la variable Caudal de Alivio. Embalse Pao Cachinche.

Recuento	3021
Promedio	9,74629
Mediana	7,525
Desviación Estándar	8,63464
Coeficiente de Variación	88,5941%
Mínimo	0,064
Máximo	76,823
Rango	76,759
Sesgo Estandarizado	37,6725
Curtosis Estandarizada	55,1381

Se tiene en la tabla 18 el caudal promedio de alivio de 9.74m<sup>3</sup>/s con un coeficiente de variación de 88.59% debido a los caudales picos originados los

cuales son caudal mínimo de 0.064 m<sup>3</sup>/s y un caudal máximo de 76.823 m<sup>3</sup>/s el cual no supera la capacidad máxima del aliviadero con un valor de 760 m<sup>3</sup>/s según ficha técnica del embalse Pao Cachinche.

Se muestra a continuación el ajuste de distribución que más se ajusta a la variable en estudio.



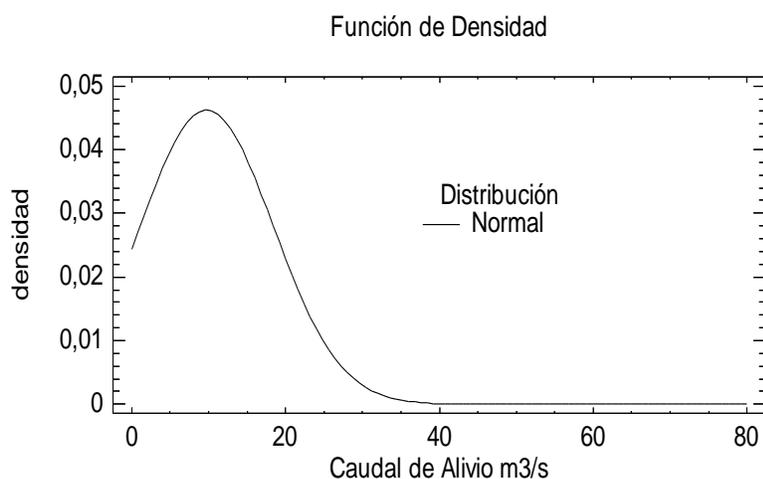
**Figura 55:** Ajuste de distribuciones para la variable Caudal de Alivio. Embalse Pao Cachinche.

**Tabla 19:** Distribución de probabilidades para la variable Caudal de Alivio. Embalse Pao Cachinche.

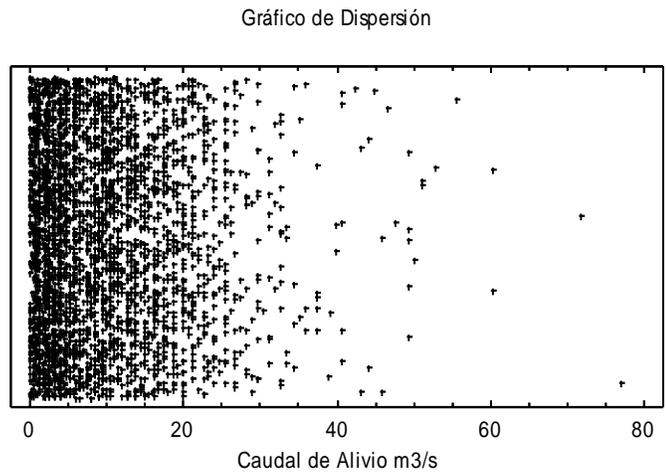
Distribución	Parámetros Est.	Log Verosimilitud	KS D
Weibull	2	-9877,87	0,0468572
Loglogística	2	-10124,5	0,0763728
Lognormal	2	-10176,3	0,103931
Valor Extremo Más Grande	2	-10249,9	0,0966647
*Normal	2	-10798,7	0,13107
Gaussiana Inversa	2	-10852,2	0,230243

Nota: \*distribución que más se ajusta a la variable.

La distribución que más se ajusta a la variable Caudal de Alivio es la distribución normal con un valor de Log verosimilitud de -10798.7 y coeficiente de forma de 0.1310.

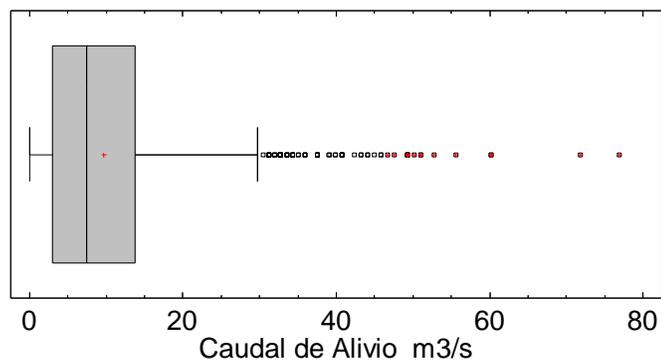


**Figura 56:** Gráfica función de densidad para variable Caudal de Alivio.



**Figura 57:** Gráfico de dispersión para la variable Caudal de Alivio. Embalse Pao Cachinche.

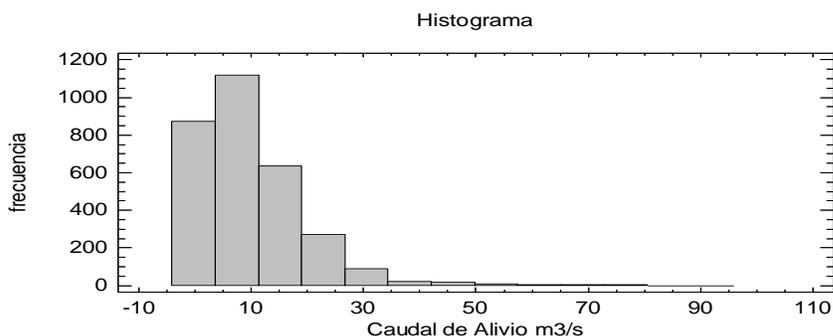
Se observan caudales picos en la distribución de los valores, te tiene una distribución homogénea en los valores alrededor del valor medio.



**Figura 58:** Gráfico de caja y bigotes para la variable Caudal de Alivio. Embalse Pao Cachinche.

Se observa en la figura 58 valores dispersos de caudales picos en el aliviadero, producto de fuertes precipitaciones, por lo que existe cierta cantidad de valores que influyen en el coeficiente de variación. Cabe destacar en el siguiente análisis que el valor de descarga del aliviadero se encuentra parte del

periodo de análisis inactivo, y una descarga dentro del rango mostrado en la figura **qa4** como es de esperar debido a que el embalse mantiene un nivel operativo cercano a la cota de alivio, dicho nivel es susceptible a generar con mayor facilidad caudales de descarga por alivio.



**Figura 59:** Histograma de frecuencia para la variable Caudal de Alivio. Embalse Pao Cachinche.

**Tabla 20:** Frecuencias para la variable Caudal de Alivio (m3/s).

Clase	Límite Inferior	Límite Superior	Punto Medio	Frecuencia	Frecuencia Relativa
	menor o	-4,0		0	0,0000
	igual				
1	-4,0	3,69231	-0,153846	870	0,2880
*2	3,69231	11,3846	7,53846	1116	0,3694
3	11,3846	19,0769	15,2308	633	0,2095
4	19,0769	26,7692	22,9231	271	0,0897
5	26,7692	34,4615	30,6154	88	0,0291
6	34,4615	42,1538	38,3077	19	0,0063
7	42,1538	49,8462	46,0	15	0,0050
8	49,8462	57,5385	53,6923	5	0,0017
9	57,5385	65,2308	61,3846	2	0,0007
10	65,2308	72,9231	69,0769	1	0,0003
11	72,9231	80,6154	76,7692	1	0,0003
	mayor de	96,0		0	0,0000

Media = 9,74629 Desviación Estándar = 8,63464

Nota: \* intervalo donde existe mayor cantidad de ocurrencia de valores.

Los valores de caudal de alivio que ocurren con mayor frecuencia están entre los límites inferior 3.69 m<sup>3</sup>/s y superior 11.3 m<sup>3</sup>/s con una frecuencia absoluta de 1116 y una frecuencia relativa relativamente baja de 36.94% debido a la poca frecuencia de valores en este rango.

### **Variable caudal ecológico del embalse Pao Cachinche.**

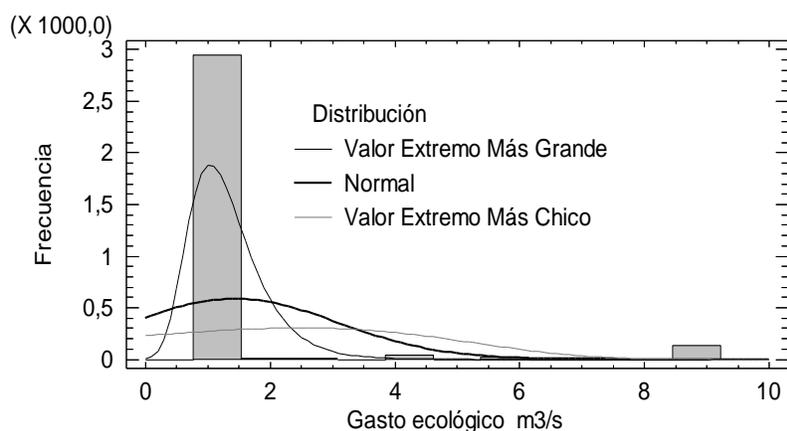
Se describe y analiza la variable Caudal Ecológico del embalse, éste gestiona la cantidad y régimen de agua requerido para mantener los componentes, funciones, procesos de los ecosistemas acuáticos. Se toma en cuenta este caudal debido a su potencial para generación de energía.

*Tabla 21: Resumen Estadístico para Caudal Ecológico (m<sup>3</sup>/s).*

Recuento	3888
Promedio	1,43735
Mediana	1,25
Desviación Estándar	1,64248
Coefficiente de Variación	114,271%
Mínimo	0,835
Máximo	9,1
Rango	8,265
Sesgo Estandarizado	95,3393
Curtosis Estandarizada	186,003

Se resumen los valores estadísticos para la variable Caudal Ecológico en la tabla 21 arrojando un caudal promedio de 1.43 m<sup>3</sup>/s, el caudal mínimo de 0.835 m<sup>3</sup>/s y un máximo de 9.1 m<sup>3</sup>/s para estaciones lluviosas, con una mediana de 1.25 m<sup>3</sup>/s, el análisis de datos más preciso resulta del ajuste de

distribuciones. Se muestra por otra parte que el ajuste que más se acomoda es de Valor Extremo Más Grande para la variable Caudal Ecológico.



**Figura 60:** Ajuste de distribuciones para la variable Caudal Ecológico. Embalse Pao Cachinche

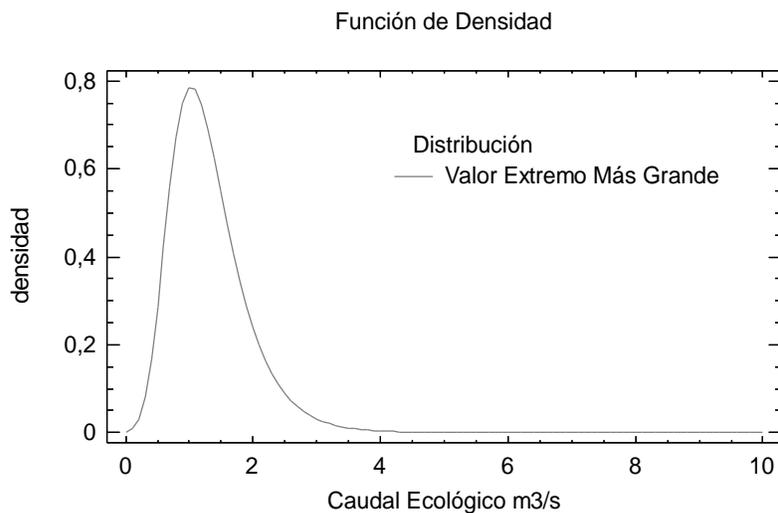
**Tabla 22:** Comparación de Distribuciones Alternas para la variable Caudal Ecológico.

Distribución	Parámetros		KS D
	Est.	Log Verosimilitud	
Loglogística	2	-1947,87	0,251459
*Valor Extremo Más Grande	2	-3407,88	0,410214
Laplace	2	-3455,07	0,43886
Normal	2	-5982,41	0,48427
Valor Extremo Más Chico	2	-7593,73	0,461205

Nota: \*distribución de probabilidad que más se ajusta a la variable.

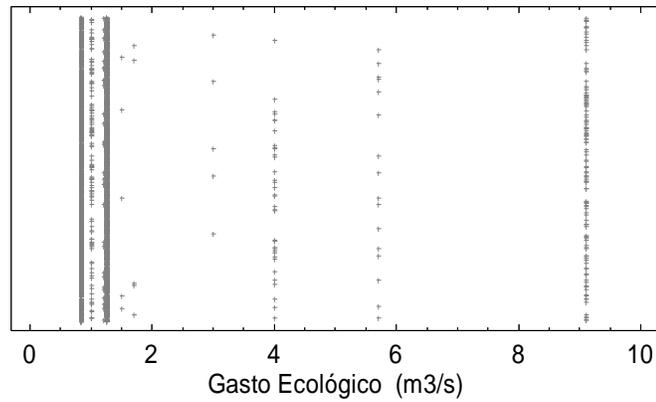
La tabla 22 compara las distintas distribuciones en la que se puede determinar cuál se ajusta mejor a la variable Caudal Ecológico. De acuerdo con el estadístico log verosimilitud y la figura 60, la distribución de mejor ajuste es la distribución Loglogística; sin embargo, se tiene que las distribuciones que más se ajustan al estudio de las variables hidrológicas son las mostradas en la gráfica de distribuciones anterior, con lo que se toma la distribución Valor

Extremo Más Grande con un valor de Log Verosimilitud -3407,88 mostrado en la tabla anterior.



**Figura 61:** Gráfico de densidad suavizada para el Caudal Ecológico. Embalse Pao Cachinche.

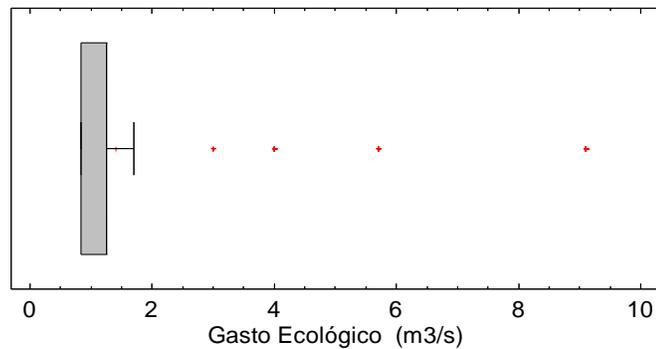
La figura 61 muestra la variable Caudal Ecológico para una densidad determinada, dando una densidad para eventos de caudal medio para cada año en estudio, así mismo ésta gráfica presenta una asimetría con respecto a los valores medios de caudal, sin embargo existe una pequeña probabilidad de ocurrencia de eventos superiores a la media como se presenta en la siguiente figura 62, los datos de la variable Caudal Ecológico y su distribución de ocurrencias a lo largo del periodo de estudio permite conocer con qué frecuencia ocurren los valores de la variable.



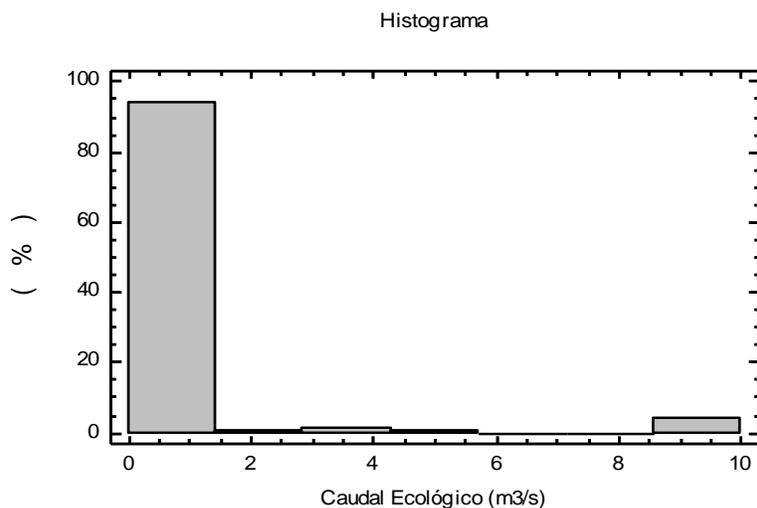
**Figura 62:** Gráfico de dispersión para la variable Caudal Ecológico. Embalse Pao Cachinche.

Se observa en una dispersión en los datos, siendo favorable la dispersión hacia valores mayores al valor medio, en esta variable se tiene un coeficiente de variación de 114.27% con lo que se demuestra que hay una variación en los datos debido en su parte al rango igual a  $8,265\text{m}^3/\text{s}$  originado por la dispersión hacia valores pico que varían dependiendo de la estación climática a presentarse durante el año.

Gráfico de Caja y Bigotes



**Figura 63:** Gráfico de caja y bigotes para la variable Caudal Ecológico.



**Figura 64:** Histograma de frecuencia relativa para la variable Caudal Ecológico. Embalse Pao Cachinche.

**Tabla 23:** Frecuencias para Caudal Ecológico (m<sup>3</sup>/s). Embalse Pao Cachinche.

Clase	Límite Inferior	Límite Superior	Punto Medio	Frecuencia	Frecuencia Relativa
	menor o	0,0		0	0,0000
	igual				
*1	0,0	1,42857	0,714286	2933	0,9389
2	1,42857	2,85714	2,14286	10	0,0032
3	2,85714	4,28571	3,57143	40	0,0128
4	4,28571	5,71429	5,0	16	0,0051
5	5,71429	7,1286	6,42857	0	0,0000
6	7,14286	8,57143	7,85714	0	0,0000
7	8,57143	10,0	9,28571	125	0,0400
	mayor de	10,0		0	0,0000

Nota: \*valor con mayor frecuencia

Se muestra en la tabla 23 la clase 1 con mayor frecuencia de ocurrencia, dicha clase posee un valor mínimo de  $0\text{m}^3/\text{s}$  hasta  $1.42857\text{m}^3/\text{s}$  para la obtención de un caudal promedio de  $0.714\text{ m}^3/\text{s}$  con una frecuencia absoluta de 2933 y frecuencia relativa del 93.89%. El valor de la mediana  $1.25\text{ m}^3/\text{s}$  es el que mejor representa la variable Caudal Ecológico debido al alto coeficiente de variación el cual hace que el promedio de los datos no sea representativo.

Variable caudal de bombeo o extracción, del embalse Pao Cachinche.

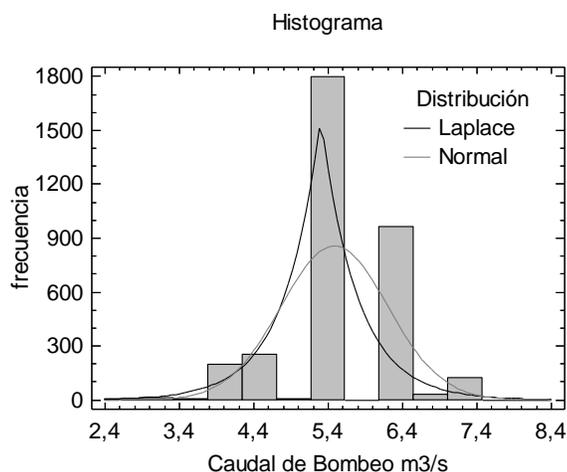
A continuación se analizan y discuten los datos obtenidos de la variable Caudal de Extracción del embalse Pao Cachinche, este caudal se utiliza con fines de abastecimiento al acueducto regional del centro del estado Carabobo, pasa a través de la planta Alejo Zuloaga y posteriormente es derivada hacia las distintas zonas del estado Carabobo.

**Tabla 24:** Resumen Estadístico para la variable Caudal de bombeo  $\text{m}^3/\text{s}$ .

Recuento	3888
Promedio	5,48436
Mediana	5,3
Desviación Estándar	0,722659
Coeficiente de Variación	13,1767%
Mínimo	2,7
Máximo	7,2
Rango	4,5
Sesgo Estandarizado	-3,0167
Curtosis Estandarizada	5,0542

La tabla 24 muestra el valor medio del caudal diario de extracción o de bombeo igual a 5.48 m<sup>3</sup>/s obtenidos a partir de un recuento de 3888 datos para la variable en estudio así mismo posee un coeficiente de variación igual a 13.17% lo que hace el valor promedio representativo del caudal de extracción, el valor mínimo de extracción 2.7 m<sup>3</sup>/s y máximo de 7.2 m<sup>3</sup>/s.

A continuación se muestra el ajuste de distribuciones para caudal de extracción.



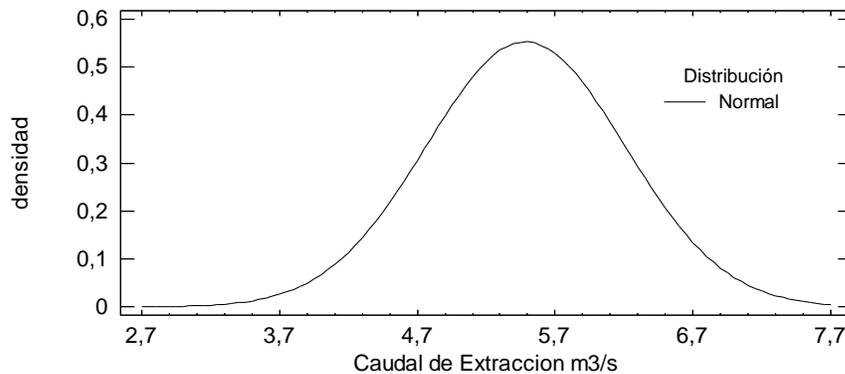
**Figura 65:** Ajuste de distribuciones para la variable Caudal de extracción. Embalse Pao Cachinche.

**Tabla 25:** Comparación de Distribuciones Alternas para la variable Caudal de Extracción (m<sup>3</sup>/s)

Distribución	Parámetros Est.	Log Verosimilitud	KS D
*Laplace	2	-3312,76	0,333978
Logística	2	-3651,37	0,271883
Normal	2	-3676,84	0,259122

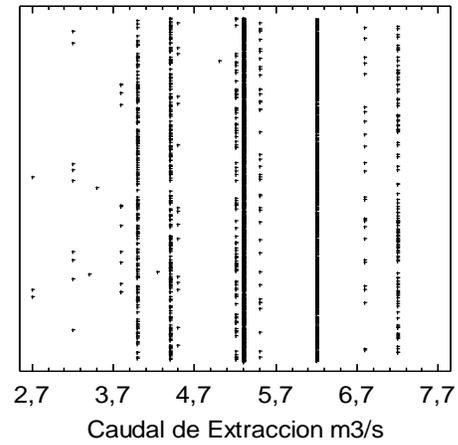
Nota: \* distribución que más se ajusta a la variable.

En la tabla 25 y la figura 65, indica un mejor ajuste para la distribución Laplace por ser una función que se ajusta mejor al estudio de variables hidroenergéticas, con un valor de Log Verosimilitud de -3312.76 un parámetro de forma de 0.333978.

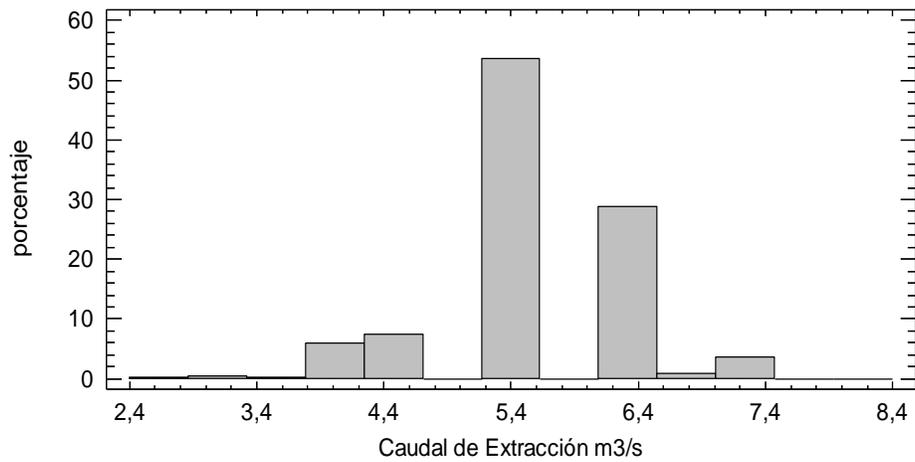


**Figura 66:** Gráfico de densidad para la variable Caudal de Extracción. Embalse Pao Cachinche.

La curva de densidad en la figura 66 muestra una ligera asimetría negativa por lo que indica que la tendencia diaria es de caudales mayores al valor medio. Se muestra a continuación en la figura **\_qb4\_** la tendencia en los valores. Demostrándose así una ligera tendencia a valores mayores al promedio.



**Figura 67:** Gráfico de densidad para la variable Caudal de Extracción. Embalse Pao Cachinche.



**Figura 68:** Histograma de frecuencia relativa para la variable Caudal de Extracción. Embalse Pao Cachinche.

La tendencia es hacia valores puntuales, debido a la demanda diaria según consumo, se tiene que el valor representativo de la muestra para la variable es el promedio por poseer un coeficiente de variación 13.17% el cual es relativamente conservador.

**Tabla 26:** Frecuencias para la variable Caudal de Extracción ( $m^3/s$ ). Embalse Pao Cachinche.

Clase	Límite Inferior	Límite Superior	Punto Medio	Frecuencia	Frecuencia Relativa
	menor o	2,4		0	0,0000
	igual				
1	2,4	2,86154	2,63077	3	0,0009
2	2,86154	3,32308	3,09231	9	0,0027
3	3,32308	3,78462	3,55385	2	0,0006
4	3,78462	4,24615	4,01538	195	0,0580
5	4,24615	4,70769	4,47692	248	0,0738
6	4,70769	5,16923	4,93846	1	0,0003
*7	5,16923	5,63077	5,4	1796	0,5344
8	5,63077	6,09231	5,86154	0	0,0000
9	6,09231	6,55385	6,32308	963	0,2865
10	6,55385	7,01538	6,78462	26	0,0077
11	7,01538	7,47692	7,24615	118	0,0351
12	7,47692	7,93846	7,70769	0	0,0000
13	7,93846	8,4	8,16923	0	0,0000
	mayor de	8,4		0	0,0000

Media = 5,48436 Desviación Estándar = 0,722659

Nota: \*valores que ocurren con mayor frecuencia.

De acuerdo con la tabla 26 se tiene que los valores que se dan con mayor frecuencia están comprendidos entre el límite inferior 5.16  $m^3/s$  y 5.63  $m^3/s$  en el cual se encuentra el valor medio del conjunto de datos igual a 5.48  $m^3/s$  el cual es el valor representativo de la variable caudal de bombeo.

Series de tiempo para la variables hidroenergéticas.

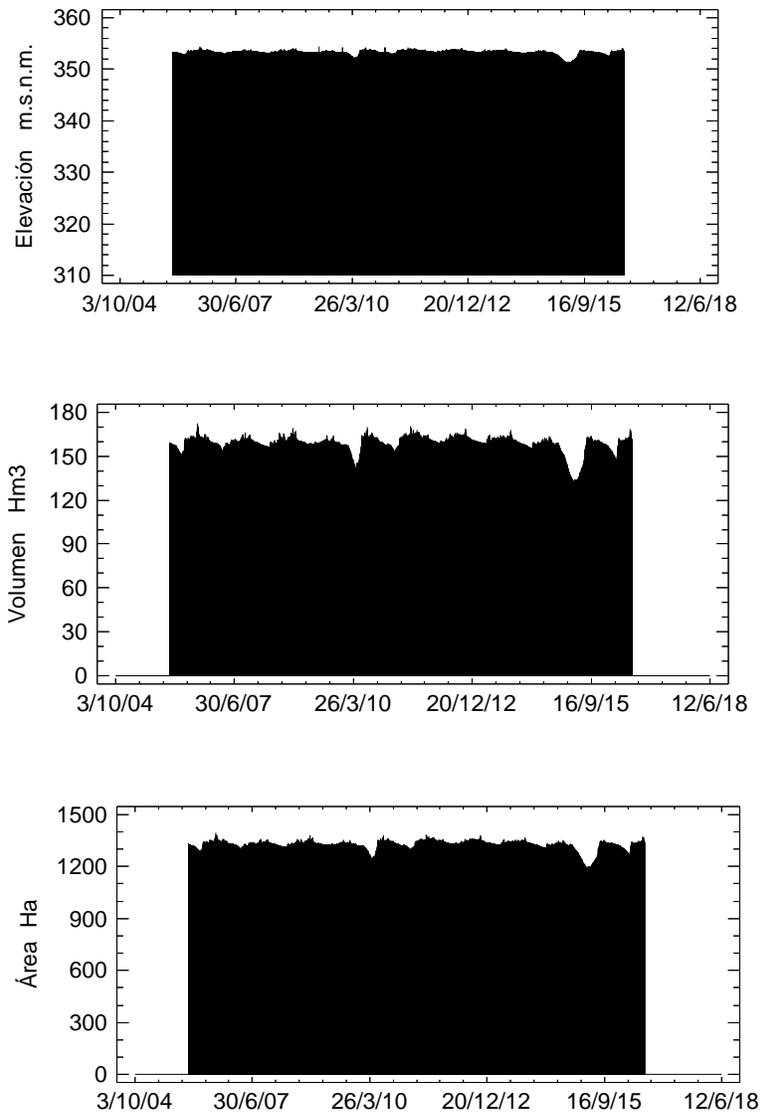
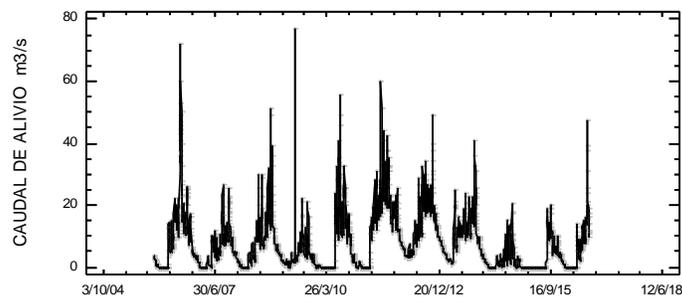
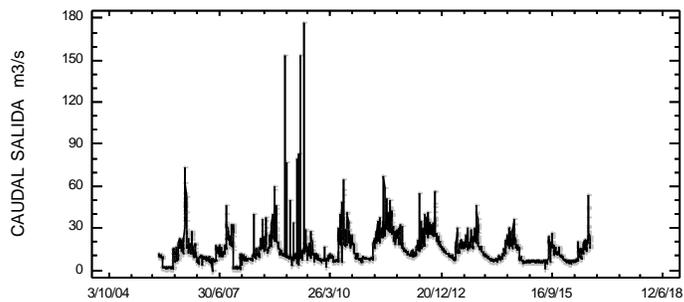
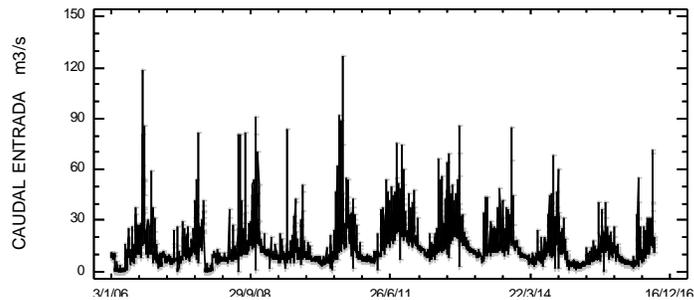
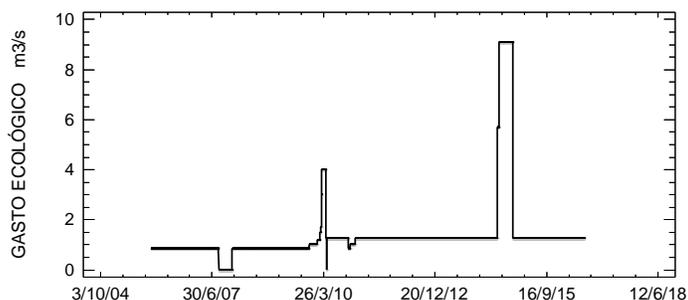


Figura 69: Series de tiempo para las variables: Elevación, Volumen y Área. Embalse Pao Cachinche. (2006-2016)

Se muestra la figura 69 donde la tendencia de los datos marca incrementos considerablemente más rápidos que en las caídas, además se puede apreciar una tendencia cíclica en relación directa con las estaciones del año donde los

meses de julio, agosto e inicios de septiembre marca la tendencia más elevada de las series, caso contrario ocurre en los meses de enero a marzo donde se acentúa la estación de estiaje y por lo tanto picos más bajos, se observa una tendencia cíclica entre 2011 y 2013 con poca variabilidad, donde se mantiene un ciclo relativamente estable. Para finales del año 2014 se tiene una caída significativa en el volumen del embalse, para el año 2016 se tiene una tendencia estable. Para la variable Elevación, se tiene un nivel estable respecto al valor medio, este se presenta una tendencia estable muy por encima del nivel muerto del embalse el cual es 320 m.s.n.m.





**Figura 70:** *Gráfica de comparación de caudales representativos. Embalse Pao Cachinche.*

El gráfico de la serie de tiempo de los caudales del embalse Pao Cachinche presentan una tendencia de comportamiento similar a la de la serie de tiempo de las variables área, volumen y elevación, el registro histórico del caudal ecológico se muestra estable en la mayor parte del periodo de estudio 2006-2016. Las series no muestran tendencia alguna, debido a la irregularidad y a las demandas diarias de caudal según su uso estipulado.

*Resumen estadístico de las variables hidroenergéticas del embalse Pao Cachinche.*

**Tabla 27:** *Resumen estadístico de las variables hidroenergéticas. Embalse Pao Cachinche.*

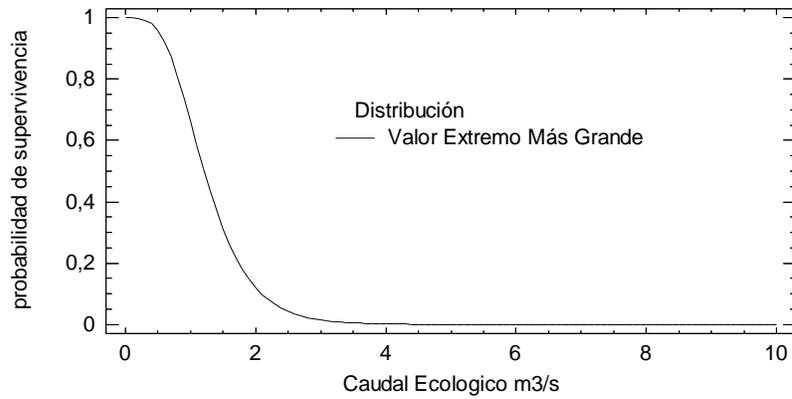
<i>Variable</i>	<i>Promedio</i>	<i>Media</i>	<i>Valor representativo</i>	<i>Valor Min</i>	<i>Valor Max</i>	<i>Frecuencias de valores iguales o mayores al valor representativo</i>
<i>Elevación (m.s.n.m.)</i>	<i>353.369</i>	<i>353.46</i>	<i>353.369</i>	<i>351.28</i>	<i>354.41</i>	<i>1597 De 3888</i>
<i>Área (Ha)</i>	<i>1325.35</i>	<i>1332</i>	<i>1325.35</i>	<i>1136</i>	<i>1393</i>	<i>2950 De 3888</i>
<i>Volumen (Hm<sup>3</sup>)</i>	<i>158.813</i>	<i>160</i>	<i>158.813</i>	<i>132.5</i>	<i>172.2</i>	<i>2456 De 3888</i>
<i>caudal de entrada (m<sup>3</sup>/s)</i>	<i>14.44</i>	<i>11.197</i>	<i>11.197</i>	<i>0.012</i>	<i>127.1</i>	<i>2157 De 3888</i>
<i>Caudal de salida (m<sup>3</sup>/s)</i>	<i>14.48</i>	<i>11.667</i>	<i>11.667</i>	<i>0.708</i>	<i>176.257</i>	<i>2731 De 3888</i>
<i>Caudal ecológico (m<sup>3</sup>/s)</i>	<i>1.437</i>	<i>1.25</i>	<i>1.25</i>	<i>0.835</i>	<i>9.1</i>	<i>2933 De 3888</i>
<i>Caudal extracción (m<sup>3</sup>/s)</i>	<i>5.48</i>	<i>5.3</i>	<i>5.48</i>	<i>2.7</i>	<i>7.2</i>	<i>1796 De 3888</i>
<i>Caudal de Alivio (m<sup>3</sup>/s)</i>	<i>9.74</i>	<i>7.525</i>	<i>7.525</i>	<i>0.064</i>	<i>76.823</i>	<i>1116 De 3888</i>

### ***Potencial Hidroeléctrico.***

El embalse Pao Cachinche ofrece caudales con capacidad para la generación de energía eléctrica, el caudal ecológico ofrece un caudal estable para la generación, debido al uso como caudal ecológico éste disipa la energía potencial generada por la columna de agua, el caudal ecológico representa un total de 11.16% del caudal de entrada el cual es usado como caudal para la preservación de la flora y fauna. El caudal de alivio no predomina para este estudio dado que ocurre en épocas lluviosas, y que sólo ocurre cuando el nivel del embalse supera al nivel de la cresta del aliviadero.

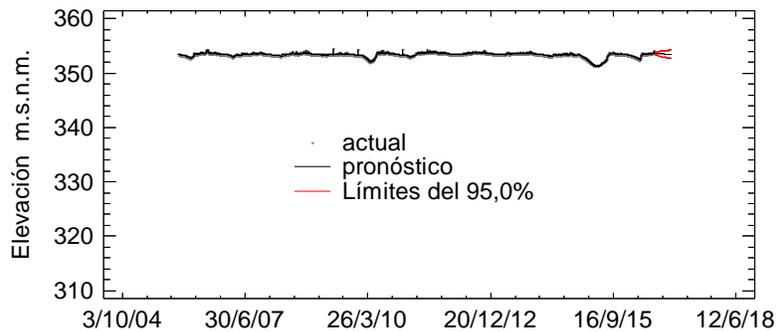
El caudal de bombeo o de extracción es de 5.48 m<sup>3</sup>/s éste cumple con el abastecimiento del sistema regional del centro, y no se considera para la generación de energía, y a que este va hacia la sala de bombeo para su uso original de abastecimiento urbano.

Se escoge la alternativa de caudal ecológico con un aporte de 1.25 m<sup>3</sup>/s para la generación de energía, este caudal se capta mediante la torre toma del embalse y es conducido a través de un túnel el cual deriva en dos tuberías, una para abastecimiento urbano y otro para caudal ecológico, se dispone para este último una bifurcación que dirige el caudal de vuelta al cauce del Rio Pao, por lo que se tomara este caudal para dirigirlo hacia la turbina seleccionada de acuerdo al análisis realizado.



**Figura 71:** *Función de supervivencia para la variable caudal ecológico. Embalse Pao Cachinche.*

Se tiene una probabilidad de supervivencia de más del 50% para la variable caudal ecológico, además de ser un caudal que tiene una tendencia estable debido a su importancia para la supervivencia de la flora y fauna, posee un pronóstico bastante favorable de supervivencia para ser usado como fuente continua a lo largo del año.



**Figura 72:** *Pronósticos para la variable Elevación. Embalse Pao Cachinche.*

Para determinar la carga de agua o altura de diseño para la potencia aprovechable de la turbina ubicada a pie de presa, asumiendo la carga neta generada por el embalse es igual a la diferencia de elevación entre la descarga del gasto ecológico y la altura promedio del espejo de agua datos provenientes del análisis estadístico realizado el cual mantiene un pronóstico estable como se muestra en la figura 72.

### Obras de ingeniería del embalse Pao Cachinche.

Se describen a continuación las obras para la captación y disposición del embalse según “Análisis comparativo de la capacidad de almacenamiento del embalse Pao Cachinche, Estado Carabobo”. La Cruz Y Mijares, 2015.

#### **Obras de toma**

Las obras de toma están ubicadas en el estribo izquierdo de la presa y constan de una Torre Toma, Túnel de desviación, Compuerta de Emergencia, Bifurcación de la Toma, obras de regulación y control y finalmente, un canal de descarga.

#### **Torre Toma**

En la figura 73. Se observa que la torre toma es un cilindro de concreto armado, de 5m de diámetro interno y 6,10 m de diámetro exterior. La plataforma de operación está ubicada a una cota de 360,43 m.s.n.m. y la fundación a cota 306,93 m.s.n.m. por lo que la altura total de esta estructura es de 53,50m. La base de la torre toma está formada por dos fustes de concreto armado, el inferior de 17m de diámetro y 6m de altura y el superior de 6,5 m de diámetro y 4m de altura.

La estructura esta provista por ocho compuertas planas deslizantes de 1,83m de altura por 0,91m de ancho, las cuales se identifican del N°1 al N°8, de arriba hacia abajo. Y los niveles medio de cada compuerta se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 28:** Nivel de los puntos medios de las compuertas de la Torre- Toma. Embalse Pao Cachinche (HIDROCENTRO).

Compuerta	Elevación (m.s.n.m.)
1	349.93
2	346.43
3	342.93
4	339.43
5	335.93
6	332.43
7	328.93
8	320.43

Cada compuerta está protegida por una reja plana de 4,70m de altura por 2,04m de ancho, formada por pletinas verticales de acero, separadas 10cm c/c. Las rejas deslizan en guías laterales que llegan a la plataforma superior de operación de la torre-toma.

En la plataforma superior, situada a una cota de 360,43 msnm, están instalados los sistemas de operación de las compuertas, las cuales son de tipo mecánico, accionados por motores eléctricos y/o manualmente.

En la base existe un codo vertical de 90° y 3,50m de diámetro interno que lo conecta con un conducto de concreto armado de 19m de longitud, el cual finaliza en el portal de entrada del túnel.

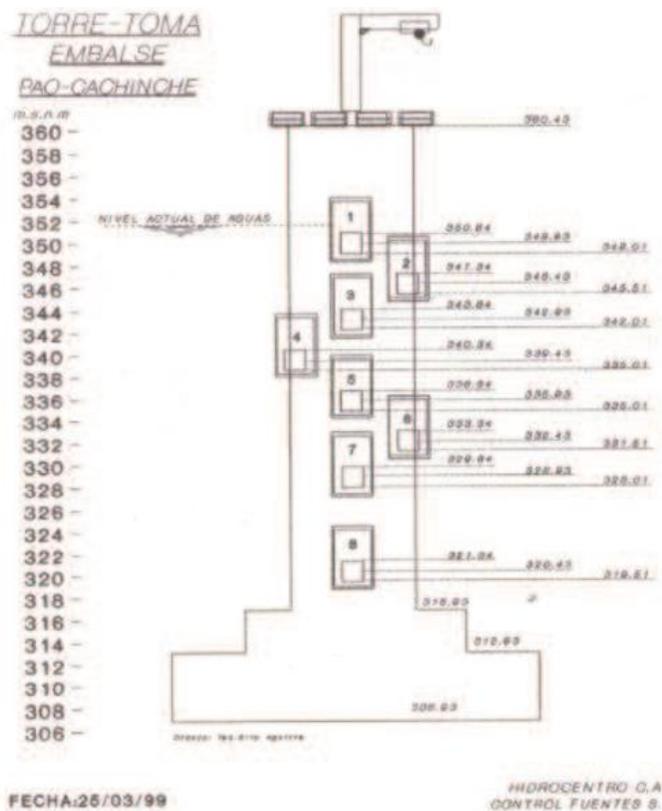


Figura 73: Esquema de la Torre Toma. (Suarez, 1999)

### Túnel De Desviación

El túnel está compuesto por dos tramos, el primero, aguas arriba de la compuerta de emergencia, tiene una longitud de 237 m, un diámetro interno de 3,50 m, revestido de concreto armado. Este tramo del túnel funciona a presión.

El segundo tramo, aguas debajo de la compuerta de emergencia, tiene una longitud de 144m, un diámetro interno de 3,50m, revestido en concreto armado. Se tiene una tubería visitable de acero de 1,83m (72") de diámetro, por lo que el túnel no está a presión.

La pendiente del túnel en toda su longitud de 377m, es constante e igual a 0,014.

### **Compuerta de Emergencia**

Dentro del túnel, 144m aguas arriba del portal de salida, se encuentra una cámara excavada en roca, en la que se encuentra una compuerta de emergencia, plana, deslizante, cuadrada de 1,52m, de lado, accionada hidráulicamente. Aguas arriba de la compuerta hay una transición gradual, en forma de contracción, que pasa de la sección circular del túnel a la sección cuadrada de la compuerta. Aguas debajo de la compuerta existe otra transición gradual en forma de expansión para conducir el flujo a la tubería de acero del 1,83 m de diámetro.

Esta compuerta está equipada con varios accesorios como: by-pass, ventosas, junta dresser, etc.

### **Bifurcación de la toma**

La tubería de toma se bifurca, 15m aguas abajo del portal de salida del túnel. Un ramal de la misma continua en forma rectilínea mediante una reducción gradual a 0,91(36") de diámetro, para determinar en la válvula de regulación de la descarga al cauce del río Pao. Otro ramal se desvía hacia la izquierda de la tubería principal y se reduce a un diámetro 1,37m (54"), para

alimentar la estación de bombeo situada al pie de la presa, que hace la distribución del agua a Valencia y otras regiones.

## Descarga

El ramal rectilíneo de la tubería de toma termina en una válvula howell-Bunger de 0,91m (36") de diámetro accionada mecánicamente, mediante un motor eléctrico y/o un volante manual, Esta válvula regula el caudal que se va a descargar al cauce aguas debajo de la presa.

Todo lo antes descrito con respecto a los componentes de la obra de toma Túnel de desviación, Compuerta de Emergencia, Bifurcación de la Toma y la descarga. Se puede observar en la siguiente Figura 74.

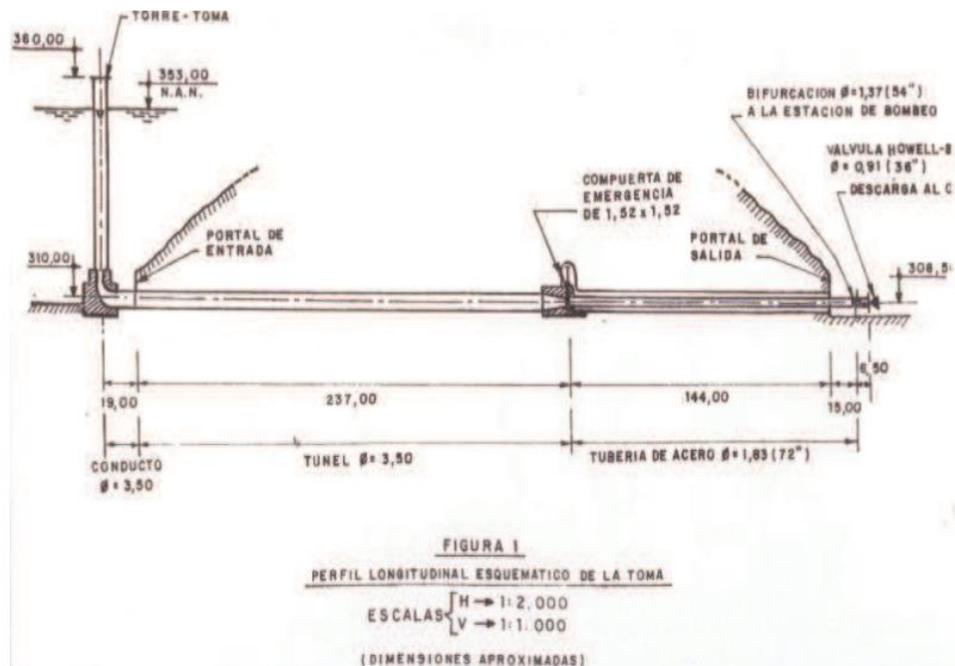


Figura 74: Perfil longitudinal esquemático de la toma y descarga. (Suarez, 1999)

## Aliviadero

Para el diseño de esta obra se tomó en cuenta que la creciente máxima para frecuencia de 100 años, según un informe hidrológico del MOP fue de 1.900 m<sup>3</sup>, calculada por el hidrógrafo deducido del correspondiente al Paso de la Balsa. Sin embargo el caudal pico de la creciente de diseño es de 3898 m<sup>3</sup>/s, El paso de la creciente por el embalse disminuye el pico de salida a 740 m<sup>3</sup>/s, usando finalmente para el cálculo hidráulico del aliviadero un gasto máximo de 760 m<sup>3</sup>/s.

Las características de planta y perfil del aliviadero fueron objeto de números tanteos, ya que la topografía no ofrecía ninguna ventaja evidente para una solución determinada. La solución usada en definitiva fue la de un vertedero en abanico, de descarga libre ubicado en el estribo izquierdo de la presa, como se mostró en la figura anterior.

El vertedero lateral tiene una cota de la cresta de 353.28 msnm y longitud de la cresta de 38m, para una carga máxima de 4,5m. En la Figura 185. Se observa que es un vertedor de sección "ogee" que descarga en un canal de eje paralelo a su cresta, de sección trapezoidal, seguida de una transición rectangular inmediatamente aguas abajo del vertedero. La primera parte del canal descarga con una pendiente lenta (0,001) y se prolonga con alineamiento curvo hasta pasar la divisoria del estribo, donde comienza el canal rápido con una longitud de 234m de sección rectangular y alineamiento recto, con pendiente rápida de (0,368). El rápido termina en el lecho amortiguador de sección rectangular escalonada, donde se disipara la mayor parte de la energía antes de descargar finalmente al río.

### *Potencial hidroeléctrico*

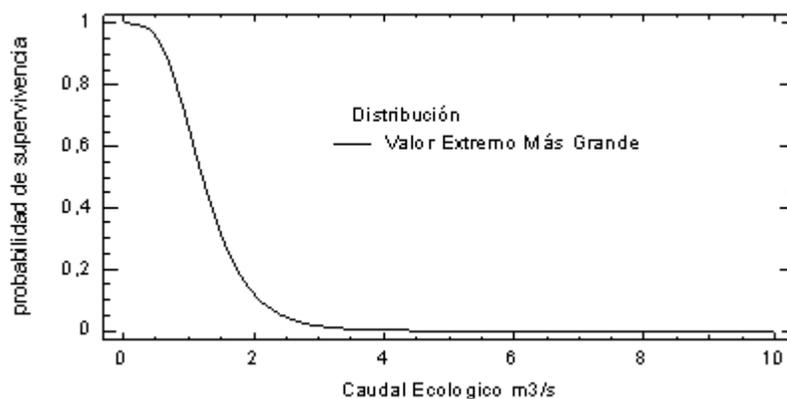
En este estudio se plantea una sola alternativa y se seleccionó el caudal ecológico como referencia para obtener el caudal de diseño.

Mediante un análisis estadístico y el uso del software STATGRAPHICS se obtuvo la mediana ( $1,25 \text{ m}^3/\text{s}$ ) para la variable caudal ecológico, en el siguiente cuadro se presenta un resumen estadístico para dicha variable.

**Tabla 29:** *Resumen Estadístico para Caudal Ecológico ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).*

Recuento	3888
Promedio	1,43735
Mediana	1,25
Desviación Estándar	1,64248
Coefficiente de Variación	114,271%
Mínimo	0,835
Máximo	9,1
Rango	8,265
Sesgo Estandarizado	95,3393
Curtosis Estandarizada	186,003

También se usó la gráfica que muestra la supervivencia de la variable caudal ecológico, mostrada a continuación solo para demostrar la alta tasa de probabilidad de supervivencia para el valor seleccionado.



**Figura 75:** Función de supervivencia para la variable caudal ecológico.

En cuanto a la elevación también se obtuvo su valor mediante el análisis estadístico realizado con el software STATGRAPHICS, dando como resultado un promedio de 353,369 m.s.n.m. Siendo este un valor muy cercano al nivel de aguas normales observada en el diseño original (353 m.s.n.m.).

**Figura 76:** Resumen de la variable elevación m.s.n.m.

Recuento	3888
Promedio	353,369
Desviación Estándar	0,447936
Coeficiente de Variación	0,126762%
Mínimo	351,28
Máximo	354,41
Rango	3,13
Sesgo Estandarizado	-62,3348
Curtosis Estandarizada	92,5782

Este valor posee un coeficiente de variación bastante bajo, razón por la cual fue escogido, tal como se puede apreciar en la siguiente imagen.

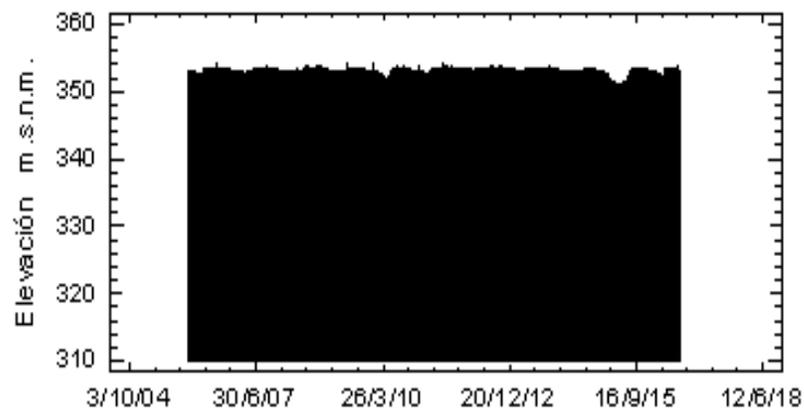


Figura 77: Serie de tiempo para la variable elevación

El pronóstico para la variable elevación es favorable, apoyándonos en un límite de confianza de 95% como se aprecia en la siguiente imagen.

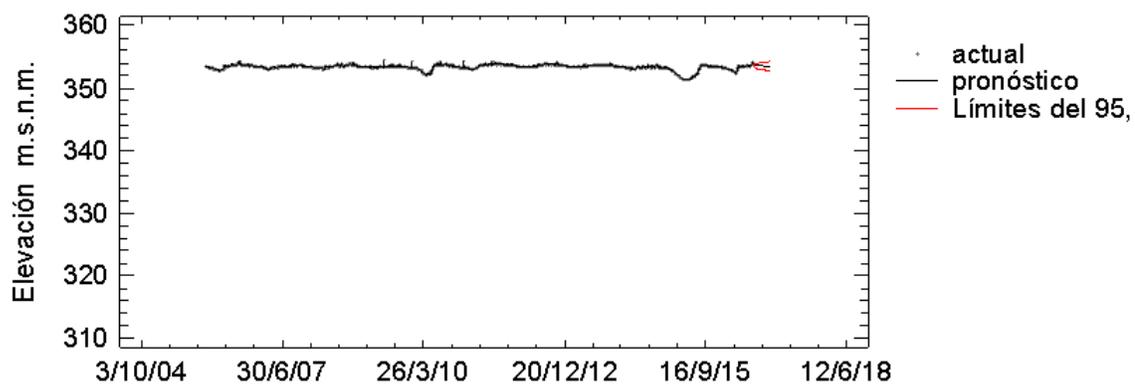


Figura 78: Pronósticos para la variable elevación

### *Carga hidráulica y salto neto*

Para la obtención de la carga hidráulica, se hizo la diferencia de la elevación del embalse y la cota de fondo de la torre toma, el resultado se observa en el siguiente cuadro.

**Tabla 30:** *Resumen para la carga hidráulica*

Elevación (m.s.n.m)	353,369
Cota de fondo en torre toma (m.s.n.m)	310
Carga hidráulica (m)	39,0321

En cuanto al análisis y cálculo de la altura útil se tomó en cuenta dos criterios, el primero consistió en calcular todas las pérdidas que se generan en el sistema, mientras que el segundo criterio consistió en asumir perdidas igual al 10% de la carga hidráulica, este segundo criterio es ampliamente usado por ingenieros proyectista y también es el criterio usado en esta investigación.

El salto neto es la diferencia entre el salto útil y las pérdidas de carga producidas a lo largo de todas las conducciones. Representa la máxima energía que se podrá transformar en trabajo en el eje de la turbina.

Según la publicación ***Minicentrales hidroeléctricas*** realizada por Adriana Castro y el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía con sede en España (2006), establecen que “*Para una primera aproximación, se puede estimar el salto bruto mediante un plano topográfico. No obstante, para una determinación más correcta y exacta es necesario realizar un levantamiento topográfico de la zona. Asimismo, también se puede suponer que las pérdidas de carga son del orden del 5% al 10% del salto bruto*”. Los planos y los datos necesarios para esta investigación fueron suministrados por HIDROCENTRO C.A y los resultados se muestran en el siguiente cuadro.

**Tabla 31 :** *Resultados de pérdidas y salto neto*

Carga hidráulica (m)	43,369
Perdidas, 10% (m)	4,3369
Salto neto (m)	39,0321

Un salto neto como el que se muestra en el cuadro no se encuentra disponible en muchos embalses, razón por la cual abogamos por la necesidad de aprovechar la capacidad hidroenergética del embalse Pao Cachinche para producir energía en beneficio de la población venezolana.

*Potencia producida*

Según el tipo de equipo y el fabricante, el rendimiento de la maquinaria varía, pero a efectos de una primera aproximación, tomamos como factor de eficiencia para una minicentral hidroeléctrica moderna el valor de 0,90. A continuación se muestran los resultados obtenidos.

**Tabla 32:** *resultados del cálculo de potencia. Embalse Pao Cachinche.*

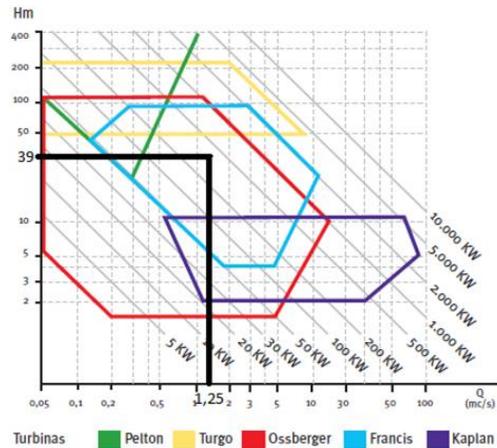
Factor de eficiencia	0,90
Caudal ecológico (m <sup>3</sup> /s)	1,25
Potencia (kW)	430,768
Potencia (C.V.)	585

El valor de la última fila corresponde a la unidad caballos de vapor (C.V.) la cual es una unidad del sistema internacional de unidades.

### Turbina seleccionada

La turbina obtenida en este análisis es una turbina Francis, la más adecuada para un salto de 39,03m y un caudal de 1,25m<sup>3</sup>/s, a continuación se muestra la figura usada para la obtención de la turbina.

*Campo de utilización de los diferentes tipos de turbinas*



**Figura 79:** Microcentrales hidroeléctricas. Adriana Castro (2006).

Esta turbina se adapta muy bien a todo tipo de saltos y caudales, y cuenta con un rango de utilización muy grande. Se caracteriza por recibir el fluido de agua en dirección radial, y a medida que ésta recorre la máquina hacia la salida se convierte en dirección axial. El rendimiento de las turbinas Francis es superior al 90% en condiciones óptimas de funcionamiento.

### Dimensiones de la turbina

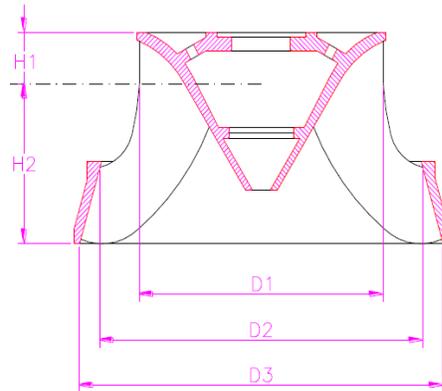
Para el dimensionamiento de la turbina primero fue necesario obtener la velocidad específica y el diámetro de salida del rodete. Las ecuaciones usadas se encuentran descritas en el marco metodológico.

**Tabla 33:** Parámetros para el dimensionamiento de turbinas

Revoluciones de la turbina, <b><i>n</i></b>	320,124
Velocidad específica, <b><i>ns</i></b>	297,496

Diámetro de salida del rodete, $D_3$ (m)	0,47
--	------

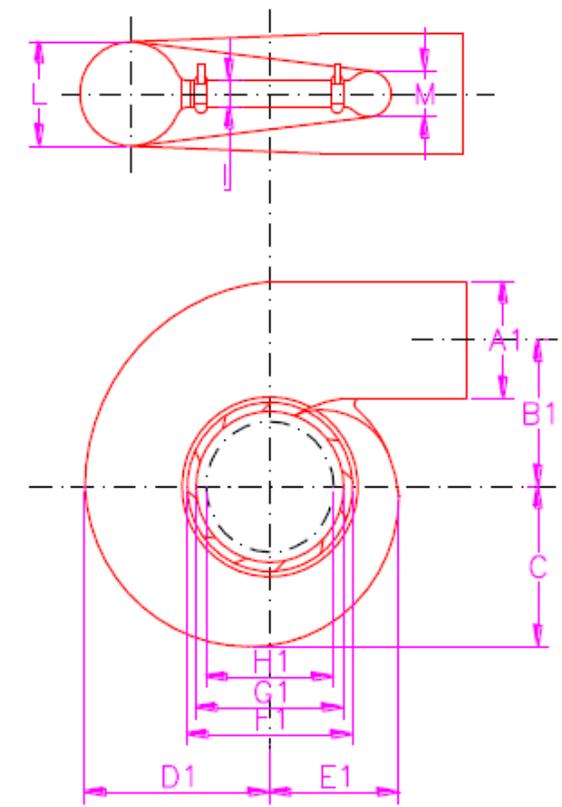
A continuación se muestra las dimensiones de cada uno de los componentes de la turbina, la unidad de estas dimensiones es el metro.



**Figura 80:** *Rodete*

**Tabla 34:** *Dimensiones del rodete*

H1 (m)	0,0781
H2 (m)	0,1672
D1 (m)	0,3328
D2 (m)	0,4322
D3 (m)	0,4638



**Figura 81:** Caracol o carcasa.

**Tabla 35:** Dimensiones de la carcasa

A1 (m)	0,5261
B1 (m)	0,5956
C (m)	0,6890
D1 (m)	0,7718
E1 (m)	0,5537
F1 (m)	0,6687
G1 (m)	0,5632
H1 (m)	0,1286
I (m)	0,1360

L (m)	0,4758
M (m)	0,2783

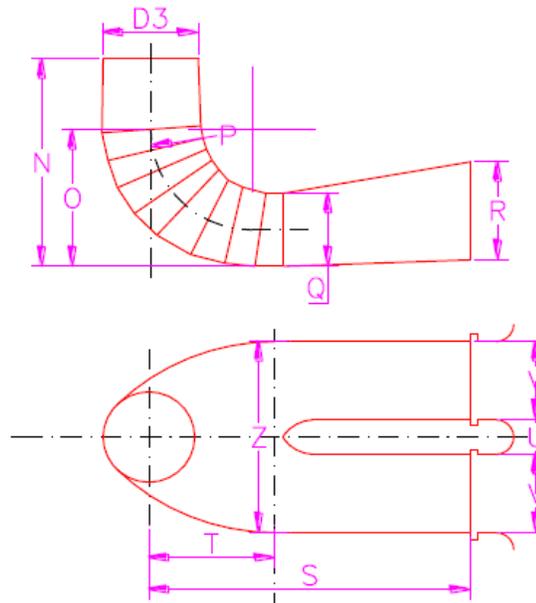


Figura 82: Cámara espiral.

Tabla 36: Dimensiones de la cámara espiral

D3 (m)	0,4638
N (m)	1,0316
O (m)	0,6043
P (m)	0,6354
Q (m)	0,3042
R (m)	0,7421
S (m)	2,1199
T (m)	0,7219
U (m)	0,3331
V (m)	0,5939
Z (m)	1,2726

### *Análisis de costos*

Para la conversión a bolívares nos basamos en la tasa de cambio que refleja la página web del banco central de Venezuela con fecha 26 de octubre de 2015, la tasa de cambio SIMADI es de 658,28 BsF/\$. Las ecuaciones usadas en la obtención de estos resultados se encuentran en el apéndice de la presente investigación.

**Tabla 37:** *Resultado del análisis de costo para una turbina Francis. Embalse Pao Cachinche*

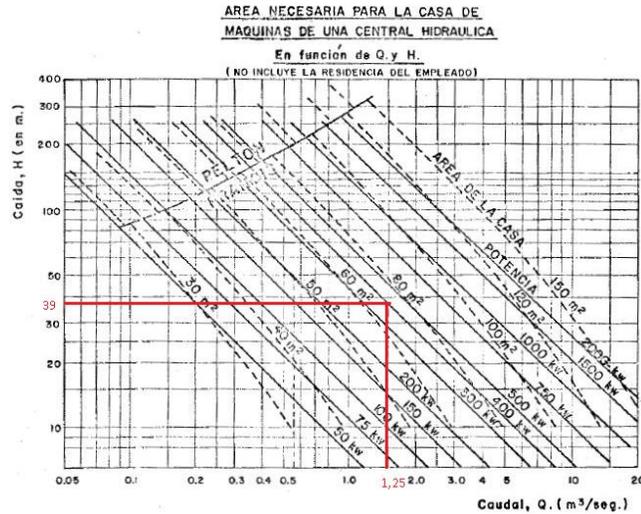
<i>costo equipo turbo generador</i>	163972,799 US\$	107940014,702 BsF
<i>costo de obras civiles</i>	94510,732 US\$	62214525,160 BsF
<i>costo de operación y mantenimiento</i>	7754,505 US\$	3238483,163 BsF
<i>total</i>	263403,146 US\$	173393023,025 BsF

Como se puede apreciar en la tabla anterior el costo total para poner en funcionamiento la turbina asciende a 263403,146 US\$, su equivalente en moneda venezolana son 173393023,025BsF.

Para la obtención de estos resultados fue necesario el uso de ecuaciones que dependen del salto neto, la potencia de la turbina y el caudal de diseño. Esta fórmula que propone “North West Hydro Resource Model, Lancaster University” se aplica solo para turbinas Francis y trabaja con caudales que oscilen entre 0,5 m<sup>3</sup>/s y 2,5 m<sup>3</sup>/s, el caudal de diseño de la presente investigación (1,25 m<sup>3</sup>/s) encuentra dentro de ese rango. Es necesario acotar que el costo de mantenimiento y operación se obtuvo como el 3% del costo de las obras iniciales. El caudal, la potencia de la turbina y el salto neto están presente en este cálculo pero de manera implícita.

### Casa de máquinas

En cuanto a la casa de máquinas primero fue necesario obtener el área en planta para posteriormente realizar una propuesta, el área aproximada en planta se obtuvo mediante la siguiente figura, arrojando un valor de  $69\text{m}^2$ .



**Figura 83:** Manual de diseño de pequeñas centrales hidroeléctricas. Galarza et all (1985)

Otros aspectos tomados en cuenta en el diseño de la casa de máquinas son:

- a) Materiales de construcción, preferiblemente acero.
- b) Dimensiones de los equipos electromecánicos.
- c) Facilidades de acceso a la zona donde estará la minihidraulica.
- d) Simplicidad de la construcción.
- e) El esfuerzo admisible del suelo donde se va a fundar la casa de máquinas, en nuestro caso estará ubicada muy cerca de la cerca del cauce del río Pao.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS** CAPITULO I

### REFERENCIA INCLUIDA

- Agencia Internacional de Energía. (AIE, 2015). [www.IEA.org](http://www.iea.org).

□ Banco Mundial. BM, (2015) [www.bancomundial.org](http://www.bancomundial.org).

□□□ CEPAL, (2013).

□ CIER, (2014).

□□ Comité de Afectados por los Apagones (2015).

□□ Comisión Eléctrica del Colegio de Ingenieros de Venezuela. (2015).

□□ COP21 (2015). [www.cop21paris.org/](http://www.cop21paris.org/).

□□ International Renewable Energy Agency. IRENA (2015). [www.irena.org/](http://www.irena.org/).

□□ Instituto Nacional de Estadísticas. INE, (2014) [www.ine.gov.ve/](http://www.ine.gov.ve/).

□□ Ministerio para la Energía Eléctrica (2015). [www.mppee.gob.ve/](http://www.mppee.gob.ve/).

□□ Luis Motta Domínguez, Ministro para la Energía Eléctrica (2016).

□□ UNESCO. (2015)

<http://unesdoc.unesco.org/images/0014/001432/143272s.pdf>

## **Bibliografía**

Agency, I. R. (2015). *IRENA*. Obtenido de [www.irena.org](http://www.irena.org)

AIE. (2015). *IEA*. Obtenido de [www.IEA.org](http://www.IEA.org)

Ambiente, M. d. (2016).

BM. (2015). *Banco Mundial*. Obtenido de [www.bancomundial.org](http://www.bancomundial.org)

Carrillo G, C. (2000). *Estudio de factibilidad de instalación de pequeñas centrales hidroeléctricas en el estado Amazonas*. Amazonas.

Castro, A. (2006). *Microcentrales hidroeléctricas*.

CEPAL. (2013).

CIER. (2014).

(2015). *Comité de afectados por los Apagones*.

COP21. (2015). Obtenido de [www.cop21paris.org](http://www.cop21paris.org)

Eléctrica, M. p. (2015). *mppee*. Obtenido de [www.mppee.gob.ve](http://www.mppee.gob.ve)

Estadísticas, I. N. (2014). *INE*. Obtenido de [www.ine.gov.ve](http://www.ine.gov.ve)

Forget, A. (2011). *Manual para ayudar a la comprensión del diseño de microcentrales hidroeléctricas aisladas*. Lima.

*Google Earth*. (2016).

HIDROCENTRO, C. (s.f.).

Motta, L. (2016). *Ministro para la Energía Eléctrica*.

Suarez, L. (1999). *Proyectos y Supervisión de Obras Hidráulicas*. Valencia.

UNESCO. (2015). *UNESCO*. Obtenido de <http://unesdoc.unesco.org/images/0014/001432/143272s.pdf>

Venezuela, C. d. (2015).

White, F. (2000). *Fluid Mechanics fourth edition*. University of Rhode Island.

Zapico, P. (2002). *Predimensionamiento de turbinas Francis, energética*21.