



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

**ANALISIS DE LA CAPACIDAD HIDROENERGETICA DEL EMBALSE PAO
LA Balsa, ESTADO COJEDES**

Tutor Académico

Msc. Márquez Adriana

Autores:

González Noriuska C.I: 19.920.733

Hoyle María C.I: 22.942.657

Bárbula, Mayo de 2016



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

**ANALISIS DE LA CAPACIDAD HIDROENERGETICA DEL EMBALSE PAO
LA Balsa, ESTADO COJEDES**

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

Tutor Académico

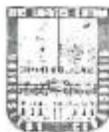
Msc. Márquez Adriana

Autores:

González Noriuska C.I: 19.920.733

Hoyle María C.I: 22.942.657

Bárbula, Mayo de 2016



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

CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Los abajo firmantes, Miembros del Jurado designado para estudiar el Trabajo Especial de Grado titulado: **"ANALISIS DE LA CAPACIDAD HIDROENERGETICA DEL EMBALSE PAO LA Balsa, ESTADO COJEDES"**; realizado por las bachilleres: **González Noriuska y Hoyle María**, hacemos constar que hemos revisado y aprobado dicho trabajo.

Prof. Adriana Márquez

Tutor

C.I: 12.604.007



Prof. Italo Salazar

Miembro del Jurado

C.I: 11354542

Prof. Gerardo Huguet

Miembro del Jurado

C.I: 4859589



DEDICATORIAS

Dedicado a mis padres, hermana y abuelos. Sin su apoyo esto no hubiese sido posible de lograr. Los amo

Noriuska González.

A mis familiares y amigos, que sin su apoyo y amor no hubiera podido sobrellevar los obstáculos presentes a lo largo de mi carrera.

María. E Hoyle.



AGRADECIMIENTOS

A Dios, porque sin él nada de esto hubiese sido posible.

A la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad De Carabobo por brindarme la oportunidad de formarme como profesional.

A mis padres Norys Ramos y Wilde González quienes siempre estuvieron siempre a mi lado tanto en las buenas y en las no tan buenas. Los amo infinito.

A mi hermana bella Wilnokarys por confiar en mí, por darme ánimo y apoyo en todo momento y por soportar mi carácter cuando estaba de malas. Te amo infinito manita.

A mis familiares que en todo momento me brindaron su apoyo.

A Gerardo D'Angelo y a María Verónica Guevara, quienes confiaron en mí siempre, con quienes pasé divertidos e inolvidables momentos. Están en mi corazón y espero que nuestra amistad perdure en el tiempo. Los adoro pequeños.

A Francis Bernardo y Francia Rangel, con quienes compartí un sinfín de experiencias, con quienes pasé momentos felices y no tan felices. Ya son muchos años de amistad, y a pesar de que las veo poco, las llevo en mi corazón. Las adoro un mundo pequeñas.

A mi compañera María Hoyle por los momentos compartidos durante el proceso de culminación de nuestro trabajo de grado.

A la profesora Adriana por brindarnos la oportunidad. Muchas gracias.

A HIDROCENTRO por su ayuda. Gracias

Noriuska González.



Agradezco principalmente a Dios, por ser mi guía en todo momento y darme la fortaleza necesaria para seguir adelante y no decaer en los momentos difíciles.

A mi madre Desireé Petit, por brindarme su apoyo incondicional, que con sus bellas palabras siempre me libraron de la negatividad y el desánimo que se me presentó en todo el transcurso de mi carrera. Por ser un excelente ejemplo a seguir, e impartirme una buena educación y valores que me hacen ser una mejor persona cada día. Gracias por confiar en mí en esos momentos que creía no poder alcanzar mis metas.

A mi padre Sergio Hoyle, por ser apoyo y guía en mi vida, dándome fuerzas para seguir adelante, demostrándome que la educación es lo más importante.

Gracias a mis hermanos María Hoyle y Sergio Hoyle por el amor, cariño y el cuidado que siempre me han dado. Por ser las personas que más admiro, reflejando en mí que con la constancia y el duro trabajo se pueden lograr muchas cosas.

Mi cuñado Neomar Leal, por ser como un hermano para mí, cuidándome y consintiéndome siempre.

A mis abuelos Carmen Suarez y Rafael Petit, por siempre encomendarme a Dios y estar pendientes de mí en todo momento.

Mis amigas Gledis Ledezma y Diana Peralta, por ser como mis hermanas, dándome apoyo y animo cuando más lo necesitaba, al igual que momentos felices que más de una vez me liberaron de tanto estrés.



A mis amigas de muchos años Roxana Rodríguez, María Almeida y Bianny Dimuccio, por tenerme presentes en sus vidas, logrando que esta amistad dure más tiempo.

A mi madrina Mariegly González, por darme esa atención y cariño especial que desde muy pequeña me ha regalado.

A Mildred Parra, por brindarme su apoyo, su cariño, su amistad y alegría en mi último año de carrera, haciendo más llevadero el proceso de culminación.

A mi novio Jorge Rodríguez, por ser una persona muy especial para mí. Brindándome fortalezas, estando allí cuando más lo necesitaba en la culminación de mi carrera y esforzándose por brindarme soluciones a las trabas que se presentaron en el Trabajo de grado.

Gracias a Noriuska González mi compañera de tesis, por el arduo trabajo que realizó y por la fuerte persona que demostró ser, gracias por la compañía ofrecida.

María E. Hoyle.

INDICE

INDICE DE FIGURAS	xi
INDICE DE TABLAS	xvii
INTRODUCCION	1
CAPÍTULO I	3
EL PROBLEMA	3
Planteamiento del problema	3
Formulación del problema	7
Objetivos de la investigación	7
Objetivo general	7
Objetivos específicos	7
Justificación	8
Delimitaciones	9
CAPÍTULO II	11
MARCO TEORICO	11
Antecedentes de la investigación	11
Bases Teóricas.....	15
Embalses	15
Descripción del Embalse Pao La Balsa	23
Centrales Hidroeléctricas	26

Pequeñas Centrales Hidroeléctricas	26
Tipo de Turbina.....	61
MARCO LEGAL.....	73
CAPITULO III	78
MARCO METODOLÓGICO	78
Tipo de investigación	79
Diseño de la Investigación	79
Población y Muestra	81
Técnicas e instrumentos de recolección de datos	81
Técnicas de procesamiento y análisis de datos.....	82
Fases metodológicas	82
Descripción de la metodología.....	84
CAPITULO IV	107
ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS	107
Descripción de las variables hidroenergéticas del embalse Pao La Balsa	107
Descripción estadística para la variable elevación de agua en el embalse Pao La Balsa, Estado Cojedes.....	108
Descripción estadística para la variable volumen de agua del embalse Pao La Balsa, Estado Cojedes	115
Descripción estadística para la variable área del embalse Pao La Balsa, Estado Cojedes.....	120
Análisis comparativo	124

Descripción estadística resumida para la variable caudal de entrada del embalse Pao La Balsa, Estado Cojedes	126
Descripción estadística resumida para la variable caudal de salida del embalse Pao La Balsa, Estado Cojedes.....	132
Descripción estadística resumida para la variable caudal de alivio del embalse Pao La Balsa, Estado Cojedes.....	138
Descripción estadística resumida para la variable caudal ecológico del embalse Pao La Balsa, Estado Cojedes	144
Descripción estadística resumida para la variable caudal de extracción del embalse Pao La Balsa, Estado Cojedes.....	150
Series de tiempo para las variables hidroenergéticas.....	155
Resumen estadístico para las variables hidroenergéticas del embalse Pao La Balsa, Estado Cojedes	158
Potencial Hidroeléctrico	159
Diseño de las obras civiles del sistema de generación hidroeléctrica en el Embalse Pao la Balsa, Estado Cojedes	162
ALTERNATIVA I.....	162
Diseño del Túnel de Conducción	163
Diseño de la cámara de carga	167
Diseño de la Tubería Forzada.....	170
Diseño del túnel de desagüe.....	174
Diseño de la Turbina.....	176
Dimensionamiento de la Casa de Maquinas.....	185

ALTERNATIVA II	186
Diseño de la Tubería de empalme	188
Diseño del túnel de desagüe.....	189
Diseño de la Turbina.....	192
Diseño de la Casa de Maquinas	197
Análisis de factibilidad del Sistema de generación Hidroeléctrica propuesto para el Embalse Pao la Balsa, Estado Cojedes	198
ALTERNATIVA I	198
Análisis de costos	199
Rentabilidad.....	202
ALTERNATIVA II	204
Análisis de costos	204
Rentabilidad.....	207
CAPITULO V	208
CONCLUSIONES.....	208
RECOMENDACIONES	211
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	213
APÉNDICE	216
(CALCULOS)	216
PLANOS	237

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Embalses. Diferentes usos.....	16
Figura 2. Tipos de presas.....	17
Figura 3. Torre toma embalse Canoabo, Edo. Carabobo.....	17
Figura 4. Obra de toma embalse La Honda, Edo. Táchira	18
Figura 5. Aliviadero del embalse Pao La Balsa, Edo. Cojedes	19
Figura 6. Niveles de un embalse. Vista de planta.	22
Figura 7. Niveles de un embalse. Perfil longitudinal.....	23
Figura 8. Embalse Pao La Balsa, Estado. Cojedes.....	24
Figura 9. Presa Ing. Carpóforo Olivares, Estado Cojedes.....	24
Figura 10. Embalse Pao La Balsa, Edo. Cojedes. Vista de planta.	25
Figura 11. Embalse Pao La Balsa, Edo. Cojedes. Vista transversal	25
Figura 12. Central de agua fluyente y componentes.	29
Figura 13. Central a pie de presa.....	31
Figura 14. Central por derivación de las aguas	32
Figura 15. Central hidroeléctrica de bombeo.....	33
Figura 16. Tipos de azudes	34
Figura 17. Características geométricas de secciones usuales. Canales	36
Figura 18. Conversión de la energía hidráulica en eléctrica.....	54
Figura 19. Turbina Pelton	56
Figura 20. Turbina Francis	57
Figura 21. Esquema general del montaje de una turbina Francis	58
Figura 22. Turbina Kaplan	59
Figura 23. Campo de utilización de los diferentes tipos de turbinas.....	59
Figura 24. Altura neta vs velocidad específica.	60

Figura 25. Rendimiento de cada tipo de turbina frente al caudal	65
Figura 26. Esquema de un salto de agua.....	67
Figura 27. Tabla valores rugosidad absoluta	69
Figura 28. StatWizard.....	85
Figura 29. Localización de datos.....	85
Figura 30. Libro de datos	86
Figura 31. Análisis de una variable	87
Figura 32. Resumen estadístico.....	87
Figura 33. Ventana de gráficas	88
Figura 34. Series de tiempo. Método descriptivo	89
Figura 35. Series de tiempo. Método descriptivo	89
Figura 36. Métodos descriptivos. Series de tiempo.....	90
Figura 37. Pronósticos automáticos I	91
Figura 38. Pronósticos automáticos II	91
Figura 39. Pronósticos y autocorrelaciones	92
Figura 40. Ajuste de distribuciones	93
Figura 41. Opciones de ajuste de distribución.....	94
Figura 42. Opciones de ajuste de distribución.....	95
Figura 43. Elevación del agua en un embalse.....	108
Figura 44. Ajuste de distribuciones para la variable elevación de agua.	110
Figura 45. Dispersión para la variable elevación.....	111
Figura 46. Histograma de frecuencia relativa para variable elevación.	112
Figura 47. Elevaciones diarias. Embalse Pao La Balsa (Ene 2005 - Abr 2015).....	113
Figura 48. Resumen estadístico de elevaciones promedios mensuales.	114

Figura 49. Ajuste de distribuciones para la variable volumen	116
Figura 50. Distribución normal y distribución weibull para la variable volumen	117
Figura 51. Gráfico de dispersión para la variable volumen.	118
Figura 52. Histograma de frecuencia relativa para la variable volumen	118
Figura 53. Ajuste de distribuciones para la variable área.....	121
Figura 54. Dispersión para la variable área.....	122
Figura 55. Histograma de frecuencia relativa para la variable área. ...	122
Figura 56. Diagrama de caja y bigotes para las variables elevación, volumen y área.	125
Figura 57. Ajuste de distribuciones para la variable caudal de entrada.	127
Figura 58. Densidad para la variable caudal de entrada.	128
Figura 59. Dispersión para la variable caudal de entrada.	129
Figura 60. Gráfico de caja y bigotes para la variable caudal de entrada	130
Figura 61. Histograma de frecuencia para la variable caudal de entrada.	130
Figura 62. Ajuste de distribuciones para la variable caudal de salida.	133
Figura 63. Densidad para la variable caudal de entrada.	134
Figura 64. Dispersión para la variable caudal de salida.	135
Figura 65. Gráfico de caja y bigotes para la variable caudal de salida	135
Figura 66. Histograma de frecuencia para la variable caudal de salida.	136
Figura 67. Ajuste de distribuciones para la variable caudal de alivio. .	139
Figura 68. Gráfico de densidad para la variable caudal de alivio.	140

Figura 69. Gráfico de dispersión para la variable caudal de alivio	141
Figura 70. Gráfico de caja y bigotes para la variable caudal de alivio.	141
Figura 71. Histograma de frecuencia relativa para la variable caudal de alivio.....	142
Figura 72. Ajuste de distribuciones para la variable caudal ecológico	145
Figura 73. Gráfico de densidad para la variable caudal ecológico	146
Figura 74. Gráfico de dispersión para la variable caudal ecológico	147
Figura 75. Diagrama de caja y bigotes para la variable caudal ecológico	148
Figura 76. Histograma de frecuencia relativa para la variable caudal ecológico.....	148
Figura 77. Ajuste de distribuciones para la variable caudal de extracción.	151
Figura 78. Gráfico de densidad para la variable caudal de extracción	152
Figura 79. Gráfico de dispersión para la variable caudal de extracción	153
Figura 80. Histograma de frecuencia relativa para la variable caudal de extracción.....	153
Figura 81. Serie de tiempo para las variables elevación, volumen y área.	155
Figura 82. Serie de tiempo para los caudales característicos del embalse.	157
Figura 83. Función supervivencia para la variable caudal ecológico...	160
Figura 84. Pronósticos para la variable elevación	161
Figura 85. Pronósticos para la variable elevación	161
Figura 86. Ubicación de las obras civiles en el Embalse Pao la Balsa. Alternativa I	162

Figura 87. Elevación de diseño del túnel de conducción.....	163
Figura 88. Diámetro, profundidad del agua y borde libre del túnel de conducción.....	165
Figura 89. Sección en planta de la cámara de carga	169
Figura 90. Sección en elevación de la cámara de carga.....	170
Figura 91. Sección transversal de la tubería forzada. Diámetro y espesor comercial.....	173
Figura 92. Diámetro, profundidad del agua y borde libre del túnel de desagüe	175
Figura 93. Campo de utilización de los diferentes tipos de turbinas....	177
Figura 94. Montaje de los elementos a diseñar para la turbina Francis	179
Figura 95. Dimensiones del Rodete	180
Figura 96. Dimensiones de la carcasa	182
Figura 97. Dimensiones del tubo de aspiración.....	184
Figura 98. Posición del sistema electromecánico en eje vertical.....	185
Figura 99. Representación de la bifurcación de la tubería de abastecimiento.....	186
Figura 100. Ubicación de las obras civiles en el Embalse Pao la Balsa. Alternativa II.....	187
Figura 101. Diámetro, profundidad del agua y borde libre del túnel de desagüe	190
Figura 102. Dimensiones del Rodete de la Turbina	194
Figura 103. Dimensiones de la Carcasa	195
Figura 104. Dimensiones del tubo de aspiración.....	196
Figura 105. Posición del sistema electromecánico en eje horizontal. .	197

Figura 106. Valor actual vs tasa mínima de rendimiento para la alternativa I.....	203
Figura 107. Valor actual vs tasa mínima de rendimiento para la alternativa	207

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Clasificación de los embalses según su tamaño.	20
Tabla 2: Clasificación de las pequeñas centrales hidroeléctricas según la potencia	27
Tabla 3: Clasificación de las pequeñas centrales hidroeléctricas según el salto	27
Tabla 4: Clasificación de las pequeñas centrales hidroeléctricas según la OLADE.....	28
Tabla 5: Clasificación de la turbina según su velocidad específica	61
Tabla 6: Coeficientes K para los distintos tipos de turbina	67
Tabla 7: Coeficientes de pérdida dependiendo de relación caudales y relación diámetro	71
Tabla 8: Resumen estadístico para la variable elevación de agua. Embalse Pao La Balsa (2005-2015). Coordenadas: N 9°35'39.3" 68°09'27.1" W. Elevación de fondo: 112 m.s.n.m	108
Tabla 9: Comparación de distribuciones alternas para la variable elevación de agua. Embalse Pao La Balsa.....	110
Tabla 10: Frecuencia relativa de la variable elevación. Embalse Pao La Balsa.....	112
Tabla 11: Resumen estadístico de elevaciones mínimas, medias y máximas mensuales del embalse Pao La Balsa.....	114
Tabla 12: Resumen estadístico para la variable volumen. Embalse Pao La Balsa (2005-2015). Coordenadas: N 9°35'39.3" 68°09'27.1" W.....	115
Tabla 13: Comparación de distribuciones alternas para la variable volumen. Embalse Pao La Balsa	116

Tabla 14: Histograma de frecuencia relativa para la variable volumen. Embalse Pao La Balsa.....	119
Tabla 15: Resumen estadístico para la variable área. Embalse Pao La Balsa (2005 - 2015). Coordenadas: N 9°35'39.3" 68°09'27.1" W.....	120
Tabla 16: Comparación de distribuciones alternas para la variable volumen. Embalse Pao La Balsa	121
Tabla 17: Histograma de frecuencia relativa para la variable área. Embalse Pao La Balsa.....	123
Tabla 18: Comparación de coeficientes de variación de las variables nivel, volumen y área.	124
Tabla 19: Resumen estadístico para la variable caudal de entrada. Embalse Pao La Balsa.....	126
Tabla 20: Comparación de distribuciones alternas para la variable caudal de entrada. Embalse Pao La Balsa.....	127
Tabla 21: Histograma de frecuencia relativa para la variable caudal de entrada. Embalse Pao La Balsa.....	131
Tabla 22: Resumen estadístico de la variable caudal de salida. Embalse Pao La Balsa (2005-2015). Coordenadas: N 9°35'39.3" 68°09'27.1" W	132
Tabla 23: Comparación de distribuciones alternas para la variable caudal de salida. Embalse Pao La Balsa	133
Tabla 24: Histograma de frecuencia relativa para la variable caudal de salida. Embalse Pao La Balsa	136
Tabla 25. Resumen estadístico de la variable caudal alivio. Embalse Pao La Balsa (2005-2015). Coordenadas: N 9°35'39.3" 68°09'27.1" W.....	138
Tabla 26. Histograma de frecuencia relativa para la variable caudal de alivio.....	143

Tabla 27. Resumen estadístico de la variable caudal ecológico. Embalse Pao La Balsa (2005-2015). Coordenadas: N 9°35'39.3" 68°09'27.1" W	144
Tabla 28. Comparación de distribuciones alternas para la variable caudal ecológico. Embalse Pao La Balsa.....	145
Tabla 29. Histograma de frecuencia relativa para la variable caudal ecológico Embalse Pao La Balsa.....	149
Tabla 30. Resumen estadístico de la variable caudal de extracción. Embalse Pao La Balsa (2005-2015). Coordenadas: N 9°35'39.3" 68°09'27.1" W	150
Tabla 31. Comparación de distribuciones alternas para la variable caudal de extracción. Embalse Pao La Balsa	151
Tabla 32. Histograma de frecuencia relativa para la variable caudal de extracción. Embalse Pao La Balsa	154
Tabla 33. Resumen estadístico para las variables hidroenergéticas. Embalse Pao La Balsa.....	158
Tabla 34. Dimensiones del túnel de conducción.....	164
Tabla 35. Elementos geométricos del túnel de conducción	164
Tabla 36. Características del flujo en el túnel de conducción	166
Tabla 37. Dimensiones de la cámara de carga.....	167
Tabla 38. Variables para determinar el volumen de la cámara de carga	167
Tabla 39. Variables para la determinación de la longitud total de la cámara de carga	168
Tabla 40. Variables para la obtención del ancho de la cámara de carga	168
Tabla 41. Variables para la obtención de la altura total de la cámara de carga.....	169

Tabla 42. Dimensiones de la tubería forzada	171
Tabla 43. Variables para la obtención del diámetro interno de la tubería forzada	171
Tabla 44. Variables para la obtención del espesor de la tubería forzada por golpe de ariete	172
Tabla 45. Pérdidas de carga en la tubería forzada	173
Tabla 46: Dimensiones del túnel de desagüe	174
Tabla 47. Elementos geométricos del túnel de desagüe	175
Tabla 48. Características del flujo en el túnel de desagüe	176
Tabla 49. Parámetros para la selección de la Turbina.....	176
Tabla 50. Parámetros para el diseño de los elementos de la turbina ..	178
Tabla 51. Dimensiones del rodete	180
Tabla 52. Resumen de las dimensiones de la carcasa.....	181
Tabla 53. Dimensiones del tubo de aspiración	183
Tabla 54. Dimensiones de la casa de máquinas	185
Tabla 55. Parámetros de dimensionamiento de la tubería de empalme	188
Tabla 56. Perdidas de carga en la tubería forzada	189
Tabla 57. Dimensiones del túnel de desagüe	189
Tabla 58. Elementos geométricos del túnel de desagüe	190
Tabla 59. Características del flujo en el túnel de desagüe	191
Tabla 60. Parámetros para la selección de la turbina.....	192
Tabla 61. Parámetros para el diseño de los elementos de la turbina ..	192
Tabla 62. Dimensiones de rodete	193
Tabla 63. Dimensiones de la carcasa.....	194
Tabla 64. Dimensiones del tubo de aspiración	196
Tabla 65. Dimensiones de la casa de máquinas	197

Tabla 66. Costos de equipos y obras civiles que componen el sistema de generación hidroeléctrica. Alternativa I. Embalse Pao La Balsa	199
Tabla 67. Costos de transporte e instalación turbina Francis. Alternativa I. Embalse Pao La Balsa.....	200
Tabla 68. Costos de operación y mantenimiento Alternativa I. Embalse Pao La Balsa.....	200
Tabla 69. Total de inversión. Alternativa I. Embalse Pao La Balsa.....	201
Tabla 70. Ingresos anuales estimados. Alternativa I. Embalse Pao La Balsa.....	202
Tabla 71. Rentabilidad con n= 25 años. Alternativa I. Embalse Pao La Balsa.....	202
Tabla 72. Costos de equipos y obras civiles que componen el sistema de generación hidroeléctrica. Alternativa II. Embalse Pao La Balsa	204
Tabla 73. Costos de transporte e instalación turbina Francis. Alternativa II. Embalse Pao La Balsa.....	205
Tabla 74. Costos de operación y mantenimiento. Alternativa II. Embalse Pao La Balsa.....	205
Tabla 75. Total de inversión. Alternativa II. Embalse Pao La Balsa.....	206
Tabla 76. Ingresos anuales estimados. Alternativa II. Embalse Pao La Balsa.....	206
Tabla 77. Rentabilidad n= 25 años. Alternativa II. Embalse Pao La Balsa	207



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
DEPARTAMENTO: INGENIERIA AMBIENTAL
**ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD HIDROENERGÉTICA DEL EMBALSE PAO
LA BALSA, ESTADO COJEDES**

Autores: González Noriuska
Hoyle, María

Tutor: Msc. Adriana Márquez

Fecha: Mayo 2016

RESUMEN

La presente investigación tuvo por objetivo analizar el potencial hidroeléctrico del embalse Pao La Balsa, Estado Cojedes, 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

INTRODUCCION

Venezuela, a pesar de ser uno de los países pioneros en el desarrollo de la industria eléctrica mundial, con la creación de la primera empresa eléctrica en 1893 (C.A Alumbrado Eléctrico de Puerto Cabello) y al instalar en 1897 “La Planta El Encantado” en Caracas, segunda central hidroeléctrica de corriente alterna en todo el continente americano, en los últimos años ha venido experimentado problemas en el sistema eléctrico debido a la falta de inversión en el sector, el crecimiento demográfico, el bajo costo del servicio y a fenómenos climáticos.

El crecimiento demográfico venezolano, con expectativa de alcanzar más de cuarenta millones de habitantes para el año 2040, hace más imperativo el tratar de avistar el futuro e invertir en el sector eléctrico mediante la introducción de sistemas que permitan incrementar la capacidad de generación de energía en el país y servir de respaldo a las grandes centrales, en el momento en que éstas fallen.

En la actualidad, Venezuela cuenta con una gran cantidad de embalses de usos múltiples donde no existe alimentación eléctrica alguna interconectada bien sea al sistema nacional o a sistemas regionales, y por ende, el uso combinado para gasto ecológico, abastecimiento y generación de energía eléctrica es perfectamente posible de lograr.

Motivado a esto, con este trabajo de investigación se pretende aprovechar el recurso hídrico disponible en el embalse Pao La Balsa, Estado Cojedes, para desarrollar un sistema hidroeléctrico o bien llamada, central hidroeléctrica a pequeña escala para dos alternativas planteadas, mediante el diseño de todos sus elementos, evaluando posteriormente la factibilidad técnico – económica de la misma.

Para cumplir con los objetivos planteados en el presente trabajo de investigación, se desarrollan cinco capítulos descritos a continuación:

Capítulo I, conformado por el planteamiento del problema, justificación, delimitaciones de la investigación, asimismo se plantean los objetivos a desarrollar.

Capítulo II, se presentan las bases teóricas y los antecedentes que sustentan dicha investigación.

Capítulo III, establece el marco metodológico y se define el tipo de investigación, desde la descripción de las fases hasta las técnicas de análisis.

Capítulo IV, se presentan, analizan y discuten los resultados obtenidos para cada uno de los objetivos planteados en la investigación.

Capítulo V, se muestran las conclusiones y recomendaciones de este trabajo de investigación. Por último, se anexan ejemplos de cálculo correspondiente al procedimiento desarrollado para diseñar la pequeña central hidroeléctrica.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

Planteamiento del problema

En la actualidad, el consumo de energía eléctrica mundial aumenta sin cesar, impulsado por el crecimiento socioeconómico de las naciones y el crecimiento demográfico global. Koncagül, Connor y Tran (2014), señalan que el 80% de esta energía es generada en las centrales termoeléctricas (de carbón, gas natural, petróleo y nucleares), mientras que las fuentes renovables (incluida la energía hidroeléctrica) representan el 13% de las fuentes de energía primaria.

Según la Agencia Internacional de la Energía por sus siglas en inglés “IEA” (2007), el consumo eléctrico mundial se ha duplicado en los últimos 25 años, además los incrementos mayores en la demanda de energía según proyecciones realizadas, se registrarán en los países en desarrollo, donde se pronostica que la proporción mundial del consumo de energía habrá de aumentar del 46 al 58% entre 2004-2030 a un ritmo de 3% anual. América Latina no escapa de esta situación, pues durante los últimos 13 años el consumo de electricidad ha subido un 53,7% hasta alcanzar los 1.234 Teravatios - hora (TWh), más de cinco veces lo que se consume en España, según datos de la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE).

De acuerdo a estadísticas del Banco Mundial (2014), de un consumo, que para el año 2000 en Venezuela era de 2.644 kWh per cápita hubo un incremento en el año 2013 de hasta 3.401 kWh, lo que se traduce en un aumento de casi el 29%, a un ritmo de 2,42% anual. Aunado a esto “La población de Venezuela ha aumentado en 620 mil personas anuales durante los últimos 10 años (INE)” (Hernández, 2009, p.3).

Dentro de este marco, las autoridades nacionales han confirmado el alto consumo de electricidad y lo han atribuido a la amplia oferta, a la capacidad instalada de generación que supera los 25.000 MW actualmente, según el Ministerio para la Energía Eléctrica, y a las bajas tarifas del servicio. Este hecho ubica a nuestro país como el más alto consumidor de energía eléctrica por habitante en toda Latinoamérica.

Además del alto consumo de electricidad en el país, en los últimos años se han generado una serie de eventos que han afectado el sistema eléctrico nacional. Entre los años 2009-2013 Venezuela sufrió una crisis energética, período durante el cual el país experimentó un marcado déficit de generación de energía eléctrica. Debido a la ocurrencia del fenómeno el Niño, el embalse de la Central Hidroeléctrica Simón Bolívar alcanzó niveles muy bajos, por lo que el gobierno implementó un plan de racionamiento nacional y ahorro, disminuyendo el consumo en un 3,4% a nivel nacional. Esta situación se ha repetido este año 2016, llevando al gobierno a tomar medidas extremas respecto a los cortes de electricidad, los cuales se elevan hasta 4 horas por día durante 40 días.

Adicional al fenómeno el Niño, se conoce que en los últimos 10 años no fueron ejecutados los proyectos programados y necesarios para satisfacer la demanda de energía eléctrica nacional, la cual creció en dicho período en un 3,3% interanual, lo que quiere decir que el sistema eléctrico nacional no cuenta

hoy en día con la capacidad para satisfacer la demanda, es decir, el sistema colapsó, existe deficiencia en la generación, transmisión y en la distribución.

Entre las regiones que presentan mayor demanda de energía eléctrica se encuentra la región central, constituida por los estados Aragua, Carabobo y Cojedes. El estado Aragua por ejemplo, pasó de consumir unos 1.000 MW a un total de 1.300 MW sólo durante el primer trimestre del año 2015, lo cual sitúa a la entidad en una de las regiones que ostenta más consumo eléctrico en la nación y que se ha visto más afectada debido a la interrupción del servicio eléctrico; en otras palabras, el estado Aragua está 300 MW por encima del consumo promedio de energía.

Por otro lado, en localidades del estado Cojedes, se han venido presentado constantes apagones que han generado malestar en la población. Bravo (2015) comenta que la capacidad de distribución de la subestación San Carlos ya es insuficiente para la alta demanda de energía eléctrica de la capital cojedeña, por lo que si no se toman medidas, este servicio estaría condenado a colapsar a corto plazo en dicha entidad.

Adicionalmente, para finales del año 2015, Planta Centro (Planta Termoeléctrica del Centro) la cual constituye el mayor complejo de generación de energía eléctrica de la Región Centro-Norte-Costera, activó la unidad 5 que conjuntamente con la unidad 6, estarían en capacidad de aportar 1.000 MW al Sistema Eléctrico Nacional, según la Corporación Eléctrica Nacional (CORPOELEC). Pues, a inicios del año 2016 empleados denunciaron que la termoeléctrica Planta Centro no produce energía eléctrica desde Diciembre de 2015.

En una entrevista realizada por Tibisay Romero (2016), González, secretario del sindicato de CORPOELEC en Aragua expresó “Desde diciembre de 2015 Planta Centro no está produciendo ni siquiera un kilovatio. Si tuviéramos las plantas termoeléctricas en funcionamiento, tengan la plena

seguridad de que el pueblo venezolano no estaría sufriendo los racionamientos que padece”. Mientras, en el estado Carabobo, En una entrevista realizada por el diario El Carabobeño (2016), Abel Guzmán, secretario general del sindicato de CORPOELEC en Carabobo detalló que: “La tendencia ha sido negativa. La crisis eléctrica está lejos de resolverse. En el escenario más optimista la compañía produce 25% de su capacidad con 500 megavatios/hora de los dos mil bajo la cual fue concebida e instalada en la década de los 70”.

De acuerdo a Pérez J. (1999), durante los años setenta, en Venezuela se construyeron una serie de embalses multipropósitos. Muchos de estos embalses se encuentran hoy día en pleno funcionamiento, especialmente aquellos que fueron construidos con fines de abastecimiento urbano. Estos embalses actualmente presentan una disponibilidad hidroenergética que no ha sido aprovechada desde su puesta en funcionamiento.

En vista de que investigaciones previas no profundizan lo suficiente en este tipo de aprovechamiento y ante el progresivo crecimiento de la demanda de energía en la región central, así como el constante aumento en los costos asociados con la generación termoeléctrica en el país, se decidió realizar este trabajo, el cual pretende, evaluar y analizar la capacidad hidroenergética que puede brindar el embalse Pao La Balsa para beneficiar a las poblaciones más cercanas, mediante la introducción de nuevos elementos, como el de una central hidroeléctrica a pequeña escala, que permita contribuir considerablemente con la mejora del servicio eléctrico.

Aunque el desarrollo de una central hidroeléctrica requiere gastos de inversión inicial relativamente elevados, comparados con plantas térmicas de igual capacidad, se ha demostrado que a largo plazo, las plantas hidroeléctricas son económicamente rentables, con mayor vida útil, sin estar sujetas a los incrementos en los precios del combustible durante su operación.

Formulación del problema

¿Cómo aprovechar la disponibilidad hidroenergética del embalse Pao la Balsa en beneficio de las poblaciones a las cuales abastece?

Objetivos de la investigación

Objetivo general

Analizar la capacidad hidroenergética del embalse Pao La Balsa, Estado Cojedes

Objetivos específicos

- Describir las variables hidroenergéticas del embalse.
- Diseñar el sistema de generación hidroeléctrica del embalse.
- Analizar la factibilidad técnico-económica del sistema de generación hidroeléctrica.

Justificación

Indudablemente, Venezuela atraviesa una difícil situación de índole energética; los bajos costos de la energía en el mercado interno, el crecimiento de la población, el incremento del consumo, la falta de inversión y mantenimiento de las plantas termoeléctricas e hidroeléctricas, de último pero no menos importante, la influencia de factores climáticos, han llevado en picada al sector energético nacional. Si bien es cierto que la energía es un factor importante que interviene en el desarrollo económico, industrial, social y político del Estado, si no se toman medidas a corto plazo que den solución a la problemática existente, la situación puede agravarse y conducir al país al borde del colapso energético.

Cabe destacar que hace algunos años se llevó a cabo una investigación por CADAFE (actualmente CORPOELEC), donde fue estudiada la factibilidad de aprovechamiento hidroeléctrico de ocho embalses de Venezuela. El estudio fue realizado en aquellas zonas del país donde los déficits de energía eran marcados y donde ocurrían frecuentes fallas en el servicio eléctrico.

Actualmente, no hay registro de una investigación realizada por CORPOELEC, donde se haga el estudio y la evaluación de la capacidad hidroenergética del embalse Pao La Balsa, es por ello, que este trabajo busca solventar la necesidad que presentan los ciudadanos que residen en la Región Central del País, quienes son beneficiados por el embalse Pao La Balsa. Esta necesidad proviene del déficit de energía eléctrica, el cual se debe al aumento demográfico, lo que a su vez incrementa la demanda del servicio. Dentro de este orden de ideas, la propuesta que se da a dicha problemática, viene dada por el diseño de un sistema de generación hidroeléctrico para cada una de las alternativas planteadas en este trabajo, haciendo uso del embalse en estudio.

Por otro lado, se busca proponer una herramienta para el profesional de la ingeniería, que sea de gran utilidad al momento de evaluar el potencial hidroeléctrico que poseen algunos embalses y considerar los efectos que pueda generar la creación de un sistema que aproveche el recurso hídrico para la generación de energía eléctrica, a largo, mediano y corto plazo mediante la evaluación de su factibilidad.

Adicionalmente, se quiere que la información suministrada resulte accesible y entendible para estudiantes de pregrado de ingeniería civil, con el fin de instruir sobre esta fuente de energía que puede ser plenamente aprovechada para la generación de electricidad, mediante el adecuado análisis de variables hidroenergéticas de los embalses de Venezuela, y como esto pudiese beneficiar a la población en todos los ámbitos.

Delimitaciones

El embalse seleccionado para este estudio se encuentra ubicado en el estado Cojedes, Venezuela. Este trabajo incluye una explicación detallada del procedimiento de análisis y evaluación de la capacidad hidroenergética del embalse Pao La Balsa, el diseño y estudio de la factibilidad económica de dos propuestas desarrolladas, para la construcción de una central hidroeléctrica a pequeña escala, estimando costos a través de un análisis económico.

Para dar inicio al estudio del embalse, se revisó el balance hídrico del embalse para una serie de 10 años, lo que permite obtener una estimación de rendimientos medios anuales y gastos medios diarios para el embalse Pao La Balsa.

Asimismo, en este trabajo se detallan todos los lineamientos para el diseño del sistema de generación hidroeléctrica, sin embargo, este estudio se limita solo al diseño del conjunto de obras que conforman la central hidroeléctrica y el análisis de factibilidad; cabe considerar que no se tomarán en cuenta las áreas de influencia de las centrales en conjunto con los sistemas eléctricos de distribución asociados al embalse en estudio.

Por otro lado, para el desarrollo de ambas alternativas se contó solo con la herramienta “Google Earth” y parte de algunos planos del sitio, extraídos del trabajo de investigación “Evaluación del rendimiento del embalse Pao - La Balsa para el período de funcionamiento 2007 – 2025”

CAPÍTULO II

MARCO TEORICO

En este capítulo se muestran los antecedentes y bases teóricas que sustentan el presente trabajo de investigación.

Antecedentes de la investigación

En esta sección se mencionan algunos trabajos previos que sirven de respaldo a esta investigación.

González y Rebolledo (2015) “**Análisis de la capacidad hidroenergética de los embalses del estado Lara**”. Este trabajo de investigación tiene como objetivo describir las variables hidroenergéticas de los embalses del estado Lara (Venezuela), con el fin de diseñar un sistema de generación hidroeléctrica, y analizar la factibilidad técnico - económica del mismo. Debido a la carencia de datos, solo fue estudiado el embalse Dos Cerritos.

La investigación realizada es del tipo descriptiva, ya que mediante la recolección de datos, se realizó el análisis hidroenergético del embalse. El tipo de metodología utilizada es de campo, ya que los datos recopilados se obtuvieron del sitio donde se llevó a cabo el estudio.

Finalmente, este trabajo concluye con que es económicamente factible desarrollar en el embalse Dos Cerritos, una pequeña central hidroeléctrica capaz de generar una potencia de 503,41 kW por medio de una turbina Francis. Las obras civiles necesarias son pocas y no son complejas de ejecutar, ya que se trata de una presa de concreto.

La relación de este trabajo con la presente investigación es el análisis que se realiza a las variables hidroenergéticas del embalse, el diseño de la central y el análisis de factibilidad técnico – económica del proyecto.

Ruiz P. (2013): **“Estudio del recurso hidráulico y proyecto de una central mini hidráulica en la cuenca del río Tormes”**. El objeto de este proyecto es el diseño y estudio de la viabilidad de una mini central hidráulica en el pueblo Hoyo del Espino (España). Para llevar a cabo esta investigación, se optó por la construcción de una presa de concreto de 5 metros de altura, la cual almacena agua en épocas lluviosas para aprovecharla en tiempos de sequía.

La investigación es del tipo descriptiva, ya que los datos de caudales diarios fueron recolectados y proporcionados por la Confederación Hidrográfica del Duero (CHD), además, la metodología utilizada corresponde a una investigación de campo.

Con este trabajo se llegó a la conclusión de que la colocación de una minicentral en el lugar de estudio es rentable económicamente, tal que la inversión inicial se recuperaría en un período de 8 años, además la potencia generada sería igual a 0,5 MW. Este estudio contribuyó al marco teórico, y sirvió de guía al momento de seleccionar el tipo de turbina a utilizar en este trabajo.

Poza (2008): **“Diseño hidráulico y mecánico de la central mini hidroeléctrica del embalse de Valmayor”**. Este estudio tiene como objetivo el diseño hidráulico y mecánico de una central mini hidroeléctrica aprovechando un embalse ya existente. Se realizaron consultas a la Confederación Hidrográfica de Tajo y al Canal de Isabel II con el fin de determinar que embalse podría presentar las condiciones ideales para la instalación de la central y obtener los caudales a lo largo de los últimos años, seleccionando de esta manera, al embalse Valmayor situado al noroeste de la comunidad de Madrid, en España.

Esta investigación es del tipo descriptiva y realizada en campo mediante la recolección de datos necesarios para el diseño del sistema hidroeléctrico. Se concluyó que la construcción de la minicentral Valmayor supone un impacto mínimo ambiental, asimismo al ser de una potencia reducida, igual a 772 kW, no necesita un espacio extenso para ser instalada. Por otro lado, con un estudio de factibilidad queda asegurada la rentabilidad del proyecto con vida útil de veinticinco años, recuperando la inversión entre seis y siete años.

Este trabajo de investigación contribuyó en gran medida al marco teórico y al diseño de las obras civiles de la central hidroeléctrica propuesta en este trabajo de grado.

Camacho y Carrillo (2000): **“Estudio de factibilidad de instalación de pequeñas centrales hidroeléctricas en el estado Amazonas”**. Este trabajo tiene como objetivo principal, el estudio de la factibilidad de abastecimiento eléctrico a las poblaciones de San Fernando de Atabapo, Maroa, San Carlos de Río Negro y San Juan de Manapiare, ubicadas en el Estado Amazonas.

En este trabajo se llegó a la conclusión, de que de todas las poblaciones estudiadas, San Juan de Manapiare es la única que presentaba un sitio adecuado para la introducción de una pequeña central hidroeléctrica con una potencia aprovechable del sitio de 914 kW.

Además se realizó una comparación con la demanda máxima de energía eléctrica en la zona, dando como resultado 717,40 kW, por lo que se tomó como potencia a instalar en la central (considerando el grupo turbo – generador) igual a 720 kW seleccionando una turbina Michell – Banki.

Pérez (1999): **“Estudio de factibilidad y equipamiento hidroeléctrico para ocho embalses seleccionados”**. El objetivo principal de esta investigación es determinar la factibilidad de utilización de la infraestructura (embalses) construidos por el antes Ministerio del Ambiente con fines de uso múltiples, para ser utilizados en la generación hidroeléctrica, con pequeñas centrales equipadas con turbinas estandarizadas.

Luego de la revisión de este trabajo, se pudo concluir que es factible la incorporación de centrales hidroeléctricas en todos los embalses estudiados y que además el desarrollo de los mismos le da un valor añadido al uso de un recurso que desde la construcción de tales embalses ha sido desaprovechado en su totalidad.

Este trabajo es de utilidad para la presente investigación, ya que dentro del estudio de factibilidad que se realizó, se incluye la evaluación detallada de los embalses y de la posibilidad de utilizar las pequeñas centrales propuestas como unidades de respaldo o como centrales de generación para suplir zonas aisladas.

Bases Teóricas

Para el desarrollo del presente trabajo de investigación, es importante establecer desde el inicio, las bases teóricas que permitan al lector un mejor entendimiento del tema en estudio. En este apartado, se desarrollan conceptos relacionados y enfocados en las obras de embalse, obras que componen un sistema hidroeléctrico y criterios de diseño.

Embalses

Los embalses se definen como volúmenes de agua retenidos en un vaso topográfico natural o artificial gracias a la construcción de obras hidráulicas. La creación de los embalses son justificados para una serie de propósitos entre los cuales destacan:

- Regadío
- Producción hidroeléctrica
- Abastecimiento de agua
- Control de crecidas
- Actividades recreativas
- Navegación y pesquerías
- Otros

En Venezuela existen alrededor de 108 embalses, reservorio o lago artificial, donde se almacenan los excesos de agua durante los períodos de mayor escorrentía, para proporcionarlos en los períodos secos o simplemente para impedir daños aguas abajo.

Los embalses que se han construido en el país, en la mayoría de los casos están destinados para usos múltiples destacándose: consumo humano, gasto ecológico, riego, control de inundaciones, hidroelectricidad, recreacional e industria.

En la Figura 1 se muestra de que manera están distribuidos estos usos en los embalses del país.

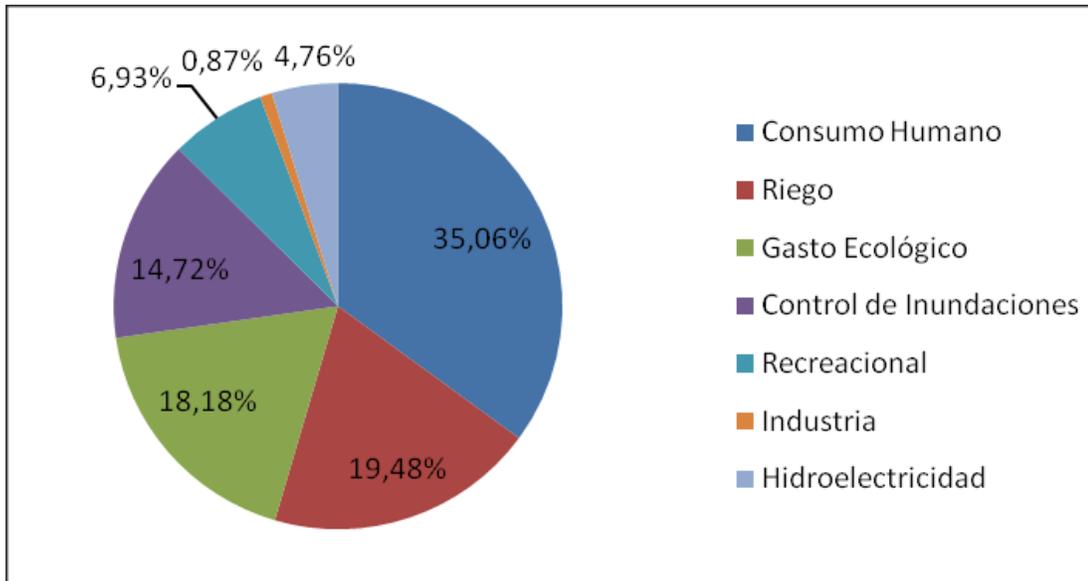


Figura 1. Embalses. Diferentes usos

Fuente: *Ministerio del Poder Popular para Ecosocialismo y Aguas (MINEA)*

Componentes de los embalses

Desde el punto de vista técnico, los embalses están compuestos por una serie de obras hidráulicas, cada una de ellas cumplen con funciones específicas en cuanto la operación y seguridad del embalse. Estas obras hidráulicas o llamadas también obras civiles, básicamente son: presas, tomas, descargas de fondo y aliviaderos.

- **Presa:** Las presas se construyen con el fin de regular los recursos hídricos, y así poder cubrir parte de las demandas de agua. Usualmente, las presas se construyen en los valles donde corren los ríos y el área ocupada por ella lleva generalmente el nombre del sitio de presa.

Debido a la gran diversidad de secciones que se pueden generar en el cuerpo de la presa de tierra o la de enrocado con núcleo, estas se pueden clasificar en: presas homogéneas, presas zonificadas y presas mixtas. Además se clasifican según la forma de resistir el empuje hidrostático.

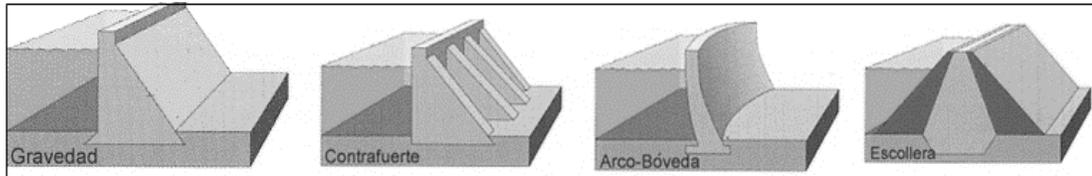


Figura 2. Tipos de presas

Fuente: <http://marirueda296.blogspot.com/p/sobre-las-presas.html> Castro (2013)

- **Tomas:** Son estructuras hidráulicas ubicadas en la cara aguas arriba de la presa, o dentro del embalse, para dirigir el agua a un conducto confinado, túnel, canal o tubería, con el fin de satisfacer un propósito determinado.



Figura 3. Torre toma embalse Canoabo, Edo. Carabobo.

Fotografía tomada por Enrique Mesa (2008)

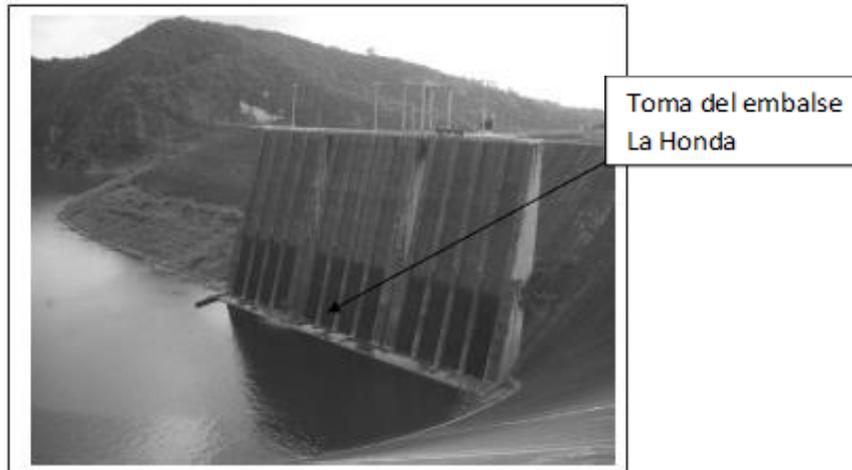


Figura 4. *Obra de toma embalse La Honda, Edo. Táchira*

Fuente: Comité Venezolano de Grandes Presas

- **Obras de desvío:** Son las primeras que se construyen, las que se utilizan para desviar el río y permitir efectuar la excavación de las fundaciones y posteriormente, la construcción del terraplén y el resto de las obras, en seco sin que se produzcan daños.
- **Descargas de fondo:** Son aperturas o conductos más bajos, que atraviesan bien sea a través o por los lados de la presa, permitiendo así el desagüe del embalse.
- **Aliviaderos:** Son estructuras hidráulicas que tienen como función evacuar de manera controlada los excesos de agua no regulables de los embalses, de forma tal que se garantice la integridad física de la presa y de las obras de embalse conexas, además debe garantizarse que no causen daños inaceptables aguas abajo. La Figura 5 muestra el aliviadero del embalse Pao La Balsa.



Figura 5. Aliviadero del embalse Pao La Balsa, Edo. Cojedes

Fuente: Cabrita R. (2008)

Clasificación de los embalses

Los embalses se clasifican de la siguiente manera:

- ***Según su función***

- *Embalses de acumulación:* retienen excesos de agua en períodos de alto escurrimiento para ser usados en épocas de sequía.
- *Embalses de distribución:* no producen grandes almacenamientos pero facilitan regularizar el funcionamiento de sistemas de suministro de agua, plantas de tratamiento o estaciones de bombeo.
- *Estanques:* pequeños almacenamientos para suplir consumos locales o demandas pico.

- ***Según su tamaño***

La clasificación de los embalses de acuerdo al tamaño se hace más por razones de tipo estadístico que por interés desde el punto de vista técnico. En la Tabla 1 se muestra la clasificación y capacidad de los embalses.

Tabla 1:

Clasificación de los embalses según su tamaño.

EMBALSE	CAPACIDAD (10⁶ m³)
Embalses gigantes	Capacidad > 100.000
Embalses muy grandes	100.000 > Capacidad > 10.000
Embalses grandes	10.000 > Capacidad > 1.000
Embalses medianos	1.000 > Capacidad > 1
Estanques	1 > Capacidad

Fuente: Guevara (2010). Estructuras Hidráulicas.

Características de los embalses

Lo más importante de un embalse es su capacidad de almacenamiento, que se representa por medio de las curvas características, las cuales son:

- **Curva Área – Elevación:** Esta curva se construye a partir de información topográfica planimetrando el área comprendida entre cada curva de nivel del vaso topográfico. Indica la superficie inundada correspondiente a cada elevación.
- **Curva Capacidad – Elevación:** Esta curva se obtiene mediante la integración de la curva área – elevación. Indica el volumen almacenado correspondiente a cada elevación.

Caudales característicos de los embalses

- **Caudal Firme:** Es el caudal máximo que puede retirarse del embalse en un período crítico. Si el embalse ha sido dimensionado para compensar los caudales a lo largo de un año hidrológico, generalmente se considera como periodo crítico al año hidrológico en el cual se ha registrado el volumen aportado mínimo.

- **Caudal Regularizado:** Es el caudal que se puede retirar del embalse durante todo el año hidrológico, asociado a una probabilidad.

Niveles característicos en un embalse

- **Nivel muerto (NME)**

Es el nivel mínimo de agua en el embalse. Delimita superiormente el volumen muerto del embalse, el cual debe exceder en capacidad al volumen de sedimentos calculado durante la vida útil, con el fin de que el embalse los pueda contener. Su determinación es muy compleja, sobre todo si el embalse es de propósito múltiple (caso en que debe tenerse en cuenta la carga de agua sobre las turbinas, condiciones de navegación aguas arriba, altura de comando sobre las tierras de riego, etc.).

- **Nivel mínimo de operación del embalse (NMOE)**

Delimita superiormente el volumen generado por la altura mínima de agua necesaria para el correcto funcionamiento de la toma de agua la que se sitúa por encima de NME.

- **Nivel de aguas normales del embalse (NNE)**

Delimita superiormente al volumen útil del embalse, que es el que se aprovecha y gasta en función de diferentes propósitos: energía, riego, suministro de agua, etc. Para su ubicación se tienen en cuenta los siguientes aspectos: aportes de la cuenca, demanda de agua, pérdidas por infiltración y evaporación.

- **Nivel de aguas máximas del embalse (NMAE)**

Se presenta temporalmente durante la creciente de los ríos dando lugar al volumen máximo del embalse, el cual puede ser usado en algunos casos, pero por lo general es evacuado rápidamente por medio del aliviadero. En condiciones normales ocurre oscilación del nivel del agua entre el NNE y NMOE.

A continuación, en las Figuras 6 y 7 se muestran los niveles característicos de los embalses, en vista de planta y vista longitudinal:

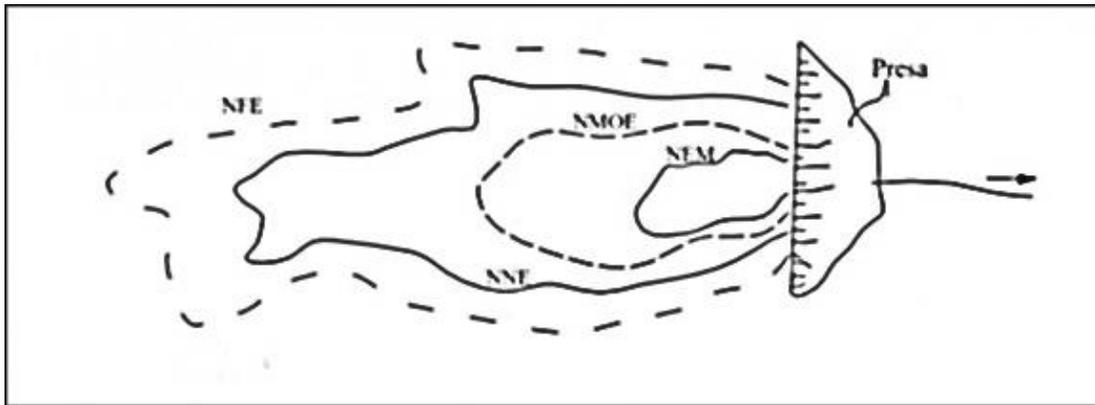


Figura 6. Niveles de un embalse. Vista de planta.

Fuente: <http://www.hidrojing.com/el-volumenembalsado-es-solo-agua> (2010)

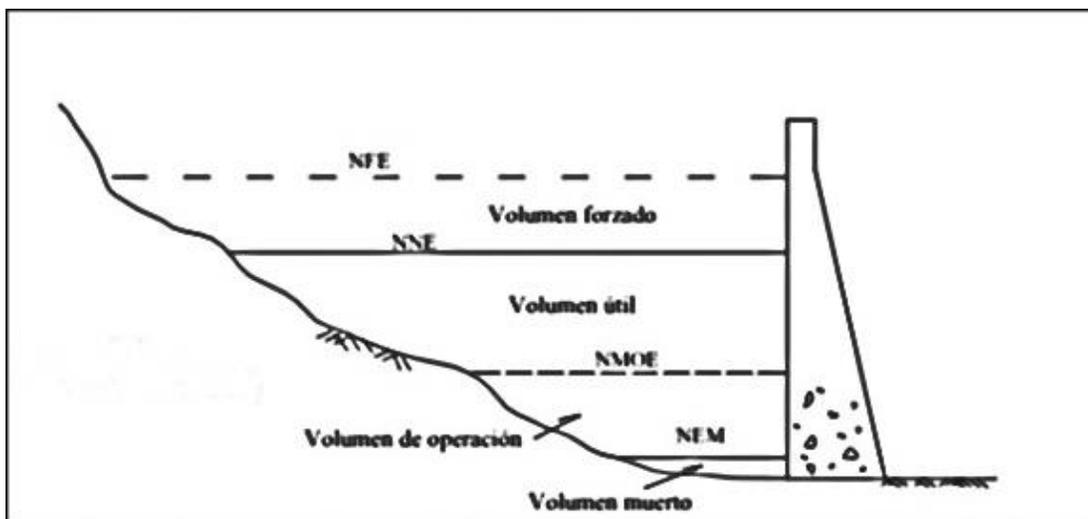


Figura 7. Niveles de un embalse. Perfil longitudinal

Fuente: <http://www.hidrojing.com/el-volumenembalsado-es-solo-agua> (2010)

Descripción del Embalse Pao La Balsa

El embalse Pao La Balsa se encuentra ubicado sobre el río Pao, al sur de la carretera que une a Tinaco con la población del Pao, en el Municipio Pao, sitio denominado La Balsa, estado Cojedes. Entra en funcionamiento en el año 1978 y actualmente está bajo la administración del Ministerio del Poder Popular para Ecosocialismo y Aguas (MINEA).

El embalse Pao La Balsa tiene como coordenadas 9°35'39.3" de latitud Norte y 68°09'27.1" de longitud oeste. Se alimenta de los ríos Paíto, Mucaria y Pacaragua, además cuenta con una capacidad máxima igual $350,00 \times 10^6 \text{m}^3$, capacidad normal igual a $325,59 \times 10^6 \text{m}^3$ y una superficie de 4.780,65 Ha.

El embalse tiene como componentes, una presa de tierra homogénea de altura máxima de 27 m con un aliviadero tipo creager de ancho 15 m y cota 131,00 m.s.n.m, el mismo está situado en el estribo derecho en contacto con la presa y descarga un caudal máximo de $60 \text{m}^3/\text{s}$.

Por otro lado, el embalse cuenta con una obra de toma doble situada en el estribo izquierdo, la cual permite el paso de agua para abastecer la zona central del país y preservar los valores ecológicos en el cauce del río Pao.

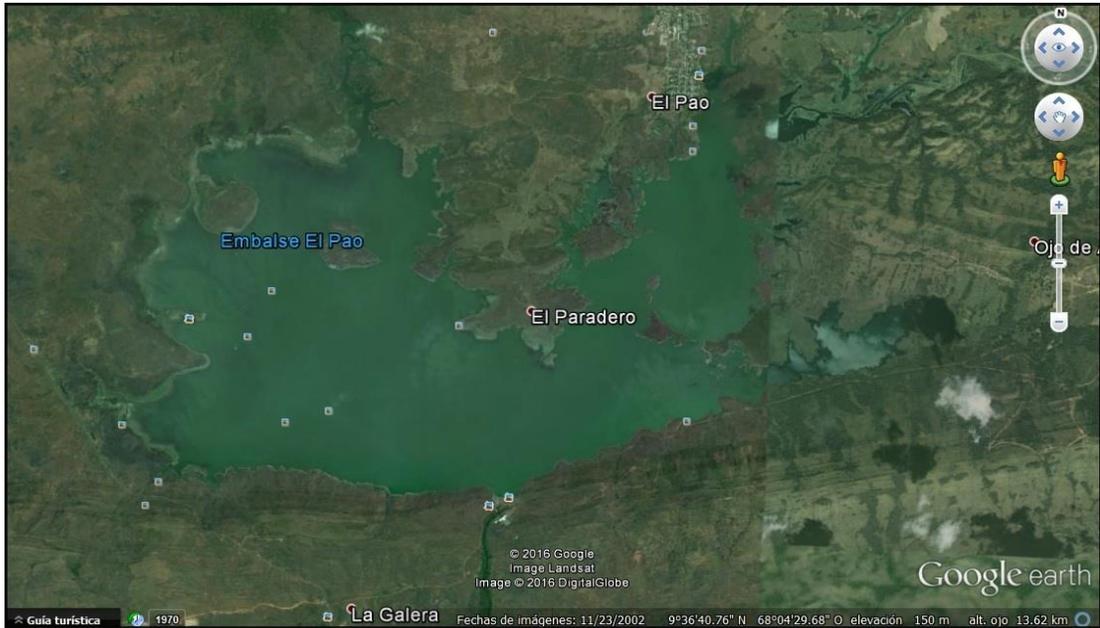


Figura 8. Embalse Pao La Balsa, Estado. Cojedes

Fuente: Google Earth (2016)

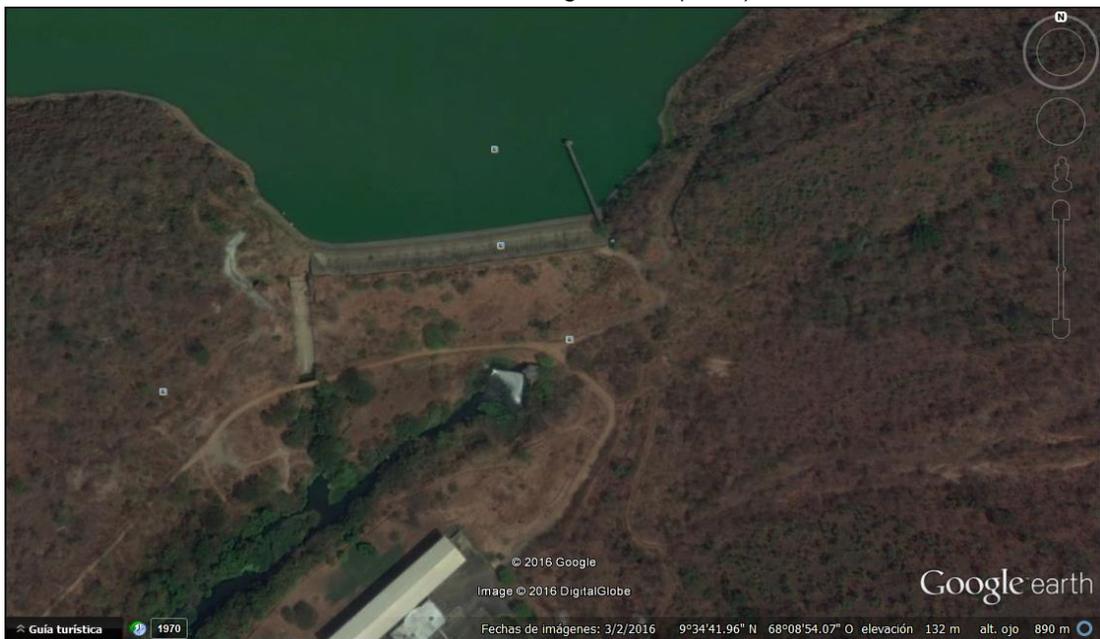


Figura 9. Presa Ing. Carpóforo Olivares, Estado Cojedes

Fuente: Google Earth (2016)

Centrales Hidroeléctricas

Dentro de los diferentes aprovechamientos de los recursos hidráulicos tiene especial relevancia la producción de energía hidroeléctrica, la cual como consecuencia del incremento de los costos de los combustibles fósiles que alimentan las plantas de generación térmica, han cobrado mayor relevancia en Venezuela en los últimos años. Por otro lado, las centrales hidroeléctricas no son contaminantes y poseen un costo bajo de operación y mantenimiento.

Los aprovechamientos hidroeléctricos poseen, además, la ventaja de no consumir el “combustible” (el agua), la cual puede ser aprovechada con posterioridad para otros propósitos, tales como el consumo doméstico e industrial, el riego o la navegación.

Pequeñas Centrales Hidroeléctricas

Las pequeñas centrales hidroeléctricas son instalaciones de generación de energía eléctrica que aprovechan la energía potencial y cinética contenida en un caudal de agua, la cual es encausada a través de canales de conducción en un nivel superior y se conducen a través de túneles y tuberías de presión hasta un nivel inferior donde entran con mayor velocidad y mayor energía cinética al equipo turbo generador.

Según la OLADE, una Pequeña Central Hidroeléctrica (P.C.H) es una instalación donde se utiliza la energía hidráulica para generar reducidas cantidades de electricidad hasta (5000 kW aproximadamente), por medio de uno o más grupos de conjuntos turbina - generador.

Con la generación de energía a partir de pequeñas centrales hidroeléctricas, se busca dar suministro a zonas aisladas en las que llevar una línea de interconexión del sistema eléctrico principal puede ser muy costoso (Demetriades, 2000), aunque también estas pueden ser conectadas

directamente a la red eléctrica principal si se sigue la regulación correspondiente.

Clasificación de las pequeñas centrales hidroeléctricas

- **Clasificación según la potencia y el salto:** Las pequeñas centrales hidroeléctricas se han clasificado según su potencia o según el salto, de acuerdo a las siguientes especificaciones mostradas en las Tablas 2 y 3 respectivamente.

Tabla 2:

Clasificación de las pequeñas centrales hidroeléctricas según la potencia

Tipos	Potencia (kW)
Picocentrales	0,5 - 5
Microcentrales	5 - 50
Minicentrales	50 - 500
Pequeñas centrales	500 - 5000

Fuente: Guía de diseño de pequeñas centrales hidroeléctricas Santafé de Bogotá (1997)

Tabla 3:

Clasificación de las pequeñas centrales hidroeléctricas según el salto

Tipos	Bajo	Medio	Alto
Microcentral	< 15	15 - 50	> 50
Minicentral	<20	20 -100	> 100
Pequeñas centrales	<25	25 - 130	> 130

Fuente: Guía de diseño de pequeñas centrales hidroeléctricas Santafé de Bogotá (1997)

A continuación en la Tabla 4 se presentan los rangos utilizados por la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE).

Tabla 4:

Clasificación de las pequeñas centrales hidroeléctricas según la OLADE.

Potencia (kW)	Tipo de Central
0 - 50	Microcentral Hidroeléctrica
50 - 500	Minicentral Hidroeléctrica
500 - 5000	Pequeña central Hidroeléctrica

Fuente: Sierra, Sierra y Guerrero (2011)

- **Clasificación según la forma de utilización:** Según su forma de utilización las pequeñas centrales hidroeléctricas se pueden clasificar de acuerdo a:
 - *Su captación:* Pueden ser de paso o con embalse.
 - *Su operación:* Puede ser de operación continua con una disponibilidad de 24 hr/día todo el año, o discontinua con operación de tiempo parcial.
 - *Su regulación:* Esta puede ser regulable de forma manual o automática o de carga constante donde el exceso se disipa.
 - *Su vinculación al sistema eléctrico:* En este rango se tienen centrales aisladas y centrales integradas o interconectadas
 - *Su concepción tecnológica:* Se tienen centrales con tecnologías convencionales (según normas de países industrializados) y centrales con tecnologías no convencionales (según tecnología local adecuada a las condiciones del país).

Tipos de pequeñas centrales hidroeléctricas

- **Centrales de agua fluyente:** Estas centrales no acumulan agua, sino que utilizan el caudal del río tal y como venga; el agua que no se emplee seguirá su curso siendo evacuada por el aliviadero de la central. Pueden situarse en el mismo cauce del río o en un canal hecho a tal efecto, y tendrán reserva o no en función de lo que se haya ensanchado el río en la zona central. Las obras necesarias para construir este tipo de central son las siguientes:

- Azud
- Toma
- Canal de derivación
- Cámara de carga
- Tubería forzada
- Edificio central y equipamiento electro – mecánico
- Canal de descarga
- Subestación y línea eléctrica

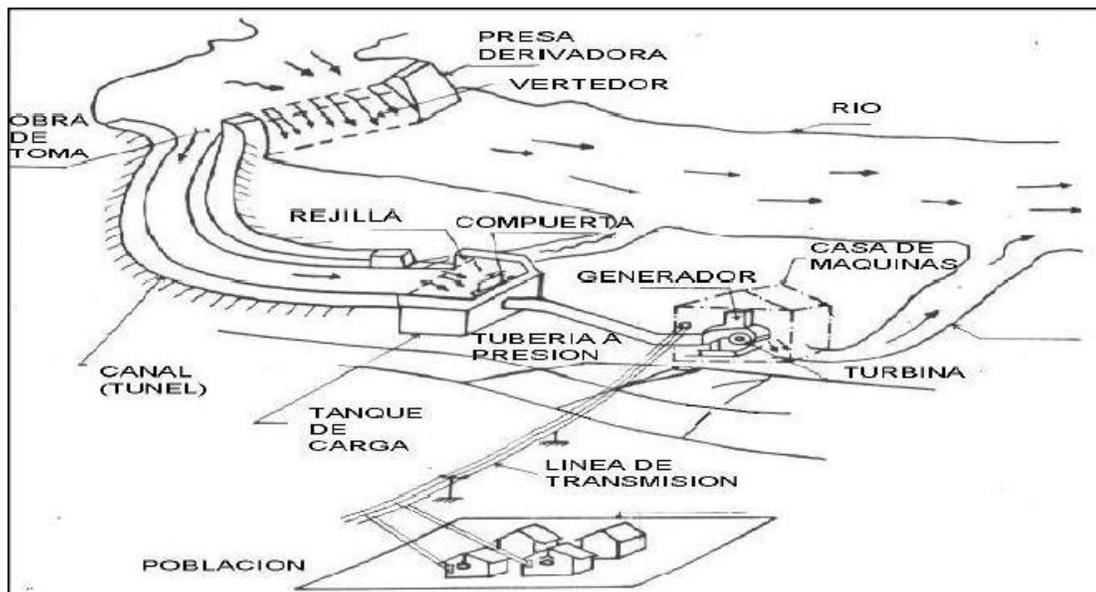


Figura 12. Central de agua fluyente y componentes.

Fuente: <https://energiaunam.wordpress.com/category/energia-mini-hidraulica/> (2010)

-Centrales de Embalse o Regulación: En este tipo de proyecto se embalsa un volumen de líquido “aguas arriba” de las turbinas mediante la construcción de una o más presas que forman lagos artificiales, dicho embalse es capaz de almacenar los caudales de los ríos afluentes, llegando en ocasiones a elevados porcentajes de captación de agua. El embalse permite graduar la cantidad de agua que pasa por las turbinas. Es necesario considerar en este tipo de centrales la sedimentación que seguirá acumulando con el paso del tiempo, para poder determinar las acciones a tomar para el dragado del mismo. Estas centrales pueden ser:

- *Centrales a pie de presa:* En un tramo de río con un desnivel apreciable se construye una presa de una altura determinada. La sala de turbinas está situada después de la presa. Las obras e instalaciones necesarias para construir una central al pie de una presa que ya existe son:
 - Construcción de conducciones de la presa a la central
 - Toma de agua con compuerta y reja
 - Tubería forzada hasta la central
 - Edificio central y equipamiento electro – mecánico
 - Subestación y línea eléctrica

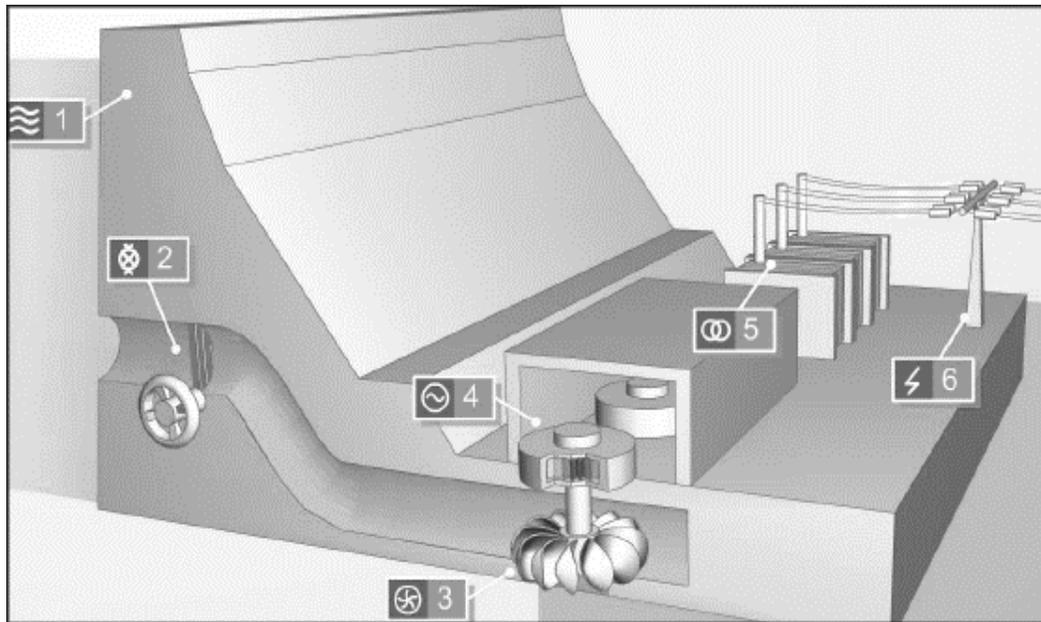


Figura 13. Central a pie de presa.

Fuente: <http://www.lifehygenet.eu/energia-mini-hidraulica/tecnologias-existentes> (2016)

- *Centrales por derivación de las aguas:* Las aguas del río son desviadas mediante una pequeña presa y son conducidas mediante un canal con una pérdida de desnivel tan pequeña como sea posible, hasta un pequeño depósito llamado cámara de carga o de presión. De esta sala arranca una tubería forzada que va a parar a la sala de turbinas. Posteriormente, el agua es devuelta río abajo, mediante un canal de descarga. Se consiguen desniveles más grandes que en las centrales a pie de presa. La Figura 14 muestra un esquema de este tipo de central.

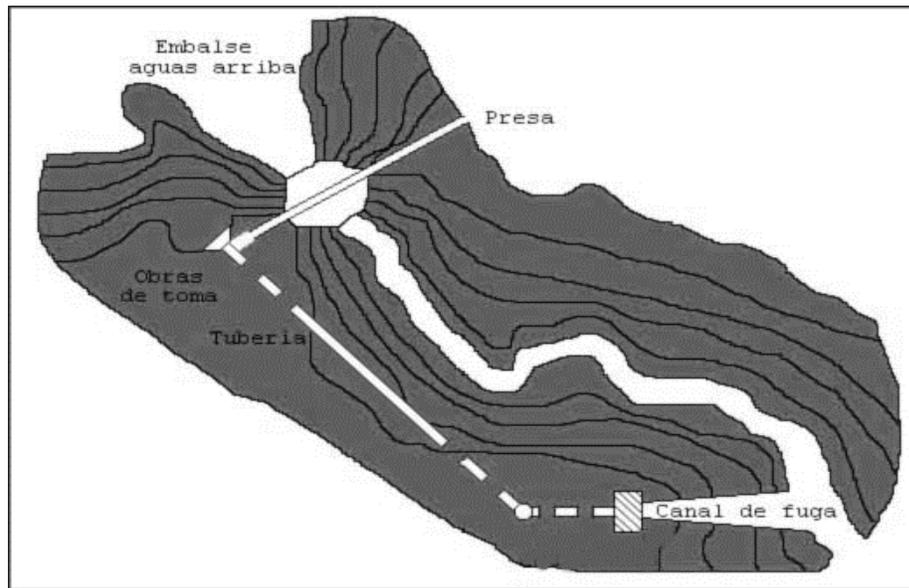


Figura 14. Central por derivación de las aguas

Fuente: <http://www.ecovive.com/centrales-segun-la-afluencia-del-caudal> (2010)

-Centrales de bombeo: Regulan la demanda energética bombeando agua hasta una altura superior en los momentos de escaso consumo. De esta forma se recupera energía que se podrá emplear cuando sea necesario turbinando de nuevo esa agua bombeada. Se tienen centrales en las que la máquina funciona como bomba y turbina o centrales en las que se tienen por separado ambas máquinas.

La tendencia en mini hidráulica es turbinar los caudales excedentes, los desembalsados o los ecológicos.

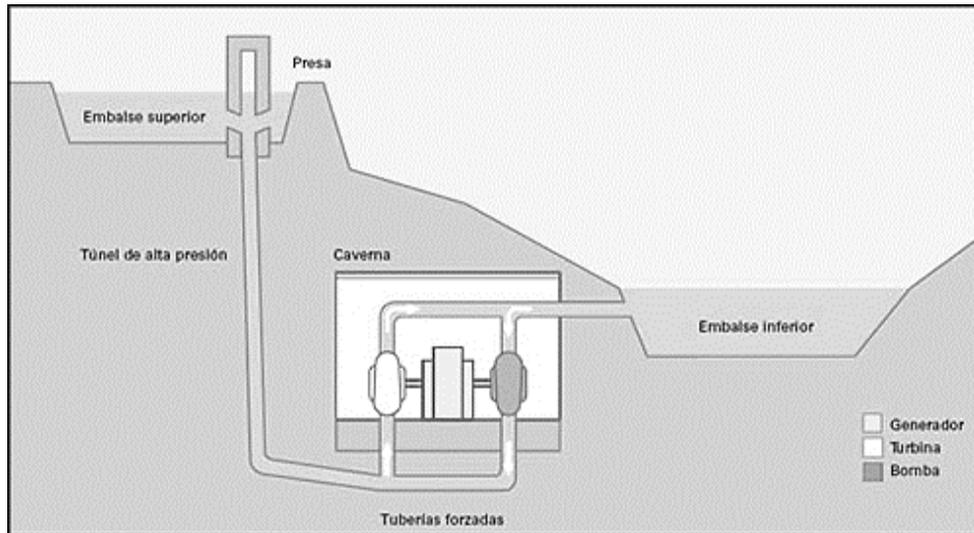


Figura 15. Central hidroeléctrica de bombeo

Fuente: http://www.epec.com.ar/generacion_centrales_h_tipos.html

-Centrales en canal de riego: 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 hasta la central, devolviéndola posteriormente a su curso normal en el 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.

Las obras que hay que realizar en estos tipos de centrales son las siguientes:

- Toma en el canal, con un aliviadero que habitualmente es en forma de pico de pato para aumentar así la longitud del aliviadero.
- Tubería forzada
- Edificio de la central con el equipamiento electro – mecánico
- Obra de incorporación al canal o al río
- Subestación y línea eléctrica

Componentes de un sistema hidroeléctrico

En una central hidroeléctrica, se transforma la energía potencial del agua en energía mecánica con una turbina hidráulica y luego, en energía eléctrica a través de un generador

- ***Azud y presas***

La obra que se lleva a cabo para provocar una retención en el cauce de un río puede ser de dos tipos:

Azud: Muro transversal al curso del río, de poca altura, que provoca un remanso de agua sin producir una elevación notable en el nivel. Su objetivo es desviar parte del caudal del río hacia la toma de la central. Aquella parte que no es derivada vierte por el aliviadero y sigue su curso normal por el río. En la Figura 15 se muestra la clasificación de los azudes de acuerdo al material empleado en su construcción.

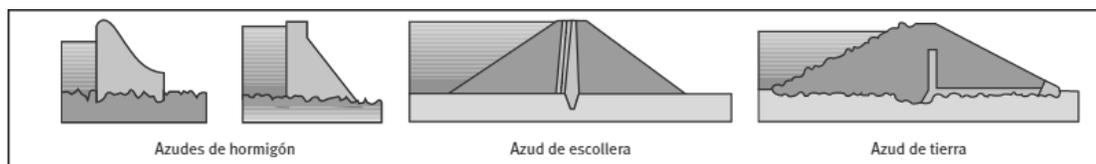


Figura 16. Tipos de azudes

Fuente: Castro (2006)

- ***Toma de agua***

Consiste en la estructura que se realiza para desviar parte del agua del cauce del río y facilitar su entrada desde el azud o la presa. Su diseño debe estar calculado para que las pérdidas de carga producidas sean mínimas.

La toma normalmente dispone de una rejilla que evita la entrada de elementos sólidos al canal y una compuerta de seguridad que denomina ataguía. En funcionamiento normal esta compuerta permanece abierta, cerrándose únicamente en caso de emergencia o cuando se va a realizar una inspección o reparación.

- ***Canales y tuberías***

Según el tipo de minicentral que se vaya a construir, se necesita una red mayor o menor de conducciones. Las instalaciones situadas a pie de presa no tienen cámara de carga (es el propio embalse), al contrario que las centrales en derivación donde el agua tiene que hacer un recorrido más largo: primero desde la toma a la cámara de carga, y después hasta la turbina.

El primer tramo que recorre el agua se realiza a través de canales o tuberías. En el segundo tramo hasta la turbina, se utilizan siempre tuberías.

Las conducciones que transportan el agua de la toma a la cámara de carga pueden realizarse a cielo abierto, enterrados (túneles) para el caso de canales, o en conducción a presión.

Las canales superficiales pueden realizarse excavando el terreno, sobre la propia ladera o mediante una estructura de concreto. Normalmente se construyen sobre la propia ladera, con muy poca pendiente, ya que el agua debe circular a baja velocidad para evitar al máximo las pérdidas de carga.

Estas conducciones, que siguen las líneas de nivel, tienen una pendiente de aproximadamente el 0,5 por mil.

Para el diseño de los canales superficiales es necesario calcular las características geométricas del mismo. En la Figura 17 muestra cada sección conjuntamente con las ecuaciones para el cálculo de sus parámetros geométricos.

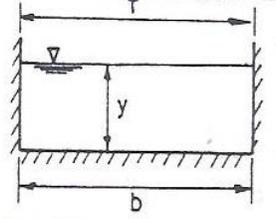
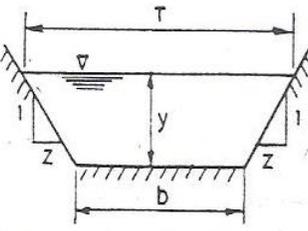
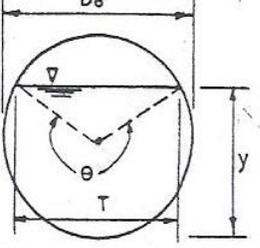
SECCION	CARACTERISTICAS GEOMETRICAS
	$A = by; P = b + 2y; R = \frac{by}{b + 2y}$ $T = b; D = y$
	$A = y(b + zy); P = b + 2y\sqrt{1 + z^2}$ $R = \frac{y(b + zy)}{b + 2y\sqrt{1 + z^2}}; T = b + 2zy$ $D = \frac{y(b + zy)}{b + 2zy}$
	$A = \frac{1}{8}(\theta - \text{sen}\theta)D_0^2; P = \frac{\theta}{2}D_0; R = \frac{(\theta - \text{sen}\theta)D_0}{4\theta}$ $T = D_0 \text{sen}\theta/2; D = \frac{(\theta - \text{sen}\theta)D_0}{8 \text{sen}\theta/2}$ $\theta = \text{EN RADIANES}; y = \frac{D_0}{2}(1 + \text{sen}\theta/2)$

Figura 17. Características geométricas de secciones usuales. Canales

Fuente: Juan José Bolinaga (1985)

Los túneles son conducciones bajo tierra que se excavan en el terreno y aunque tienen un coste más elevado, se adaptan mejor a este. El túnel suele ser de superficie libre y funciona como un canal abierto, es decir el agua no circula en presión.

Para el diseño del túnel, se hace uso de las ecuaciones 2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 2.6, 2.7 y 2.8 que se muestran a continuación:

$$T = 2\sqrt{y_o(D - y_o)} \quad 2.1$$

Donde:

T = Espejo de agua (m)

D = Diámetro del túnel (m)

y_o = Profundidad normal (m)

$$A = \frac{1}{8}(\theta - \text{Sen}\theta)D^2 \quad 2.2$$

Donde:

A = Área transversal del túnel (m²)

D = Diámetro del túnel (m)

$$P = \frac{1}{2}D \cdot \theta \quad 2.3$$

Donde:

P = Perímetro del túnel (m)

D = Diámetro del túnel (m)

$$R = \frac{A}{P} \quad 2.4$$

Donde:

R = Radio hidráulico del túnel (m)

A = Área transversal del túnel (m²)

P = Perímetro del túnel (m)

$$Dh = \frac{A}{T} \quad 2.5$$

Donde:

Dh = Profundidad hidráulica (m)

A = Área transversal (m²)

$$V = \frac{R^{\frac{2}{3}} \times S^{\frac{1}{2}}}{n} \quad 2.6$$

Donde:

V = Velocidad del agua (m/s)

R = Radio hidráulico (m)

S = Pendiente del túnel (decimal)

n = Rugosidad del material

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \times Dh}} \quad 2.7$$

Donde:

Fr = Número de froude

V = Velocidad del agua (m³/s)

g = Gravedad (m²/s)

Dh = Profundidad hidráulica (m)

Por medio de la ecuación 2.7, se mide la relación entre las fuerzas de gravedad y las fuerzas de inercia de manera que mientras mayor resulte menor será la importancia relativa de la gravedad.

Con la ecuación 2.7, puede clasificarse el flujo en subcrítico, supercrítico y crítico. Los flujos cuyas profundidades son mayores que la crítica se llaman regímenes subcríticos y son de bajas velocidades con número de Froude <1 ; los flujos cuyas profundidades son menores que la crítica se denominan regímenes supercríticos o torrenciales, con número de Froude >1

$$E = y_o + \frac{Q^2}{2 \times g \times A^2} \quad 2.8$$

Donde:

E = Energía específica (m – kg/kg)

y_o = Profundidad normal (m)

Q= Caudal de diseño (m^3/s)

g = Gravedad (m^2/s)

A = Área transversal (m^2)

Mediante la ecuación 2.8 se obtiene la energía específica, la cual se define como la energía por kilogramos de agua que fluye a través de la sección, medida respecto al fondo del canal.

Las tuberías también se emplean en las conducciones bajo tierra, pero si son del tipo sin superficie libre, el fluido estará sometido a presión. Cuando la presión interna es alta, se incluye un armazón metálico como refuerzo.

- ***Cámara de carga***

Es un depósito localizado al final del canal del cual arranca la tubería forzada. En algunos casos se utiliza como depósito final de regulación, aunque normalmente tiene solo capacidad para suministrar el volumen necesario para el arranque de la turbina sin intermitencias.

Cuando la conducción entre la toma de agua y la cámara de carga se realiza en presión, ésta última será cerrada y tendrá además una chimenea de equilibrio, para amortiguar las variaciones de presión y protegerla de los golpes de ariete.

Al diseñar la geometría de la cámara hay que evitar al máximo las pérdidas de carga y los remolinos que puedan producirse, tanto aguas arriba como en la propia cámara. Si la tubería forzada no está suficientemente sumergida, un flujo de este tipo puede provocar la formación de vórtices que arrastren aire hasta la turbina, produciendo una fuerte vibración que bajaría el rendimiento de la minicentral. La cámara de carga debe contar además con un aliviadero, ya que en caso de parada de la central el agua no turbinada se desagua hasta el río o arroyo más próximo. También es muy útil la instalación en la cámara de una reja con limpia – rejas y compuertas de desarenación y limpieza.

El dimensionamiento de la cámara de carga viene dada por las ecuaciones: 2.9, 2.10, 2.11, 2.12, 2.13, 2.14, 2.15 y 2.16

2.9

$$L_t = L_1 + L_2$$

Donde:

L_t = Longitud total del tanque (m)

L_1 = Longitud necesaria del tanque (m)

L_2 = Longitud total de la rejilla (m)

$$L_1 = 0,304 \cdot Q \cdot \frac{L\sqrt{h_2}}{(H_u + h_s) \cdot d^2} \quad 2.10$$

Donde:

L_1 = Longitud necesaria del tanque (m)

Q = Caudal de diseño (m^3/s)

L = Longitud de la tubería de presión (m)

h_2 = Altura necesaria en el tanque de carga (m)

H_u = Altura útil (m)

h_s = Altura por efecto del golpe de ariete (m)

d = Diámetro interior de la tubería de presión (m)

$$L_{1'} = \left[2,5 + 1,1 \frac{Y}{h_2} + 0,70 \left(\frac{Y}{h_2} \right) \right] \cdot \sqrt{h_2 \cdot Y} \quad 2.11$$

Donde:

$L_{1'}$ = Longitud en diseño de la caída vertical (m)

Y = Diámetro de la tubería de conducción del túnel (m)

h_2 = Altura necesaria en la cámara de carga (m)

$$h_2 = a_1 + D + h_1 \quad 2.12$$

Donde:

h_2 = Altura necesaria del tanque (m)

a_1 = Altura necesaria que evita el ingreso de sedimentos (m)

D = Diámetro superior de la tubería de presión (m)

h_1 = Altura mínima de agua sobre la tubería de presión (m)

$$h_1 = 0,543 \cdot V \cdot \sqrt{d} \quad 2.13$$

Donde:

h_1 = Altura mínima de agua sobre la tubería de presión (m)

V = Velocidad en la tubería de presión (m/s)

$$H_t = a_1 + d + h_1 + h_v + B$$

2.14

Donde:

H_t = Altura total del tanque de carga (m)

a_1 = Altura necesaria que evita el ingreso de sedimentos (m)

d = Diámetro interior de la tubería de presión (m)

h_1 = Altura mínima de agua sobre la tubería de presión (m)

h_v = Altura de agua en el desborde (m)

B = Borde libre (m)

$$B = \sqrt{\frac{V_t}{h_1}}$$

2.15

Donde:

B = Ancho de la cámara de carga (m)

V_t = Volumen de la cámara de carga (m³)

h_1 = Altura mínima de agua sobre la tubería de presión (m)

$$V_t = \frac{0.693 * Q^2}{A * i * g}$$

2.16

Donde:

V_t = Volumen de la cámara de carga (m^3)

A = Area del canal (m^2)

i = Pendiente del canal (decimal)

Q = Caudal de diseño (m^3/s)

g = Gravedad (m^2/s)

- **Desarenadores**

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. El desarenador crea las condiciones de flujo propicias para que las partículas suspendidas caigan por su propio peso al fondo del sedimentador.

- **Tubería forzada**

Se trata de la conducción que lleva el agua hasta la turbina, salvando la diferencia de alturas que se presente en cada recurso hidráulico. Debe ser capaz de soportar la presión del agua tanto en condiciones normales como de sobrepresión debida a transitorios, que pueden dar lugar a golpes de ariete, muy perjudiciales en las instalaciones. Las tuberías pueden ser de: acero, polietileno, PVC, aleaciones de plástico, refuerzos de fibra de vidrio, polietileno de alta densidad y madera.

Si se opta por instalar la tubería enterrada, deberá protegerse de la corrosión mediante pinturas adecuadas y recubrimientos de otras clases. Una buena protección evitara realizar un mantenimiento. Enterrar la tubería forzada lleva asociado un aumento de la sostenibilidad medioambiental de la instalación.

Para el dimensionamiento de la tubería forzada deben aplicarse las siguientes ecuaciones:

$$d = 1,27 \cdot \frac{Q^{0,428}}{(H_u + h_s)^{0,1423}} \quad 2.17$$

Donde:

d = Diámetro interior de la tubería de presión (m)

Q = Caudal de diseño (m³/s)

H_u = Altura bruta (m)

h_s = Altura por efecto del golpe de ariete (m)

$$e = \frac{4,9.D.1,25P}{\tau} + c \quad 2.18$$

Donde:

e = Espesor de la tubería (mm)

D = Diámetro de la tubería (m)

P = Presión de diseño (m.c.a)

C = Tolerancia

τ = Carga de trabajo de material (MPa)

$$e = \frac{(P + \Delta p) \cdot D}{2.K} \quad 2.19$$

Donde:

e = Espesor por golpe de ariete (mm)

D = Diámetro de la tubería (m)

P = Presión de diseño (m.c.a)

Δp = Sobrepresión por golpe de ariete (m.c.a)

K = Coeficiente de trabajo del acero (kg/mm²)

$$\Delta p_{Michaud} = \frac{2 \cdot p \cdot L \cdot V}{t_o} \quad 2.20$$

Donde:

Δp = Sobrepresión por golpe de ariete (m.c.a)

p = Presión de diseño (m.c.a)

t_o = Tiempo de cierre de la válvula (s)

L = Longitud de la tubería (m)

V = Velocidad del agua (m/s)

Con la ecuación 2.19 se determina la presión que se genera por el **golpe de ariete**, el cual se produce por un cambio repentino de presión debido a la apertura o cierre rápido de las válvulas en una instalación hidráulica.

En otras palabras, el golpe de ariete se puede presentar en una tubería que conduzca un líquido hasta el tope, cuando se tiene un frenado o una aceleración en el flujo.

Al cerrarse rápidamente una válvula en la tubería durante el escurrimiento, el flujo a través de la válvula se reduce, lo cual incrementa la carga del lado aguas arriba de la válvula, iniciándose un pulso de alta presión que se propaga en la dirección contraria a la de escurrimiento. Esta onda provoca sobrepresiones y depresiones las cuales deforman las tuberías y eventualmente la destruyen.

En el caso de cierre de una válvula, la fuerza viva del agua se convertirá en trabajo, determinando en las paredes de la tubería presiones superiores a la carga inicial. Si se pudiera cerrar la válvula en un tiempo $t = 0$, se produce el cierre instantáneo y considerando que el agua fuese incomprensible y la tubería no fuese elástica, la sobrepresión tendría valor infinito. En la práctica, el cierre lleva algún tiempo y la energía que va absorberse se transforma en esfuerzos de compresión del agua y deformación de las paredes de la tubería.

La sobrepresión no es infinita, pero tiene un valor más o menos alto según el tiempo de cierre y el material de que esté hecha la tubería. Esta sobrepresión se origina en la válvula que se cierra, y viaja por la tubería a una velocidad que se llama celeridad “ C_s ”, cuya ecuación se muestra a continuación:

$$C = \sqrt{\frac{a^2}{1 + \frac{a^2 \cdot p \cdot D}{e \cdot E}}} \quad 2.21$$

Donde:

C = Celeridad (m/s)

a^2 = Velocidad de propagación de las ondas de presión

e = Espesor del diámetro de la tubería (m)

D = Diámetro de la tubería (m)

E = Módulo de elasticidad del material (kg/cm²)

E_o = Módulo de elasticidad del fluido circulante (kg/cm²)

A continuación se definen los posibles tipos de cierre en función del tiempo:

- t_0 = Tiempo de cierre de la válvula (generalmente se considera un $t_0 = 3,5$ s)

- t_r = Tiempo de residencia de una partícula fluída en el conducto. Viene dada por la siguiente ecuación:

$$t_r = \frac{L}{v} \quad 2.22$$

Donde:

L = Longitud de la tubería (m)

v = Velocidad media del fluido en la tubería (m/s)

- t_{iv} : Tiempo de ida y vuelta de las ondas de presión. Se calcula con la siguiente ecuación:

$$t_{iv} = \frac{2.L}{c} \quad 2.23$$

Donde:

c = Celeridad (m/s)

L = Longitud de la tubería sujeta al fenómeno (m)

La tubería forzada presenta pérdidas primarias y secundarias, y se calculan mediante las siguientes ecuaciones:

$$H_{rp} = \frac{\lambda.L.V^2}{D.2g}. \quad 2.24$$

Donde:

H_{rp} = Pérdidas primarias (m.c.a)

λ = Coeficiente de fricción

V = Velocidad media del agua (m/s)

L = Longitud de la tubería (m)

D = Diámetro de la tubería (m)

g = Gravedad (m^2/s)

$$H_{rs} = \frac{\sum k_i .V^2}{2g}. \quad 2.25$$

Donde:

H_{rs} = Perdidas secundarias (m.c.a)

K_i = Coeficiente de pérdida de accesorios

V = Velocidad media del agua (m/s)

g = Gravedad (m^2/s)

$$H_r = H_{rp} + H_{rs}$$

2.26

Donde:

H_r = Pérdidas totales (m.c.a)

H_{rp} = Perdidas primarias (m.c.a)

H_{rs} = Perdidas secundarias (m.c.a)

- ***Edificio de la central***

Es el emplazamiento donde se sitúa el equipamiento de la minicentral: turbinas, bancadas, generadores, alternadores, cuadros eléctricos, cuadros de control, etc.

La ubicación del edificio debe analizarse atentamente, considerando los estudios topográficos, geológicos y geotécnicos, y la accesibilidad al mismo. El edificio puede estar junto al azud o presa, situarse al pie de este, estar separado aguas abajo cuando hay posibilidad de aumentar la altura del salto, e incluso puede construirse bajo tierra.

- ***Canal de restitución***

Este canal tiene como función entregar nuevamente al cauce natural las aguas que sean 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 riesgo la estructura de la casa de

máquinas, se recomienda 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.

- ***Elementos de cierre y regulación***

En caso de parada de la central es imprescindible la existencia de dispositivos que aislen la turbina u otros órganos de funcionamiento. Estos dispositivos son: ataguías, compuertas y válvulas.

Válvulas

- *Válvula de mariposa*: Utilizadas en centrales de relativamente poco caudal. Se instalan al final de la tubería forzada.

Este tipo de válvula consiste en un disco de sección lenticular alojado en un eje excéntrico, que permite o impide el paso del agua. Dada la baja calificación para regular caudales, únicamente funcionan completamente abiertas o completamente cerradas.

La ventaja de este tipo de válvula es su ligereza, su bajo costo, su bajo número de piezas móviles, el escaso mantenimiento que requieren y la ausencia de bolas o cavidades, además es difícil que acumulen sólido en suspensión.

- *Válvula de compuerta*: Se recomienda su uso sobre todo en fluidos limpios y que operen en posiciones extremas, es decir, completamente abiertas o completamente cerradas, de forma que la pérdida de carga sea mínima. Suelen estar equipadas con una válvula de by-pass para facilitar las maniobras y su capacidad de regulación es superior a la de las válvulas mariposa.

- *Válvula esférica*: Estas válvulas tienen una esfera hueca que puede girar sobre sí misma. Permiten un buen cierre pero no regulan muy bien el caudal. Pueden ser rápidas o lentas. Trabajan bien con sólidos en suspensión, suelen tener una válvula by-pass y sus pérdidas son reducidas si está completamente abierta.

- **Turbinas hidráulicas**

La turbina hidráulica es el elemento clave de la minicentral. Aprovecha la energía cinética y potencial que contiene el agua, transformándola en un movimiento de rotación, que transferido mediante un eje al generador produce energía eléctrica. Las turbinas hidráulicas se clasifican en dos grupos: turbinas de acción y turbinas de reacción.

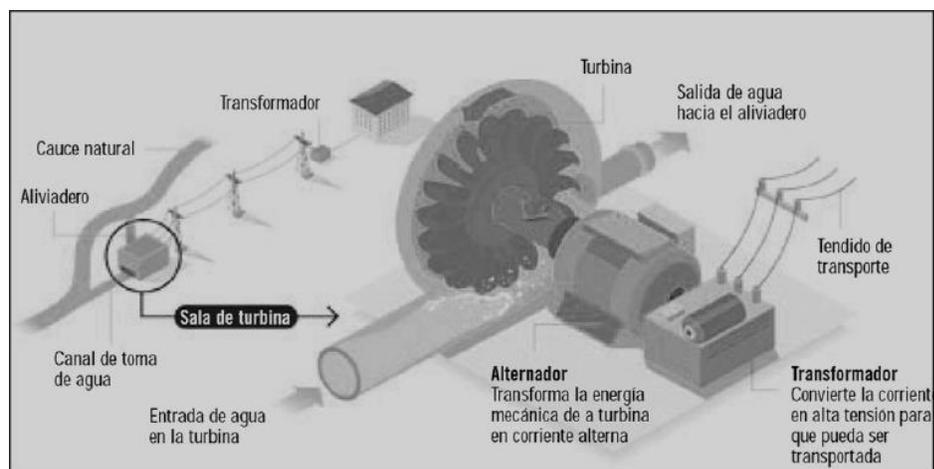


Figura 18. Conversión de la energía hidráulica en eléctrica

Fuente: http://cef.uca.edu.sv/descargables/2011_12_cursoMAGMA/pequenas_centrales_hidroelectricas.pdf (2011)

- **Turbina Pelton**

Es una turbina de acción de flujo tangencial diseñada en 1880 por el norteamericano L. A. Pelton quien modificó y perfeccionó la rueda de cucharas diseñada por el suizo Zuppinger en 1846. Se le conoce también bajo el nombre de turbina de chorro libre o de impulso.

Es una turbina que se emplea en saltos elevados que tienen poco caudal. Esta aprovecha únicamente la velocidad del flujo de agua para hacerla girar. Está formada por un rodete (disco circular) móvil con alabes (cazoletas) de doble cuenco.

El chorro de agua entra en la turbina dirigido y regulado por uno o varios inyectores, incidiendo en los alabes y provocando el movimiento de giro de la turbina.

Estas turbinas tienen una alta disponibilidad y bajo coste de mantenimiento además de que su rendimiento es bastante alto (superior al 90% en condiciones de diseño: presenta una curva de rendimiento bastante plana con un rendimiento superior al 80% para un caudal del 20% del nominal).

Las posibilidades que ofrece este tipo de máquina hacen que sea muy apropiada para operar con carga parcial, además de permitir una amplia variación de caudales en su funcionamiento. Se puede instalar con eje o vertical, y con uno o varios inyectores.

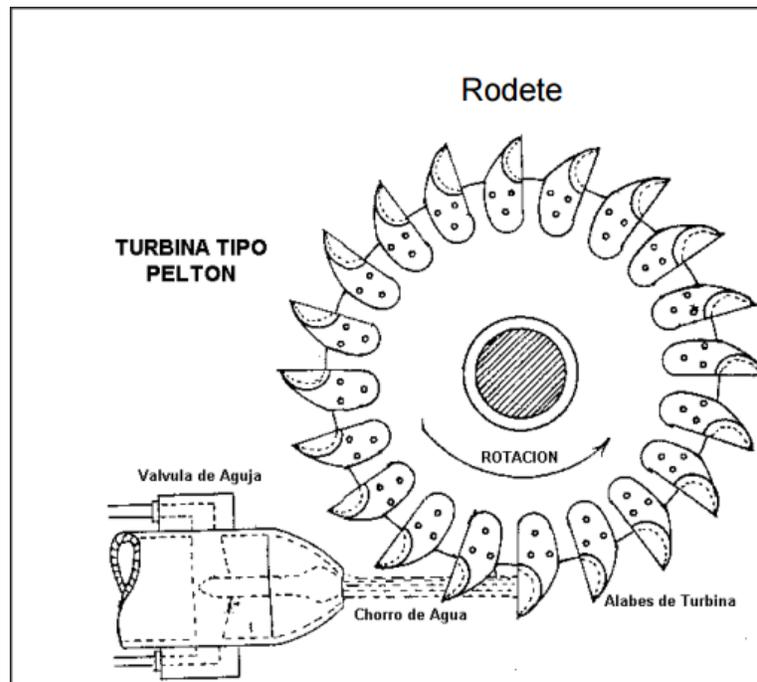


Figura 19. Turbina Pelton

Fuente: http://blanca-sa.wix.com/elena_fran-energia-hidraulica#!__page-6

- Turbina Francis

Es una turbina de reacción de flujo radial diseñada en 1849 por el inglés J.B. Francis el cual perfeccionó la tubería centrípeta patentada en 1838 por S. Dowd. 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 esta 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. Permite variaciones de caudales entre el 40% y el 105% del caudal de diseño, y en salto entre 60% y el 125% del nominal. Los elementos que la conforman son los siguientes:

-*Distribuidor*: Contiene una serie de alabes fijos y móviles que orientan el agua hacia el rodete

-*Rodete*: Formado por una corona de paletas fijas, con una forma tal que cambian la dirección del agua de radial a axial.

$$D3 = \frac{84,5 \Phi \sqrt{Hn}}{n} \quad 2.27$$

Donde:

D3 = Diámetro de descarga del rodete

Hn = Altura neta (m)

Φ = Coeficiente de velocidad periférica

-*Carcasa*: Puede ser abierta o cerrada, y tiene forma espiral para dar una componente radial al flujo de agua.

-*Tubo de aspiración o de salida de agua*: Puede ser recto o acodado, y cumple la función de mantener la diferencia de presiones necesaria.

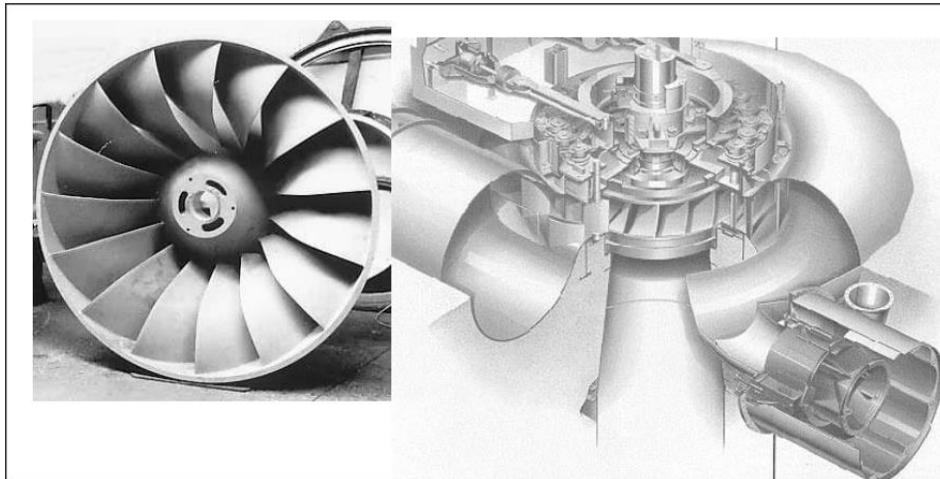


Figura 20. *Turbina Francis*

Fuente: <http://www.leitzaran.net/centrales/hidraulicas.pdf>

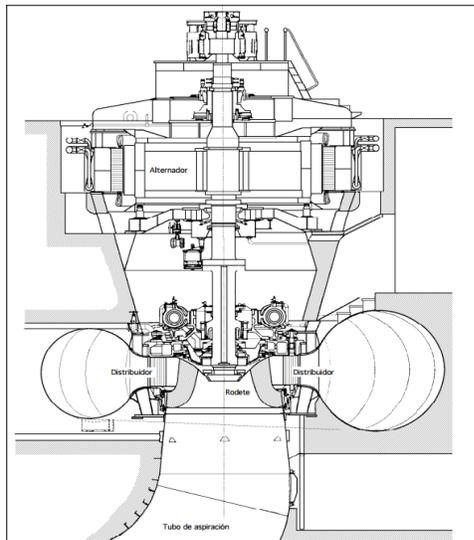


Figura 21. Esquema general del montaje de una turbina Francis

Fuente: <http://ingenieriaetica.blogspot.com/2015/09/turbinas-hidraulicas.html>

- Turbinas Kaplan y semi – Kaplan

La turbina Kaplan, diseñada en 1912 por el Checo V. Kaplan, quien ideó un mecanismo para ajustar el ángulo de ataque de los alabes del rotor de las ya existentes turbinas de hélice, en conjunto con la turbina semi – Kaplan, son de reacción de flujo axial. Las turbinas Kaplan son de admisión radial, mientras que las semi – Kaplan pueden ser de admisión radial o axial

Las turbinas Kaplan son variantes de la hélice con diferentes grados de regulación, poseen el rodete con palas ajustables que les proporciona la posibilidad de funcionar en un rango mayor de caudales. Además incorpora un distribuidor regulable que le da un mayor rango de funcionamiento con mejores rendimientos, a cambio de una mayor complejidad y un coste más elevado.

El rendimiento es de aproximadamente el 90% para el caudal nominal y disminuye a medida que nos alejamos de él. Este tipo de turbinas se emplean generalmente para saltos pequeños y caudales variables o grandes.

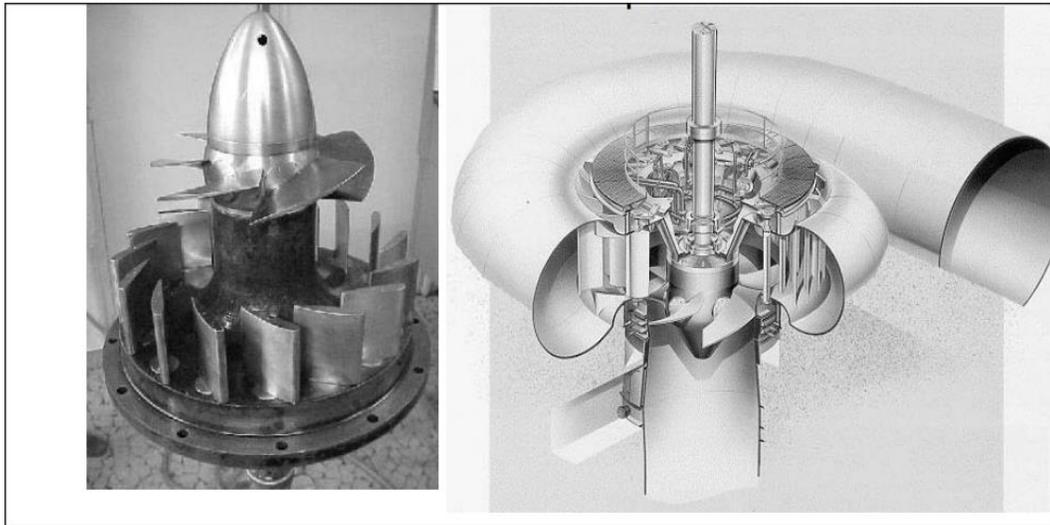


Figura 22. Turbina Kaplan

Fuente: <http://www.leitzaran.net/centrales/hidraulicas.pdf>

Para la selección del tipo de turbina a utilizar, se hace uso de la gráfica Campo de utilización de los diferentes tipos de turbinas, mostrada en la Figura

23

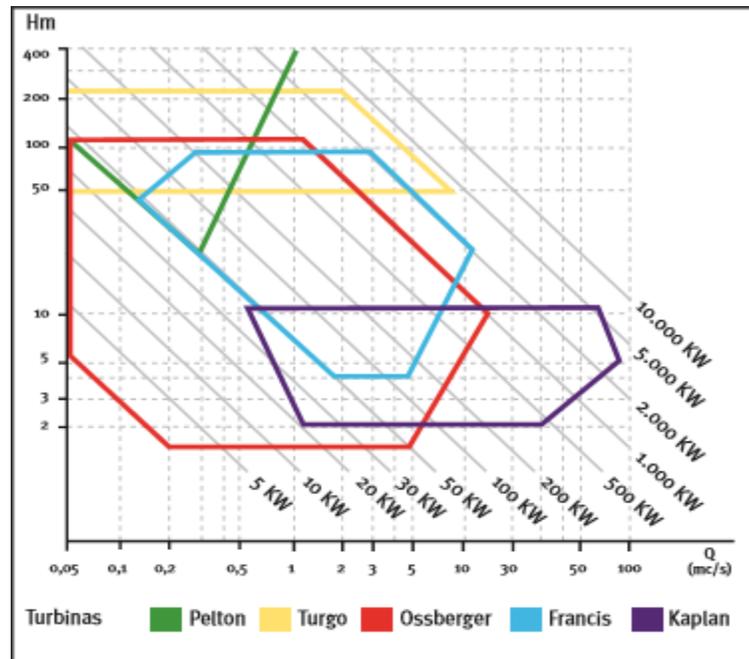


Figura 23. Campo de utilización de los diferentes tipos de turbinas

Fuente: Minicentrales hidroeléctricas (2006)

Velocidad específica, velocidad sincrónica de rotación, coeficiente de velocidad periférica polos y velocidad específica adimensional.

Velocidad específica: La velocidad específica (n_s), es el número de revoluciones que daría una turbina semejante a la que se trata de buscar y que entrega una potencia de un caballo, al ser instalada en un salto de altura unitaria. Esta velocidad específica, rige el estudio comparativo de la velocidad de las turbinas, y es la base para su clasificación. A continuación se muestra en la Figura 24 los límites de velocidad específica para las turbinas axiales y Francis.

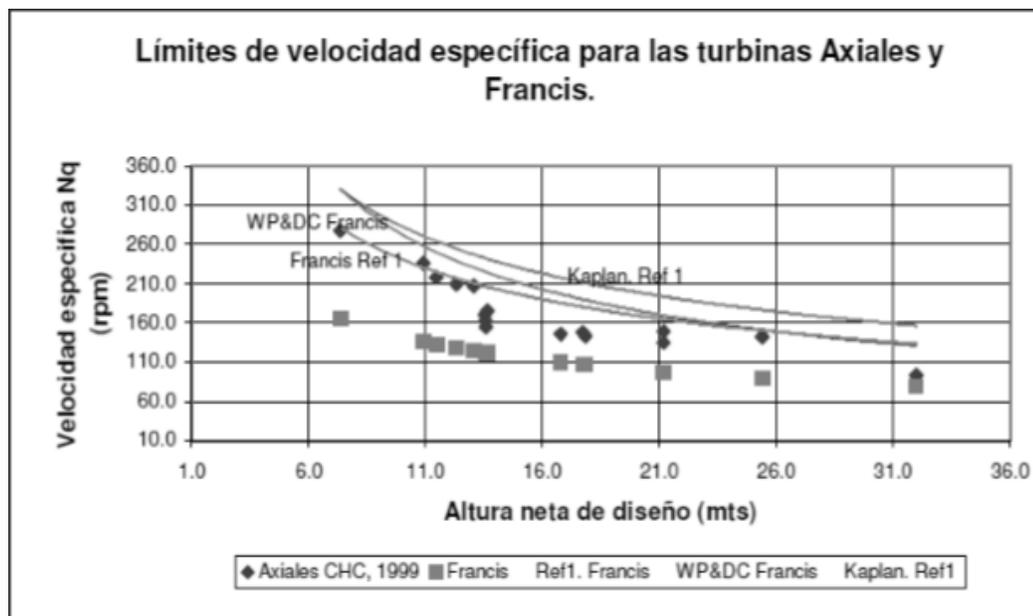


Figura 24. *Altura neta vs velocidad específica.*

Fuente: López. J (1999).

Tabla 5:

Clasificación de la turbina según su velocidad específica

Velocidad específica N_s	Tipo de Turbina
De 5 a 30	Pelton con un inyector
De 30 a 50	Pelton con varios inyectores
De 50 a 100	Francis lenta
De 100 a 200	Francis normal
De 200 a 300	Francis rápida
De 300 a 500	Francis doble gemela rápida o express
Más de 500	Kaplan o hélice

Fuente: Rodríguez y López (2006)

Velocidad sincrónica de rotación: Generalmente las turbinas se emplean para mover generadores eléctricos síncronos, a los que se acoplan rígidamente sobre un mismo eje. La velocidad de giro la determinan condiciones hidráulicas, de acuerdo con la carga y el caudal, pero es preciso hacer el reajuste final teniendo en cuenta ciertas condiciones eléctricas. El generador síncrono es una máquina de corriente alterna excitada por corriente directa, existiendo una relación constante entre la frecuencia de la corriente y la velocidad de giro de la máquina, que da el número de pares de polos del rotor. Esta velocidad puede calcularse mediante la ecuación 2.28.

$$n = \frac{ns \times H \eta^{\frac{5}{4}}}{\sqrt{P_{\text{util}}}} \quad 2.28$$

Donde:

n = Velocidad sincrónica de rotación (rpm)

n_s = Velocidad específica (rpm)

H_{neta} = Altura neta (m)

P_{util} = Potencia de diseño (kW)

La velocidad síncrona ha de ser rigurosamente constante para mantener constante la frecuencia (F) de la intensidad de corriente generada, donde esta velocidad dependerá de número de pares de polos del alternador, mediante la ecuación

$$n = \frac{60 \cdot F}{P} \quad 2.29$$

Donde:

n = Velocidad síncrona de rotación (rpm)

F = Frecuencia (Hz)

P = Polos

Coefficiente de velocidad periférica: Las leyes de similaridad aplicadas a las turbinas hidráulicas muestran que con la misma velocidad específica, la velocidad periférica permanece constante. La velocidad periférica es la relación existente entre la velocidad angular y la velocidad tangencial y viene dada por la siguiente ecuación:

$$\Phi = 0,31 + 2,5 \times 10^{-3} n_s \quad 2.30$$

Donde:

Φ = Coeficiente de velocidad periférica

n_s = Velocidad específica (rpm)

Velocidad específica adimensional: Esta velocidad es adimensional y se utiliza para saber las características de la turbina en cuanto a velocidad. El cálculo se realiza mediante la ecuación 2.31.

$$\Omega_s = \Omega \times \frac{Q^{\frac{1}{2}}}{(g \times Hn)^{\frac{3}{4}}} \quad 2.31$$

- **Generador o Alternador**

Se encarga de convertir la energía mecánica recibida de la turbina a través de un eje, en energía eléctrica. La potencia de los generadores tiene que estar acorde con el de la turbina. Para proyectos de nano y micros centrales generalmente se usan alternadores, que generan electricidad a corriente directa (CD), a 12 ó 24 voltios. En proyectos más grandes, los generadores producen electricidad a corriente alterna (CA) a voltajes mayores.

- **Transformador o Inversor**

Se utiliza para elevar el voltaje de la corriente generada. En muchos casos se puede prescindir del transformador, pero si se debe transportar la corriente a grandes distancias y el generador trabaja a bajo voltaje, es necesario utilizar un banco de transformadores.

Elección del tipo de turbina

La turbina, su geometría y sus dimensiones son factores que vienen condicionados por una serie de aspectos que se mencionan a continuación:

- **Salto Neto:** Según la magnitud del salto que se va a turbinar, se puede establecer que las turbinas Kaplan son adecuadas para operar entre 2 y 20 metros, las Francis entre 10 y 350 metros y las Pelton entre 50 y 1300 metros.
- **Número específico de revoluciones:** Se trata de un parámetro fundamental a la hora de seleccionar la turbina y sus características. Depende del caudal, la velocidad de giro y el salto.
- **Caudal:** Las turbinas Pelton son adecuadas para caudales reducidos, las Francis para intermedios y las Kaplan para caudales elevados.
- **Riesgo de cavitación:** Se produce cavitación si la presión del agua desciende por debajo de la presión de saturación a la temperatura a la que se encuentre. Se crearán burbujas de vapor saturado que posteriormente colapsarán. Dichos colapsos sostenidos en el tiempo son causa de corrosión y daños en la maquinaria, y se producen principalmente a la salida del rodete y en el tubo de aspiración, donde se dan las presiones más bajas. Se deberá calcular la altura máxima a la que se puede instalar la turbina respecto del canal de desagüe para que no se produzca este fenómeno.

Rendimiento de la turbina

El rendimiento de la turbina varía tanto con cambios de caudal como de salto. Al alejarse de las condiciones de trabajo se producen caídas de rendimiento importantes que es necesario cuantificar.

Se define el rendimiento como el cociente entre la potencia que se entrega al alternador y la potencia que el agua es capaz de entregar a la entrada de la turbina. La potencia se pierde sobre todo en la fricción que tiene lugar en la cámara espiral, los álabes directrices, el rodete y el tubo de aspiración.

A continuación, en la Figura 25 se representa el rendimiento frente al caudal de los diferentes tipos de turbina:

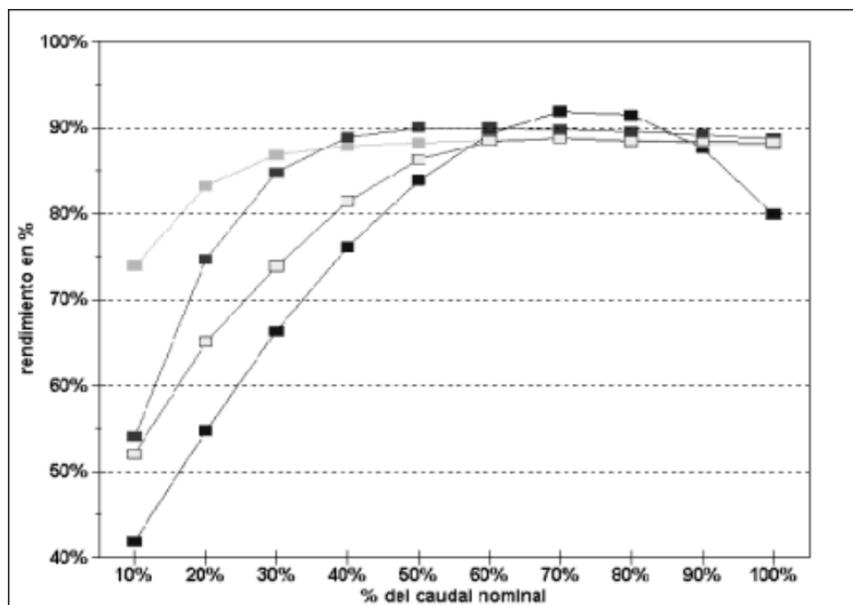


Figura 25. Rendimiento de cada tipo de turbina frente al caudal

Fuente: Ruiz P. (2013)

Criterios para el diseño de una central hidroeléctrica

Previo a la construcción de una central, es necesario evaluar el recurso hídrico para determinar si es apropiado para una explotación hidráulica.

- ***Estudio Hidrológico***

Este estudio es necesario para determinar la potencia que se debe instalar en la central. Los datos se obtienen de estaciones de aforo presentes en la demarcación escogida.

Si se tratase de un río, se necesitarían los regímenes de caudales que transitan en todo el año durante suficientes años hidrológicos para determinar los períodos muy húmedos, húmedos, normales o medios, secos y muy secos, de esta manera con la ayuda de los caudales clasificados, se podrá identificar el caudal que mejor se ajuste al diseño de la central.

Si se desea diseñar un sistema de generación eléctrica a partir de un embalse ya construido, se debe tener el balance hídrico del embalse donde se vean reflejados los aportes que entran a él, y de acuerdo a eso elegir un caudal de diseño que no comprometa los volúmenes del embalse.

- ***Caudal***

Luego de tener el caudal de diseño o caudal de equipamiento, se calcula el caudal nominal de la máquina. Las turbinas operan entre un caudal de equipamiento y mínimo técnico, que se obtiene aplicando un factor al caudal nominal que depende del tipo de turbina que se vaya a instalar.

Tabla 6:

Coefficientes K para los distintos tipos de turbina

Tipo de turbina	Coefficiente K
Pelton	0,10
Kaplan	0,25
Semikaplan	0,40
Francis	0,40

Fuente: Julián P (2008).

El caudal de equipamiento será el que maximice el volumen turbinado, es decir, el que junto con el caudal mínimo técnico encierre un mayor área de la curva de caudales clasificados.

$$Q_{mt} = K * Q_e$$

2.32

- **Salto**

La altura del salto viene determinada por las características de la presa y el lugar donde se quiera instalar la central.

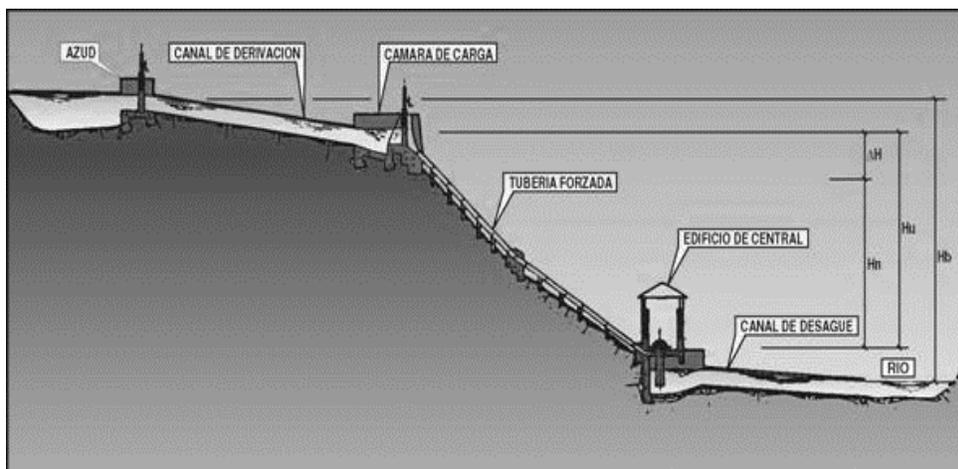


Figura 26. Esquema de un salto de agua

Fuente: Minihidráulica. Juan G.

La Figura 26 muestra los distintos tipos de saltos, que a continuación se definen como:

Salto Bruto (H_b): Diferencia de altura entre la lámina de agua en la toma y el nivel del río en el punto de descarga del agua turbinada

Salto Útil (H_u): Diferencia entre el nivel de la lámina de agua en la cámara de carga y el nivel de desagüe de la turbina

Salto Neto (H_n): Es el resultado de restar al salto útil (H_u) las pérdidas de carga (DH) originadas por el paso del agua a través de la embocadura de la cámara de carga y de la tubería forzada y sus accesorios.

Las pérdidas de carga vienen dada por la sumatoria de las pérdidas primarias y pérdidas secundarias.

Pérdidas primarias: Dos son los factores que juegan un papel determinante en el cálculo de pérdidas de carga primarias: el que la tubería sea lisa o rugosa, y el régimen de flujo.

La rugosidad de la pared de una conducción puede ser uniforme o no uniforme. La rugosidad uniforme se crea artificialmente en investigaciones de laboratorio, sin embargo las paredes de las tuberías comerciales se caracterizan por su rugosidad no uniforme, con gran dispersión de las magnitudes de las protuberancias respecto al valor medio. La rugosidad absoluta k es obtenida mediante la Figura 27

Tubería	K (mm)
Tubos estirado de acero	0.0024
Tubos de cobre	0.0015
Acero comercial y soldado	0.03-0.09
Fundición	0.12-0.6
Hierro forjado	0.03-0.09
Hierro galvanizado	0.06-0.24
Mortero	0.3-3

Figura 27. Tabla valores rugosidad absoluta

Fuente: Ruiz P. (2013)

Pérdidas secundarias: Las pérdidas de carga secundarias o menores, son las que tienen lugar en las irregularidades, singularidades o accidentes de las conducciones: codos, té, válvulas, etc, y son pérdidas de forma provocada por el desprendimiento de la capa límite.

Se considerará que se producirá pérdida de carga secundaria en los siguientes puntos de instalación:

- *Pérdidas en los codos:* En la zona de los codos de tienen altos flujo de Reynolds, y se considera que se van a producir unas pérdidas. Se toma un coeficiente de pérdidas $K = 0,1$, muy común en codos poco pronunciados como los de la instalación del proyecto.
- *Pérdidas en las rejillas:* Las rejillas producen una pérdida de carga al paso del fluido por las mismas, que se puede obtener mediante la expresión de Kirschmer:

$$h_r = \beta \cdot \left(\frac{s}{m}\right)^{4/3} \cdot \frac{V^2}{2g} \sin(\alpha) = K \cdot \frac{V^2}{2g} \quad 2.33$$

Donde:

h_r = Pérdida de carga (m.c.a)

s = Espesor de los barros (m)

m = La distancia entre los mismos (m)

V = La velocidad de llegada del fluido (m/s)

α = Inclinación de los barros con respecto de la horizontal

β = Coeficiente que depende de la forma de los barros

- *Pérdidas por bifurcación:* La pérdida de energía en una bifurcación de conductos depende, además del ángulo que forman la tubería secundaria con la maestra, de los diámetros de ambas tuberías y de la dirección de la corriente. Dicha pérdida es mayor en la unión que en la bifurcación y se expresa como un porcentaje de la carga de velocidad, lo que demuestra que el coeficiente K es independiente del número de Reynolds.

La pérdida de energía consta de dos sumandos, uno por creación de velocidad

$$\frac{V_1^2 - V_2^2}{2 \cdot g} \quad 2.34$$

Y otro referente a la contracción que depende de la forma de la bifurcación

$$K = \frac{V_1^2}{2 \cdot g} \quad 2.35$$

Relativo al caudal Q_a que se desvía, variando los valores de K entre 0,30 y 0,88 en función de caudal desviado, del ángulo de la bifurcación y el diámetro de esta.

Tabla 7:

Coefficientes de pérdida dependiendo de relación caudales y relación diámetro

	Qa/Q = 0,3			Qa/Q = 0,5			Qa / Q = 0,7		
σ	90 °	60 °	45 °	90 °	60 °	45 °	90 °	60 °	45 °
Da/D	1	0,61	0,58	1	0,79	0,75	1	1	1
K	0,72	0,59	0,35	0,75	0,54	0,32	0,88	0,52	0,3

Para la rama que sigue la misma dirección $K = 0,1$

La pérdida total será:

$$h_b = K \cdot \frac{V_1^2}{2 \cdot g} + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2 \cdot g} \quad 2.36$$

Por cada rama de la bifurcación.

Mediante ensayos en modelos reducidos se puede llegar a obtener el valor de K, que en casos difíciles como es el de bifurcaciones en ángulo recto K se sitúa en el orden de 0,75.

- **Potencia Disponible**

La potencia eléctrica es la relación de paso de energía de un flujo por unidad de tiempo; es decir, la cantidad de energía entregada o absorbida por un elemento en un tiempo determinado. Se determina mediante la siguiente ecuación:

$$Pd = 9,8 \times Qd \times H \times e \quad 2.37$$

Donde:

Pd= Potencia disponible (kW)

Qd= Caudal de diseño (m³/s)

e = Eficiencia

H= Altura del salto o caída aprovechable (m)

MARCO LEGAL

La presente investigación 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 36 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: 371 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 38 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°5.833viernes 22 de diciembre de 2006) en sus artículos: 39

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 40 programas ambientales, establecidos por el ministerio con competencia en materia de ambiente.

CAPITULO III

MARCO METODOLÓGICO

Todo estudio requiere de un sustento metodológico que permita definir estrategias de acuerdo a los objetivos propuestos, es por esto, que en este capítulo se explica de manera detallada la metodología empleada en este trabajo de investigación, describiendo a detalle el universo o población estudiada, la muestra tomada, los métodos, técnicas y procedimientos utilizados para dar respuesta a las interrogantes objeto de la investigación.

Consideraciones Generales

Hernández, Fernández y Baptista (2010), definen la investigación como: "... un conjunto de procesos sistemáticos, críticos y empíricos que se aplican al estudio de un fenómeno." (p. 4). Por su parte, Daniel Behar (2008), afirma que: "La investigación nos ayuda a mejorar el estudio, porque nos permite establecer contacto con la realidad a fin de que la conozcamos mejor". (p.14). Para Cervo y Bervian (1989), la investigación es "...una actividad encaminada a la solución de problemas. Su objetivo consiste en hallar respuestas a preguntas mediante el empleo de procesos científicos". (p.41).

Evidentemente, en cada una de las definiciones dadas por estos autores, se manifiesta el método científico, el cual permite cumplir con los objetivos en un trabajo investigativo en función de la solución de un problema, mediante la recolección de datos, de la aplicación de criterios y conocimientos previos.

Tipo de investigación

Clasificar la investigación es importante. Del tipo de estudio dependerá la estrategia de investigación. El diseño, los datos que se recolectan y la manera de obtenerlos, son distintos de acuerdo al tipo de estudio en el que se está enmarcado.

Entre otros autores consultados para este trabajo de investigación, Arias (2006) expresa que “La investigación descriptiva consiste en la caracterización de un hecho, fenómeno, individuo o grupo, con el fin de establecer su estructura o comportamiento”. (p.24), por lo que este trabajo, se considera de naturaleza descriptiva, ya que permite indagar, estudiar, describir y analizar el comportamiento a través del tiempo de las variables hidroenergéticas del embalse en estudio, mediante la recolección de datos como: caudal de aporte, caudal de salida, elevación del agua, área y volumen.

Diseño de la Investigación

Arias (2006) establece que “El diseño de investigación es la estrategia general que adopta el investigador para responder al problema planteado. En atención al diseño, la investigación se clasifica en: documental, de campo y experimental”. (p.26).

Por otro lado, Hernández et al. (2010), establecen que el diseño de investigación no experimental (documental, de campo y mixta) es aquel que

se realiza sin manipular intencionalmente las variables, realizando una observación de los fenómenos tal como se dan en su contexto natural, para posteriormente analizarlos.

La investigación de campo según Hernández et al (2010) "... se apoya en informaciones que provienen entre otras, de entrevistas, cuestionarios, encuestas y observaciones" (p.21). Por otro lado, Arias (2006) expresa que "La investigación documental es un proceso basado en la búsqueda, recuperación, análisis, crítica e interpretación de datos secundarios, es decir los obtenidos y registrados por otros investigadores en fuentes documentales: impresas, audiovisuales o electrónicas". (p.27). Estas definiciones se adaptan perfectamente al estudio realizado, pues fueron revisados trabajos de investigación similares a este, por lo que se considera del tipo documental, asimismo, esta investigación se considera de campo, ya que los datos correspondientes al balance hídrico del embalse Pao La Balsa, fueron recogidos directamente de la realidad, realizando un posterior análisis sistemático con el propósito de describirlos, interpretarlos y entender su naturaleza.

En resumidas cuentas, esta investigación es no experimental, ya que las variables hidroenergéticas del embalse no se someten al control ni intervención, sino a su diagnóstico y evaluación. Es además del tipo mixta, ya que se conjuga la investigación de campo y la documental; como bien expresa Hernández et al. (2010), estas son compatibles y pueden desarrollarse en conjunto.

Dentro de este tipo de diseño, se utilizó el diseño transeccional transversal descriptivo, el cual se caracteriza por la recolecta de datos en un solo momento. Este tipo presenta un panorama del estado de una o más variables en determinado momento.

Población y Muestra

Behar (2008) afirma:

La muestra es, en esencia, un subgrupo de la población. Se puede decir que es un subconjunto de elementos que pertenecen a ese conjunto definido en sus necesidades al que llamamos población. De la población es conveniente extraer muestras representativas del universo. Se debe definir en el plan y, justificar, los universos en estudio, el tamaño de la muestra, el método a utilizar y el proceso de selección de las unidades de análisis. En realidad, pocas veces es posible medir a la población por lo que obtendremos o seleccionaremos y, desde luego, esperamos que este subgrupo sea un reflejo fiel de la población.

Por otra parte Arias (2006) expresa que “La población o universo se refiere al conjunto para el cual serán válidas las conclusiones que se obtengan, a los elementos o unidades a los que se refiere la investigación” y “la muestra es un subconjunto de la población”. Por tratarse del diseño de una central de generación hidroeléctrica, estos dos aspectos se conjugan en uno solo, es decir, la población y la muestra se definen como una sola unidad.

Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Behar (2008) expresa: “La investigación no tiene sentido sin las técnicas de recolección de datos. Estas técnicas conducen a la verificación del problema planteado. Cada tipo de investigación determinará las técnicas a utilizar y cada técnica establece sus herramientas, instrumentos o medios que serán empleados”. En base a esta definición, para este trabajo de investigación se utilizó como técnica de recolección de datos, la observación, mediante la tabulación de los datos diarios tomados en el embalse en estudio.

Técnicas de procesamiento y análisis de datos

El análisis de los datos recopilados para este trabajo de investigación es del tipo cuantitativo; estos se expresan en forma numérica, y se encuentran registrados en hojas de cálculo de Excel (Elaboración propia), generando resultados a través de tablas y gráficos.

Fases metodológicas

- Fase metodológica 1: *Revisión documental*

Se realizó una revisión documental exhaustiva de una serie de investigaciones relacionadas con el tema en estudio, a manera de guía, con el fin de proporcionar a los investigadores conocimientos tanto técnicos como operativos, y además, criterio al momento de desarrollar los objetivos planteados en este trabajo especial de grado.

- Fase metodológica 2: *Selección de variables de estudio*

Una vez recibido el balance hídrico del embalse Pao La Balsa, Estado Cojedes, proporcionado por la compañía HIDROCENTRO C.A, se evalúan minuciosamente las variables que serán parte del estudio hidroenergético.

Las variables seleccionadas para ser parte del estudio son: elevación volumen, área, caudal de entrada, caudal de salida, caudal de alivio, caudal ecológico y caudal bombeo (Caudal de extracción),

- Fase metodológica 3: *Análisis estadístico descriptivo de las variables seleccionadas*

Las variables seleccionadas en la segunda fase, se le es aplicado un análisis estadístico descriptivo, donde se obtienen medidas de tendencia central (media, mediana y moda), medidas de dispersión (desviación típica, rango, coeficiente de variación) y medidas de forma (sesgo, curtosis), parámetros estadísticos que describen la distribución de cada una de las variables hidroenergéticas del embalse en estudio. Asimismo, se describe para cada una de ellas, la serie de tiempo que representa su comportamiento a lo largo de la serie de 10 años.

- Fase metodológica 4: *Diseño de la central hidroeléctrica*

En esta fase se desarrolla detalladamente, el procedimiento requerido para el diseño de la central hidroeléctrica en conjunto con las obras civiles que la conforman (obras de bocatoma, obras de conducción y sala de máquinas), considerando las variables hidroenergéticas de dicho embalse. Se determina la potencia hidráulica a generar, mediante el uso de ecuaciones de pérdidas y se propone la turbina que mejor se adapte a los requerimientos exigidos.

-Fase metodológica 5: *Análisis de factibilidad de la central hidroeléctrica*

En esta fase se evalúa la factibilidad de implementar una central hidroeléctrica a pequeña escala en el embalse Pao La Balsa, Estado Cojedes. Se evalúan los costos involucrados en la construcción de la misma.

- Fase metodológica 6: *Análisis de resultados y Conclusiones*

De acuerdo a los resultados obtenidos para cada uno de los objetivos planteados en esta investigación, se realiza un análisis detallado y posteriormente se dan conclusiones en base a ello.

Descripción de la metodología

Análisis de las variables hidroenergéticas

Con la finalidad de conocer el comportamiento histórico de las variables hidroenergéticas del embalse y poder detectar tendencias, se procede al cálculo de distintos parámetros estadísticos representativos de cada una de ellas, partiendo de una serie histórica de 10 años (Enero 2005 - Abril 2015), análisis que incluye medidas de tendencia central, medidas de variabilidad, medidas de forma, entre otros.

Para llevar a cabo el análisis estadístico de las variables en estudio, se hace uso de un software estadístico.

A continuación se describe paso a paso el procesamiento de los datos en el programa.

Inicio del programa

- 1) Se inicia el programa y en la ventana de bienvenida se selecciona "Introducir nuevos datos o importarlos de una fuente externa" tal como se muestra en la Figura 28. Posteriormente emerge otra ventana donde se debe seleccionar la fuente de la cual provienen los datos, ya sea de una base de datos existente, una fuente de datos asociada con un statfolio, etc. y se escoge la opción que convenga. En este caso, como

los datos están contenidos en excel, se elige la opción “Introducir nuevos datos o importarlos de una fuente externa”.

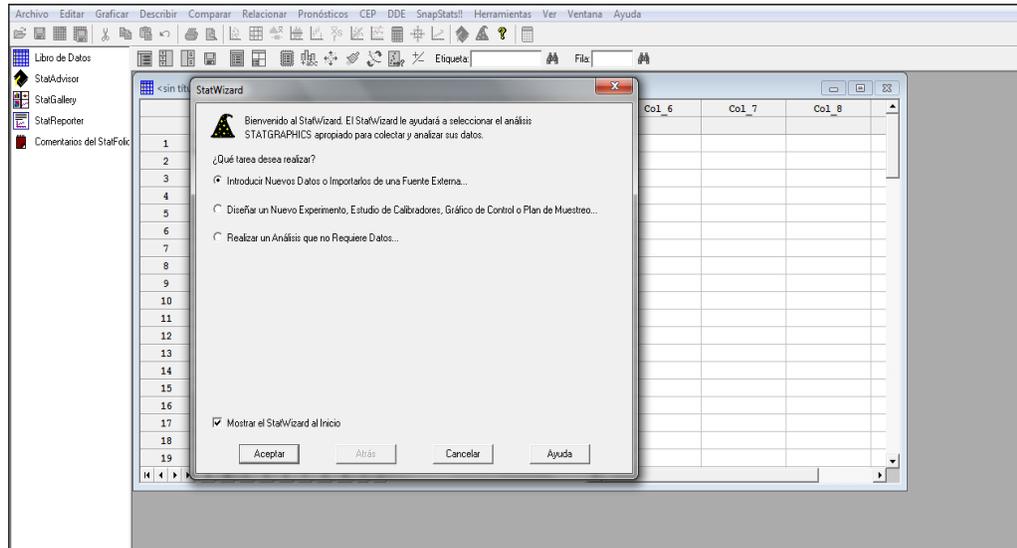


Figura 28. StatWizard

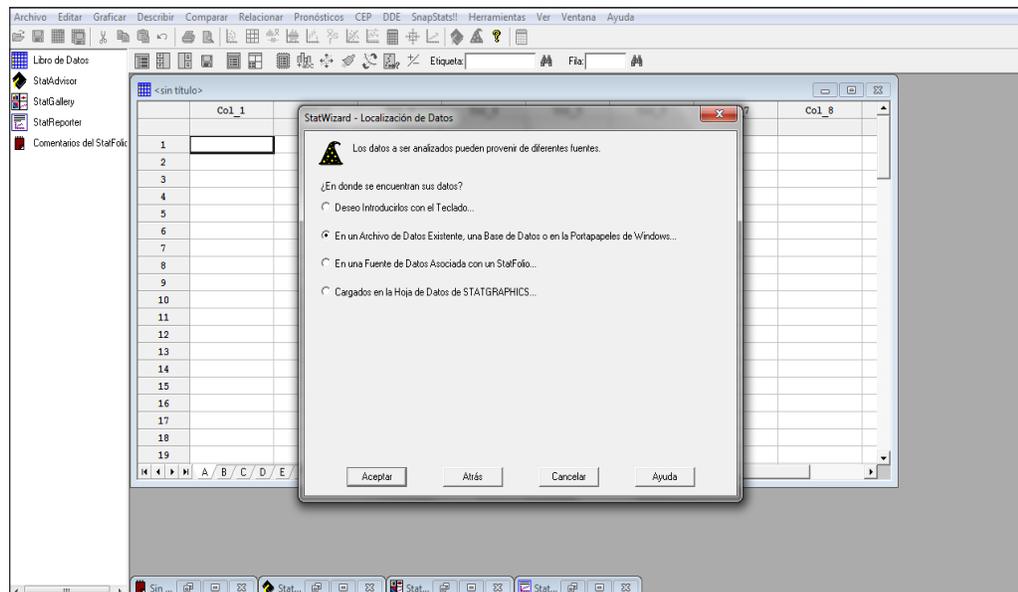


Figura 29. Localización de datos

- 2) Seguidamente, aparece una nueva ventana de nombre “Propiedades del libro de datos”, donde se selecciona la opción “Archivo de datos externos”. Luego de aceptar, se elige el archivo de Excel donde se encuentra la información y se despliega un libro de datos en el cual se muestran los 3764 datos, tal como se observa en la Figura 30.

	CAUDAL DE ALIVIO	CAUDAL ECOLOGICO	CAUDAL BOMBO	NIVEL	VOLUMEN	AREA	CAUDAL DE ENTRADA	CAUDAL DE SALIDA
3747	0	0,013062846	0,24624	127,83	211,5	3560	0,097197886	0,363197886
3748	0	0,013054591	0,24624	127,81	210,8	3553	0,063231843	0,329231843
3749	0	0,013046331	0,24624	127,79	210,2	3546	0,124262451	0,352262451
3750	0	0,013038066	0,24624	127,77	209,5	3539	0,078674136	0,344674136
3751	0	0,013029796	0,24624	127,75	208,9	3532	0,105491244	0,333491244
3752	0	0,013021521	0,24624	127,73	208,1	3525	0,059206721	0,363206721
3753	0	0,013009097	0,24624	127,7	207,1	3514	0,059206721	0,370080657
3754	0	0,012996662	0,24624	127,67	206,1	3504	0,059206721	0,360432182
3755	0	0,012984215	0,24624	127,64	205,1	3493	0,00265468	0,373773657
3756	0	0,012967601	0,24624	127,6	203,7	3479	0,00265468	0,354789647
3757	0	0,012959286	0,24624	127,58	203,1	3472	0,157989782	0,385899782
3758	0	0,012950965	0,24624	127,56	202,4	3465	0,077854775	0,343854775
3759	0	0,012942639	0,24624	127,54	201,7	3458	0,079515067	0,345515067
3760	0	0,012934308	0,24624	127,52	201,1	3452	0,125358676	0,353358676
3761	0	0,012921801	0,24624	127,49	200,1	3441	0,06799416	0,287405529
3762	0	0,012913456	0,24624	127,47	199,4	3434	0,080583096	0,346583096
3763	0	0,012896751	0,24624	127,43	198,4	3420	0,080583096	0,360375591

Figura 30. Libro de datos

Análisis estadístico

- 1) Luego de desplegar el libro de datos, se inicia con el análisis estadístico para cada una de las variables en estudio. En la barra de herramientas se selecciona la pestaña que tiene por nombre “Describir”. Se muestran varias opciones, se selecciona “datos numéricos” y luego “análisis de una variable”. Posteriormente, aparece una ventana que muestra todas las variables, se selecciona la que se desea estudiar y se presiona aceptar, tal como lo muestra la Figura 31.

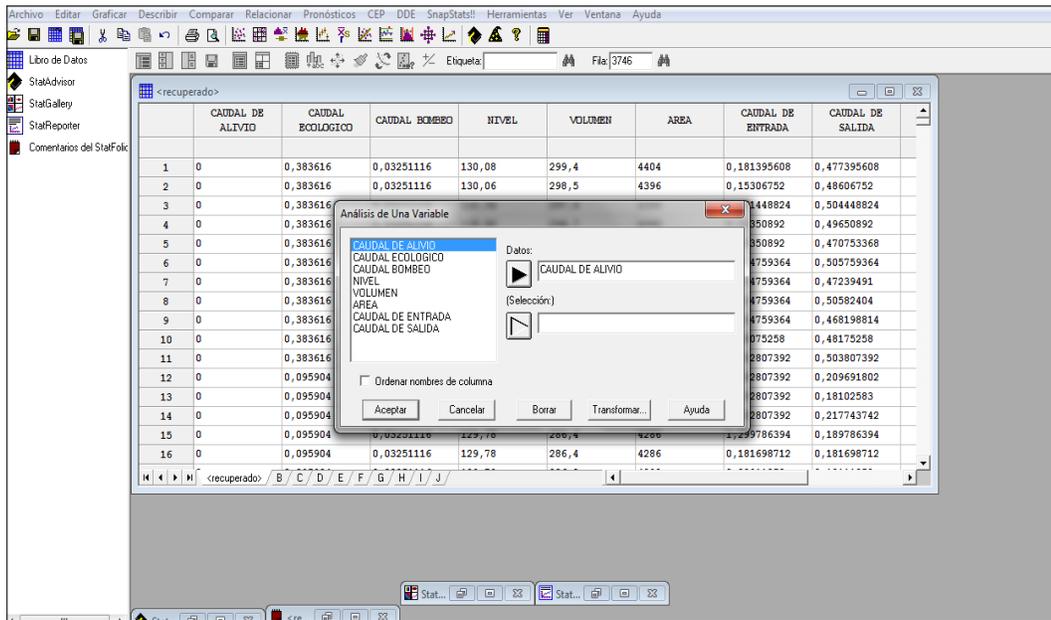


Figura 31. Análisis de una variable

- 2) Luego de seleccionar la variable que se desea estudiar, se despliega un resumen estadístico y varios gráficos representativos en la estadística descriptiva, tal como se muestra en la Figura 32

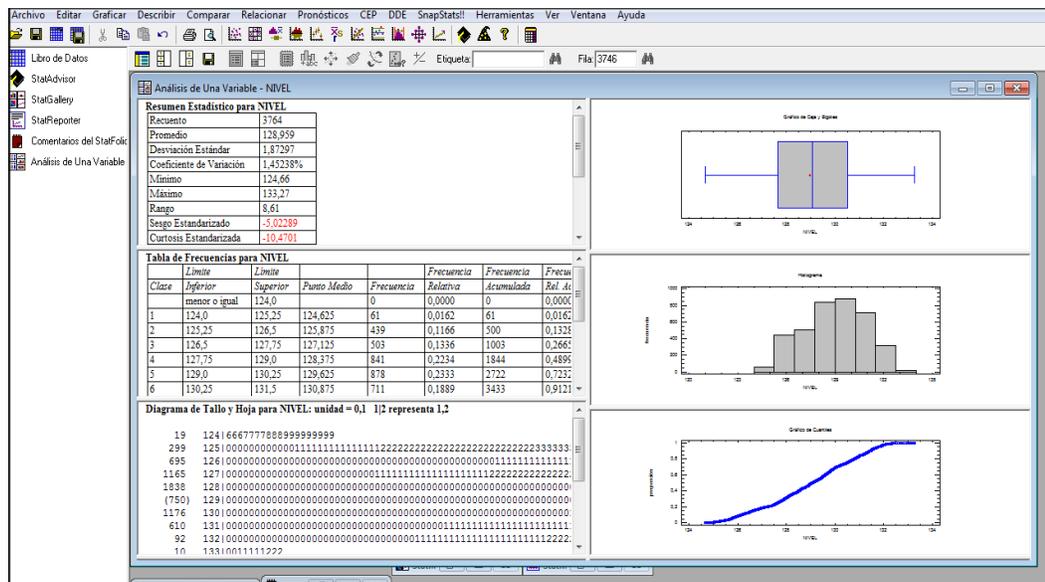


Figura 32. Resumen estadístico

- 3) El programa inicialmente muestra por defecto tres gráficas y tres Tablas. Para obtener cualquier otra, se ubica en la primera fila de la barra de herramientas, en la esquina superior izquierda, dos opciones; dando click en Variable - cualquiera, se obtiene el resto de los gráficos y Tablas del programa estadístico.

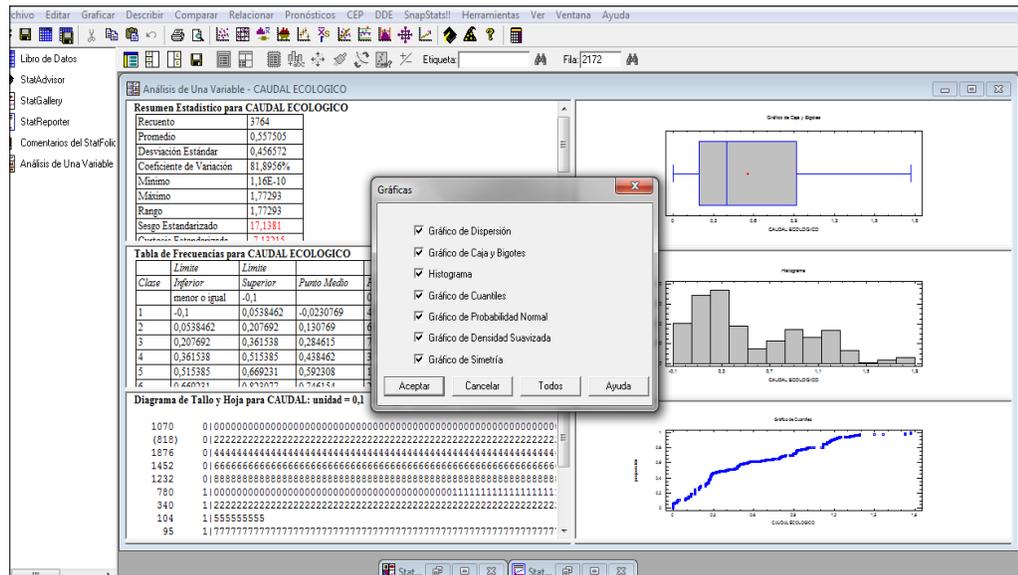


Figura 33. Ventana de gráficas

Análisis de series de tiempo

- 1) Si se desea estudiar la serie de tiempo de cada una de las variables, para detectar si existe o no tendencia, ciclicidad, estacionalidad y componente irregular en la misma, se procede de la siguiente manera tal como se aprecia en la Figura 34

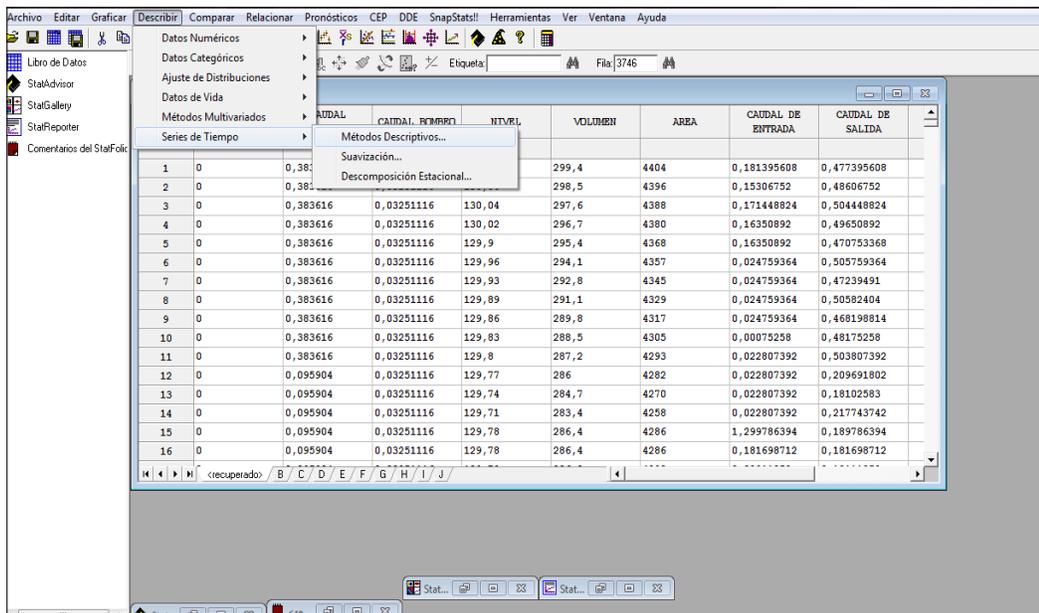


Figura 34. Series de tiempo. Método descriptivo

- 2) Se selecciona el método descriptivo para generar las series de tiempo, iniciando el 01/05/05 con un intervalo de muestreo uno cada uno, ya que se cuenta con un registro diario de datos. A continuación en la Figura 35, se visualiza lo descrito anteriormente.

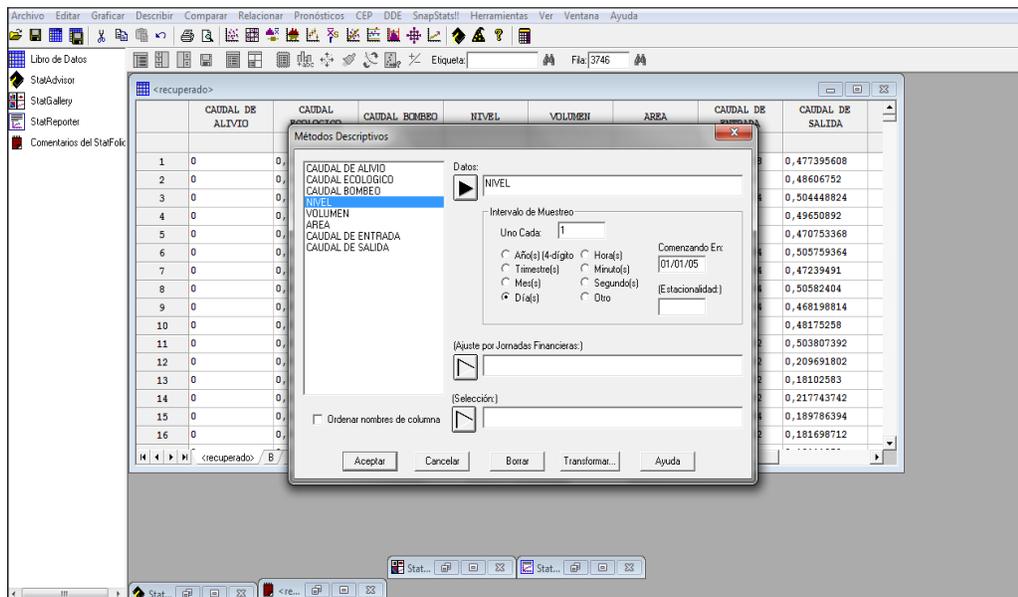


Figura 35. Series de tiempo. Método descriptivo

- Luego de introducir los datos necesarios para describir la serie de la variable seleccionada, se da click en “Aceptar” y rápidamente se muestra el gráfico de serie de tiempo y las autocorrelaciones estimadas para la variable. La Figura 36 muestra de que manera se presentan los resultados del análisis.

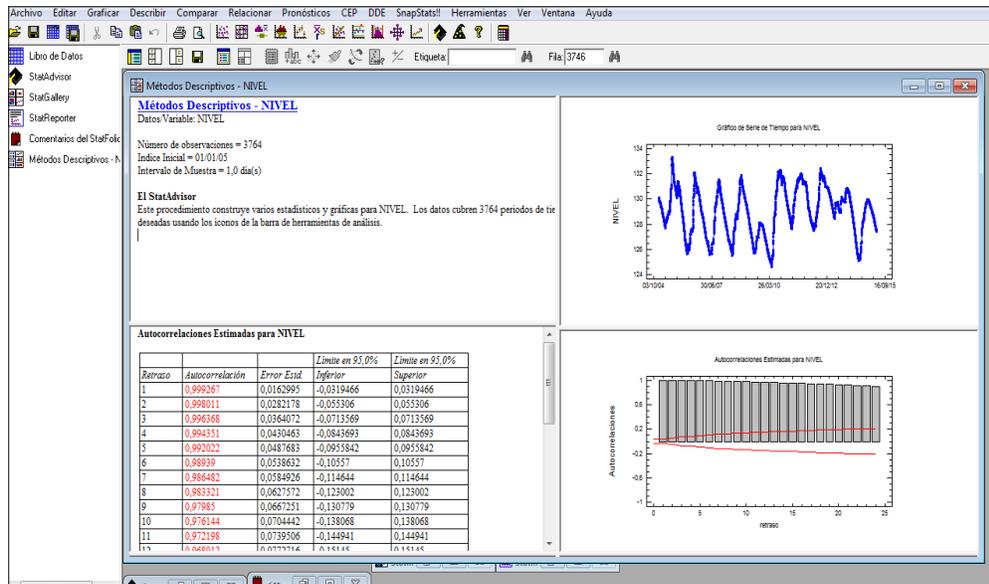


Figura 36. Métodos descriptivos. Series de tiempo

Pronósticos

- Para hallar la carga de agua que se ha de utilizar en el diseño del sistema de generación hidroeléctrica para las dos alternativas que se plantean en este trabajo de investigación, además de evaluar los parámetros estadísticos, se genera una serie de pronósticos para tener idea del posible valor que tomará la variable elevación, a futuro, con límites de confianza del 95%. La Figura 37 muestra la ubicación de la pestaña que corresponde al pronóstico.

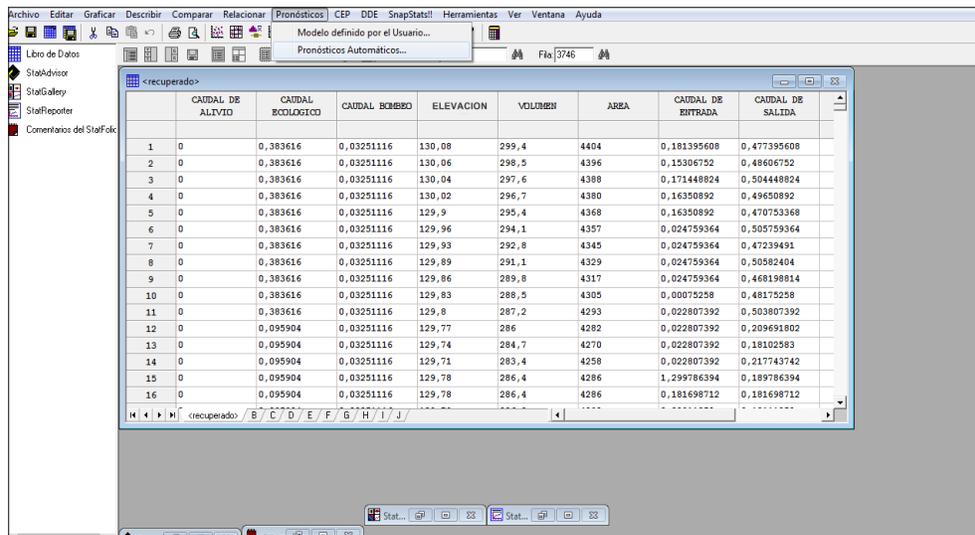


Figura 37. Pronósticos automáticos I

- 2) Se selecciona de acuerdo a la Figura 37, la pestaña “pronósticos automáticos”. Seguidamente, aparece una ventana donde se selecciona la variable a estudiar. El procedimiento es el mismo que se ejecuta para generar las series de tiempo, con la diferencia de que debe indicarse cuantos pronósticos se desea obtener de la variable.

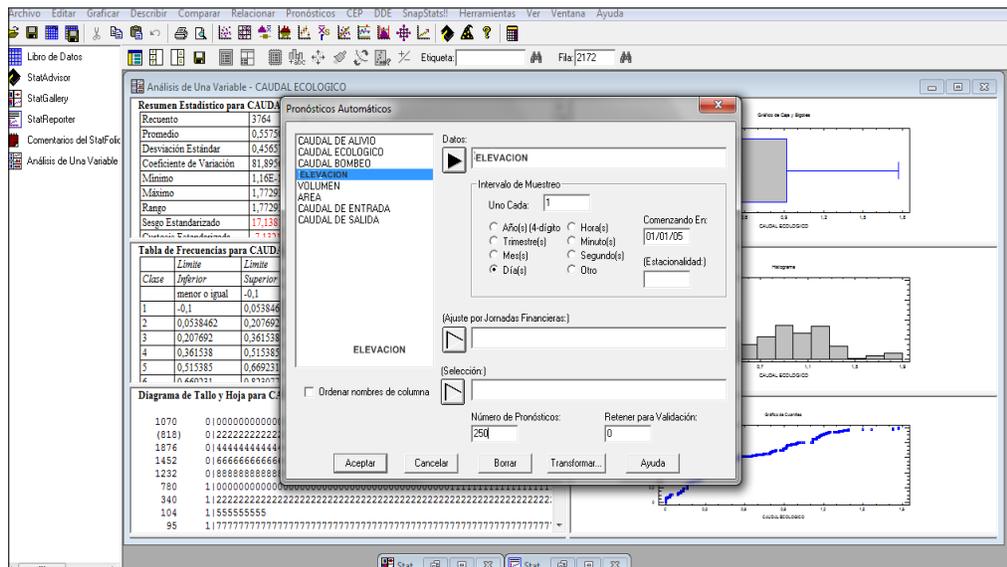


Figura 38. Pronósticos automáticos II

- 3) En este estudio se decidió generar un número de pronósticos igual a 250 tal como lo muestra la Figura 38. El proceso inicia el 22 de abril de 2015, donde termina la data recolectada, generando pronósticos hasta el 28 de diciembre de 2015. A continuación, se muestra en la Figura 39 la gráfica de pronósticos y las autocorrelaciones de residuos para la variable.

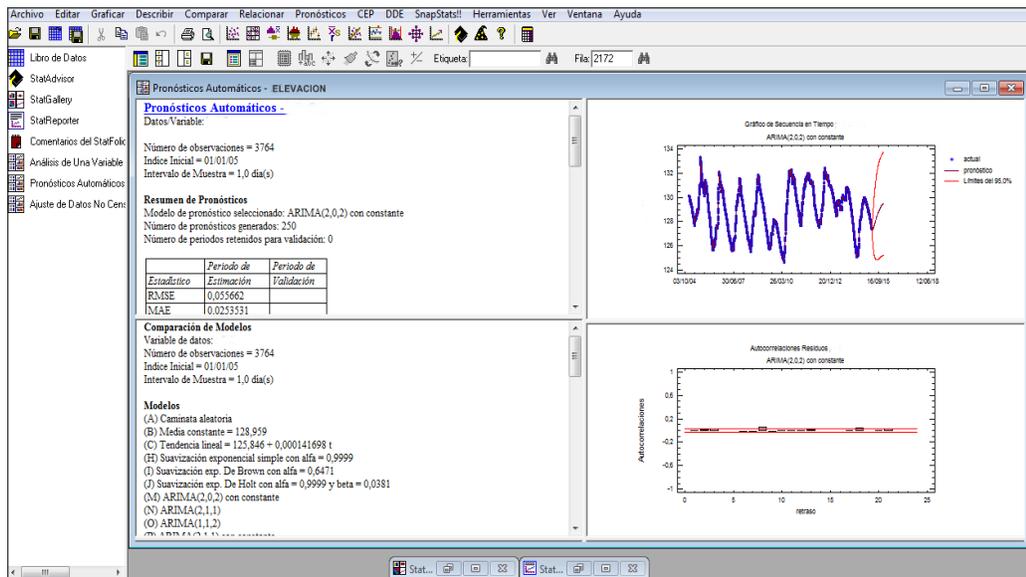


Figura 39. Pronósticos y autocorrelaciones

Ajuste de distribuciones

Para determinar a que distribución se ajusta cada variable hidroenergética del embalse, se procede de la siguiente manera:

- 1) En la barra de herramientas se selecciona la pestaña que tiene por nombre “Describir” y luego se da click en “Ajuste de distribuciones”. Inmediatamente se despliega una serie de opciones para el ajuste y se escoge “Ajuste de Datos No Censurados”. Este procedimiento se aprecia en la Figura 40.

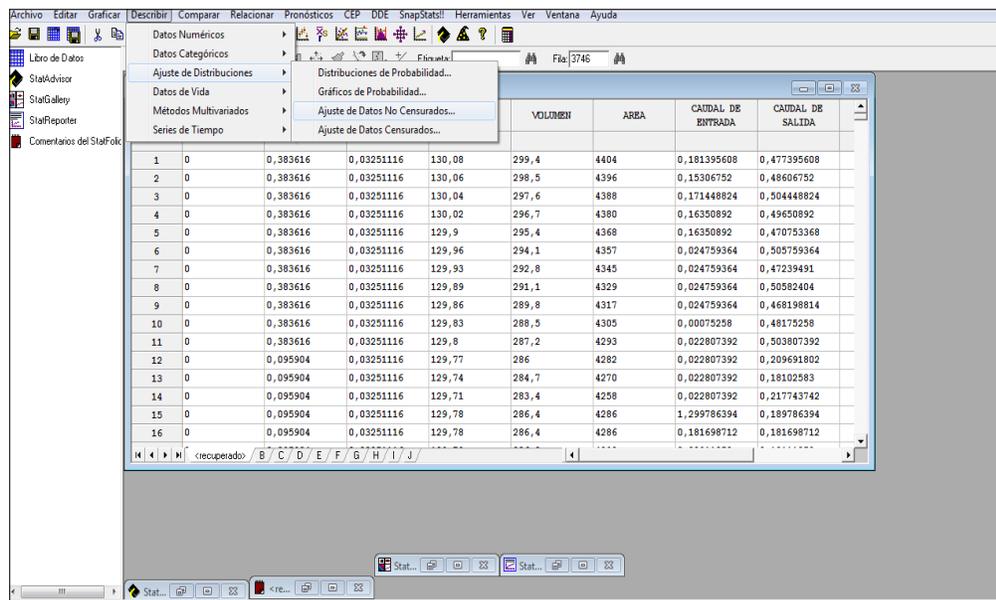


Figura 40. Ajuste de distribuciones

- 2) Luego de seleccionar “Ajustes de Datos No Censurados”, aparece una ventana de opciones de ajuste de distribuciones, donde se escoge a que distribución se desea ajustar la variable. En este caso, se escogieron solo cuatro distribuciones (Normal, Weibull, Valor Extremo Más Pequeño y Laplace) para realizar las comparaciones

respectivas entre ellas, para luego escoger la que se adapte mejor a los datos. Se muestra un ejemplo en la Figura 41.

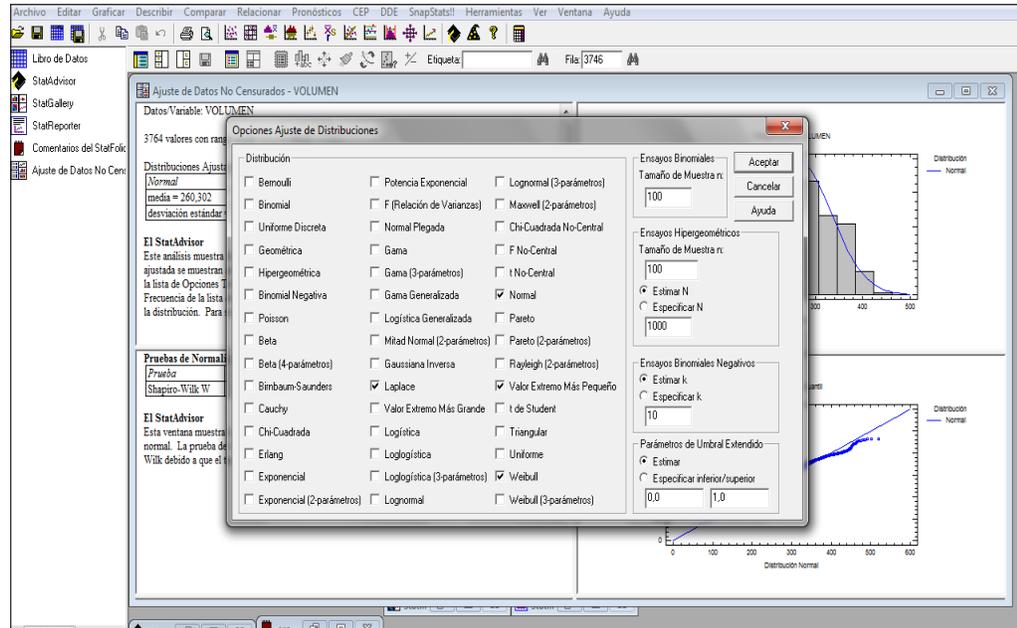


Figura 41. Opciones de ajuste de distribución

3) Luego de seleccionar las distribuciones para el ajuste de la variable, se despliegan dos gráficas y tres Tablas por defecto. La primera gráfica es la utilizada para este estudio, que lleva por nombre “Histograma de Nivel”. Allí se superponen todas las distribuciones seleccionadas, tal como se muestra en la Figura 42.

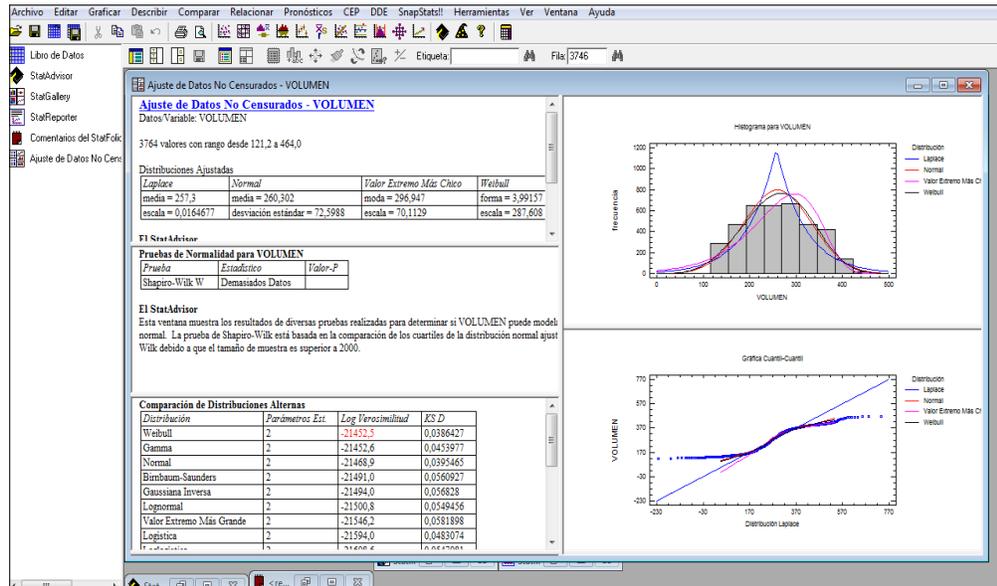


Figura 42. Opciones de ajuste de distribución

- 4) En base a la información contenida en la Tabla “Comparación de Distribuciones Alternas” (ver Figura 42), se muestran todas las distribuciones ajustadas a la variable. Esta Tabla compara la bondad de ajuste cuando varias distribuciones se ajustan a la variable en estudio. La distribución que mejor se ajuste será aquella que presente un estadístico log verosimilitud destacado en color rojo en el programa utilizado.

Diseño de la pequeña central hidroeléctrica

A continuación se describe paso a paso la metodología empleada para el diseño del conjunto de obras civiles que conforman parte del sistema de generación hidroeléctrica para cada una de las alternativas planteadas en este trabajo de investigación, iniciando desde el punto de captación hasta la restitución del agua al río Pao. Asimismo se señalan los criterios utilizados para la selección de la turbina de la central.

Alternativa I

Esta alternativa parte desde el estribo izquierdo del embalse. Las obras civiles que conforman esta alternativa son las siguientes:

- Túnel de conducción
- Cámara de carga
- Tubería Forzada
- Turbina
- Casa de máquinas
- Túnel de desagüe

Determinación de la potencia disponible

1. En primer lugar se determina el salto neto. El salto neto viene dado por la altura útil menos las pérdidas totales que se presentan en la tubería, las cuales se dan por rugosidad y por accesorios.
2. La altura útil se obtiene mediante el trazado en el plano de las obras de conducción del sistema, ubicando de esta manera cada obra, donde resulte más conveniente según la configuración del terreno. Se parte

desde la obra de toma hasta llegar a la disposición final del agua turbinada, buscando que esta última descargue por encima del nivel del río. Adicionalmente se busca obtener la menor pendiente en la conducción para así evitar en la medida de lo posible las pérdidas de carga.

3. Ya que la central se clasifica en central hidroeléctrica de regulación por derivación de las aguas, con el caudal de diseño, la altura útil, y la eficiencia se obtiene la potencia disponible o aprovechable del sitio de estudio.

Diseño de túnel de conducción y túnel de desagüe

1. Se propone el concreto como material de construcción del túnel, el cual posee una rugosidad de 0.012. La pendiente y longitud del túnel vienen dados por la configuración del terreno, ajustándolos a los niveles del terreno.
2. Para la determinación del diámetro de diseño se impone un diámetro comercial, el cual debe ser mayor a la profundidad normal (yo) del agua en el túnel, de no ser así, se aumenta el diámetro hasta que cumpla con lo antes establecido.

La obtención de yo se realiza por medio de la gráfica de “profundidad crítica y profundidad normal de secciones circulares”, y haciendo uso del caudal de diseño, de la rugosidad, pendiente longitudinal y el diámetro de tanteo. Se lee la relación yo/d y de allí se despeja yo.

3. Se procede al cálculo de los elementos geométricos del túnel tales como: espejo de agua, área, perímetro, radio hidráulico, y profundidad hidráulica. Para el cálculo del área, perímetro y radio hidráulico se necesita el valor del ángulo θ , el cual se obtiene con las ecuaciones de

trigonometría de los elementos geométricos haciendo uso de altura del triángulo, yo, y D.

4. Para conocer el comportamiento que lleva el agua en el túnel, se calcula la velocidad del agua, el número de froude y energía específica haciendo uso de las ecuaciones descritas en el marco teórico.

Diseño de la tubería forzada

1. La longitud y pendiente de la tubería forzada se obtiene al igual que el túnel, por la configuración del terreno y la ubicación de las obras que le siguen a esta.
2. El diámetro interior de la tubería forzada se calcula por una ecuación que involucra el caudal de diseño y la altura última, la cual se estima con la ubicación de la cámara de carga, el túnel de desagüe, y la altura por efecto del golpe de ariete. Se recomienda un valor de altura por efecto del golpe de ariete del 30% de la altura útil.
3. Posteriormente se calcula el espesor de la tubería, donde la presión es la altura a la que se encontrará la tubería forzada. Dicha presión es igual a la altura última, la cual se encuentra por encima de la tubería.
4. Se calcula el fenómeno del golpe de ariete, ya que se generan sobrepresiones dentro de la tubería por el cierre repentino de válvulas las cuales pueden destruir a la tubería.
5. Seguidamente se calcula el espesor mínimo que debe tener la tubería para que no ocurra el fenómeno de golpe de ariete, y por último se compara el espesor de la tubería antes calculado, con el espesor correspondiente al golpe de ariete, siendo el espesor seleccionado, el mayor de los dos, asegurando de esta manera la protección de la tubería.

6. El diámetro externo de la tubería forzada será la suma del espesor seleccionado previamente, con el diámetro interno de la tubería.

Diseño de la cámara de carga

1. Con la obtención del diámetro interno de la tubería forzada, se calcula la altura mínima de agua sobre la misma, donde la velocidad se determina con la ecuación de continuidad, siendo el área de la sección transversal la correspondiente a una sección circular.
2. Posteriormente, se establece la altura necesaria que evita el ingreso de sedimentos a la cámara de carga. Se recomienda que la altura de los sedimentos se encuentre en un rango entre 0,3 y 0,5 m. Como criterio, para la altura de los sedimentos se tomó el valor promedio del rango.
3. Con la altura mínima de agua sobre la tubería de presión, más el valor de la altura necesaria que evita el ingreso de sedimentos a la cámara de carga y el diámetro externo de la tubería forzada, se obtiene la altura necesaria de la cámara de carga.
4. Con el caudal de diseño, la longitud de la tubería forzada, la altura necesaria en la cámara de carga, la altura bruta, la altura por golpe de ariete y por el diámetro interior de la tubería de presión, se procede a calcular la longitud necesaria de la cámara de carga, valor que se compara con la longitud en diseño de la caída vertical. Se selecciona la mayor.
5. Para el cálculo de la longitud horizontal de la rejilla que irá en la cámara de carga, se determina hace uso de funciones trigonométricas, partiendo de la longitud total y el ángulo de inclinación de la rejilla.
6. Ya obtenidos la longitud necesaria del tanque y la longitud horizontal de la rejilla, se determina la longitud total de la cámara de carga.

7. Se calcula la altura total de la cámara de carga, donde se asume para la altura del vertedero, un valor igual al diámetro del túnel de conducción de agua hacia la cámara de carga.
8. Por último se calcula el volumen y el ancho de la cámara de carga, por medio

Diseño de la turbina

1. Teniendo el valor de la potencia aprovechable (kW), con el salto neto y el caudal de diseño se entra a la “Gráfica de campo de utilización de los diferentes tipos de turbina” y se selecciona la más adecuada.
2. Se procede con el dimensionamiento de los componentes de la turbina, tales como el rodete, carcaza y tubería de aspiración. Previo a esto, se determinan las variables necesarias para el cálculo de las dimensiones de los componentes de la turbina, como la velocidad específica y el diámetro de descarga del rodete.
3. La velocidad específica se determina por medio de la gráfica de “Límites de velocidad específica para las turbina axiales y Francis” entrando con la altura neta de diseño, sin embargo tiene un ajuste debido a la selección del número de pares de polos (p) del alternador.
4. Para obtener el número de pares de polos del alternador, se calcula la velocidad síncrona de rotación y con una frecuencia de 60 Hz (frecuencia en turbinas aplicadas en Venezuela), se determina el número de pares de polos; estos se llevan a un valor múltiplo de 4 por encima, para facilitar la construcción. Debido a lo antes mencionado se produce un ajuste en el cual se determina nuevamente el cálculo de la velocidad síncrona y finalmente se determina la velocidad específica de diseño.

5. El diámetro de la descarga del rodete, se determina haciendo uso de la velocidad específica de diseño y el coeficiente de la velocidad periférica.
6. Finalmente se calcula las dimensiones de los componentes de las turbinas, los cuales dependen de los valores de la velocidad específica y el diámetro de descarga del rodete.

Teniendo en cuenta lo antes mencionado, se ubica la cámara de carga y el túnel de desagüe, y con el apoyo de los perfiles longitudinales se obtiene la altura útil para la turbina.

7. Posteriormente se calculan las pérdidas totales, la cual es igual a la sumatoria de las pérdidas primarias y secundarias. En las pérdidas primarias se obtiene el coeficiente de fricción del diagrama de Moody. Dicho coeficiente se lee interceptando el valor de la relación de rugosidad relativa y diámetro, con el número de Reynolds.
8. Para determinar las pérdidas secundarias en rejillas, se obtiene un coeficiente de pérdida. Se utilizó el tipo de rejillas finas, siendo estas las más usuales y con un tipo de limpieza mecánica que ofrece una inclinación de la rejilla entre 70° y 56° .
9. Para obtener el coeficiente de pérdidas en los codos, se selecciona el valor correspondiente de codos pocos pronunciados y se selecciona las válvulas de compuerta con un valor de k para válvulas abiertas.

Alternativa II

Esta alternativa parte desde una bifurcación realizada en la tubería de riego, ubicada en el estribo izquierdo del embalse, hasta llegar al río Pao. Las obras civiles que conforman esta alternativa son las siguientes:

- Tubería Forzada (Tubería de riego más la bifurcación)
- Turbina
- Casa de máquinas
- Túnel de desagüe

Diseño de la tubería de empalme

1. Se selecciona la tubería más conveniente como tubería forzada entre la de abastecimiento y la de riego y/o gasto ecológico, tomando en cuenta el caudal que transita en ellas. En este caso se selecciona la tubería de riego. El caudal que transita por ella es de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ ya que tiene un alto porcentaje de supervivencia en el tiempo. Este caudal seleccionado se divide en dos; una parte es utilizado como caudal de equipamiento (caudal de diseño) y la otra parte continúa por la tubería de riego.
2. Se realiza un empalme en la tubería seleccionada con otra del mismo diámetro, pendiente longitudinal y material, con un ángulo de 90° respecto del eje de la tubería escogida, donde, el caudal que circula en ella es la mitad del caudal antes de la bifurcación debido al empalme.

Determinación de la Potencia de Diseño

1. Se determina la altura neta, donde la altura bruta se mide desde el nivel más óptimo del embalse y el nivel donde termina la tubería empalmada. Se procede a calcular las pérdidas de energía por fricción, codos, válvulas, rejillas y por la bifurcación debido al empalme.

2. Las pérdidas por bifurcación se calculan a través de una ecuación simplificada de la ecuación de energía, donde el coeficiente de pérdida K son dependientes de la relación entre gastos y entre diámetros y el ángulo con que se realiza la bifurcación, estos valores de K se encuentran tabulados con los parámetros antes mencionados.
3. Las pérdidas obtenidas se restan a la altura bruta, para la obtención de la altura neta.
4. Por último, se calcula la potencia de diseño con el caudal que transita por la tubería empalmada, además se calcula la altura neta y un rendimiento estimado del 95 %.

Diseño de la Turbina

1. Con la Figura 23 se selecciona el tipo de turbina a emplear, con el salto neto y el caudal en la tubería de empalme.
2. Posteriormente se procede al dimensionamiento de la turbina, donde se calcula previamente la velocidad específica, velocidad síncrona de rotación, parámetros necesarios para obtener las dimensiones del rodete, carcasa y tubo de aspiración (el procedimiento para la obtención de los parámetros como la velocidad específica, la velocidad síncrona de rotación y otros, necesarios para el dimensionamiento de la turbinas se detallan en la metodología de la alternativa I).

Diseño del Túnel de Desagüe

La metodología que se usa para el cálculo del túnel de desagüe en esta alternativa, es la misma que se utiliza para la alternativa I

Diseño de la Casa de Maquinas

Se realiza el mismo procedimiento señalado en la alternativa I.

Análisis de factibilidad

Análisis de costos

Un análisis de costos es una descripción detallada de los riesgos y las ganancias potenciales que se obtienen de un proyecto.

Para llevar a cabo este análisis, debe calcularse una serie de costos relacionados con la puesta en funcionamiento de la minicentral hidroeléctrica y operatividad de la misma en el tiempo.

Para el estudio de costos de las dos alternativas de minicentral hidroeléctrica que se proponen en este trabajo de investigación, 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, senderos, obras de toma, accesorios, tubería forzada, túnel de conducción, túnel de desagüe 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

ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS

Debido a la gran cantidad de variables a estudiar, en este capítulo se presentan y discuten los resultados obtenidos para el análisis de la capacidad hidroenergética del embalse Pao La Balsa, estado Cojedes.

Descripción de las variables hidroenergéticas del embalse Pao La Balsa

En este apartado se muestran y discuten los resultados obtenidos de la descripción de las variables hidroenergéticas del embalse Pao La Balsa, estado Cojedes, acordes a la fase metodológica 3 descrita en el capítulo III.

El análisis estadístico se efectúa para las variables: elevación, volumen, área, caudal de entrada, caudal de salida, caudal de alivio, caudal ecológico y caudal de extracción; cada una de ellas cuenta con un total de 3764 datos, definidos estadísticamente con un nivel de confianza del 95%. El período de estudio abarca 10 años, iniciando en enero de 2005 hasta abril de 2015.

Descripción estadística para la variable elevación de agua en el embalse

Pao La Balsa, Estado Cojedes

A continuación se describe la variable elevación de agua en el embalse. El análisis de esta variable es importante ya que con su estudio se podrá estimar la carga de agua con la que contará la turbina para su funcionamiento

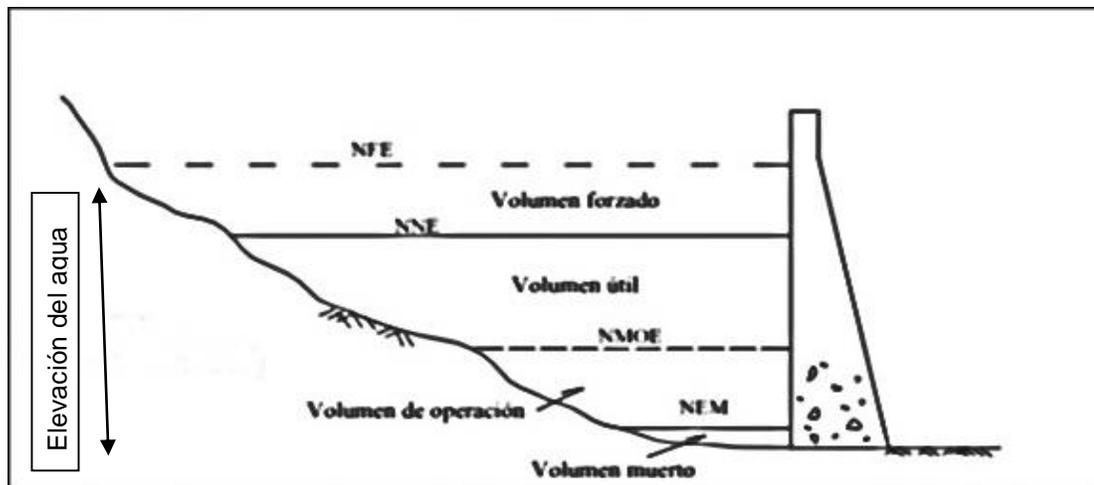


Figura 43. Elevación del agua en un embalse

Tabla 8:

Resumen estadístico para la variable elevación de agua. Embalse Pao La Balsa (2005-2015). Coordenadas: N 9°35'39.3" 68°09'27.1" W. Elevación de fondo: 112 m.s.n.m

Elevación de agua (m.s.n.m)	
Recuento	3764
Promedio	128,96
Mediana (P ₅₀)	129,07
Desviación Estándar	1,872
Coefficiente de Variación	1,45%
Mínimo	124,66
Máximo	133,27
Rango	8,61
Sesgo Estandarizado	-5,02
Curtosis Estandarizada	-10,47
Primer Cuartil (P ₂₅)	127,65
Tercer Cuartil (P ₇₅)	130,50
Nivel de Confianza	95%

De acuerdo a la Tabla 8, para la variable elevación, se obtiene un valor promedio de 128,96 m.s.n.m con variabilidad de 1,872 m. Entre la elevación mínima y elevación máxima de aguas registrada en el embalse, existe una diferencia de 8,61 m. Se observa además, que el 50% de los datos están comprendidos entre el primer cuartil (P_{25}) igual a 127,65 m.s.n.m, y el tercer cuartil (P_{75}) igual a 130,50 m.s.n.m.

Los valores mínimo y máximo de la elevación de agua registrados en la Tabla 8 reflejan la poca variabilidad que existe en los niveles del embalse, ya que el rango de movimiento de la variable es de apenas 8,61 m en el período de estudio.

Adicionalmente, se evidencia en la Tabla 8 que la elevación mínima de agua registrada está 12,66 m por encima de la elevación que corresponde al nivel muerto del embalse (NME), la cual es igual a 112,00 m.s.n.m de acuerdo al trabajo de investigación *“Evaluación del rendimiento del embalse Pao La Balsa para el período de funcionamiento 2007 – 2025”*,

Por otro lado, el valor máximo registrado, supera en 0,77 m a la elevación o nivel máximo de aguas del embalse (NMAE), establecido como 132,50 m.s.n.m, de acuerdo a datos extraídos del trabajo de investigación *“Evaluación del rendimiento del embalse Pao La Balsa para el período de funcionamiento 2007 – 2025”*, por lo que es evidente la ocurrencia de un evento máximo en el período de estudio. Este evento máximo, tuvo lugar en el mes de agosto del año 2005. Según el portal Notitarde (2005), al menos 2.000 personas fueron afectadas por el desbordamiento del embalse Pao La Balsa, tras las intensas precipitaciones, quedando así aislados en el municipio El Pao, en el estado Cojedes.

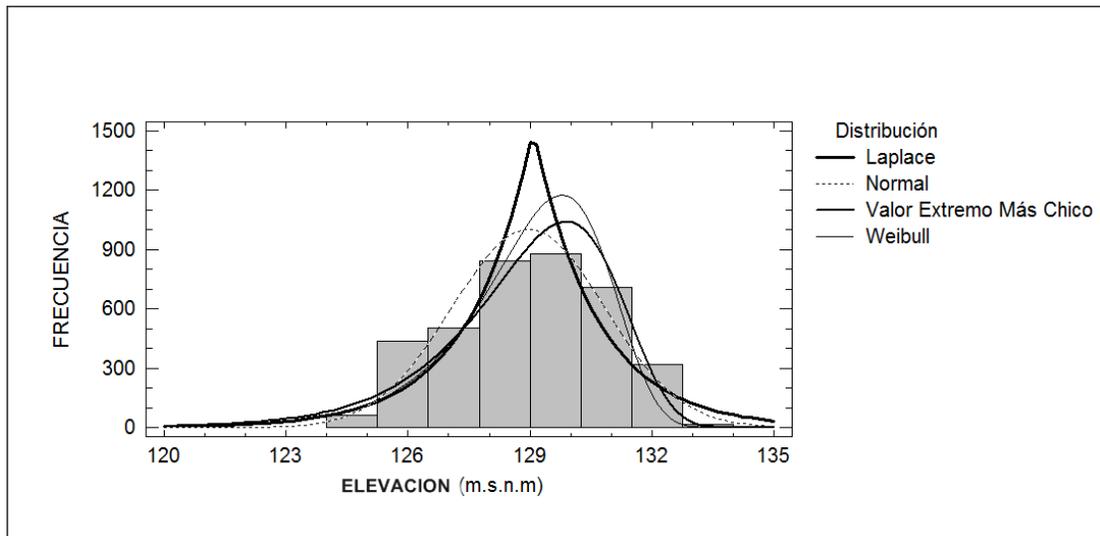


Figura 44. Ajuste de distribuciones para la variable elevación de agua.

Embalse Pao La Balsa

Tabla 9:

Comparación de distribuciones alternas para la variable elevación de agua. Embalse Pao La Balsa

Distribución	Parámetros Est.	Log Verosimilitud	KS D
*Normal	2	-7702,4	0,0455508
Valor Extremo Más Chico	2	-7748,28	0,0473787
Weibull	2	-7813,67	0,0661894
Laplace	2	-8045,56	0,0646547

*Nota: *Distribución que más se ajusta a la variable*

En la Figura 44 se observa que la distribución de probabilidad que más se ajusta al comportamiento de la variable elevación, es la distribución normal, ya que presenta un estadístico log verosimilitud igual a -7702,4 de acuerdo a la Tabla 9.

A continuación, se muestra de que manera están distribuidos los datos y con qué frecuencia ocurren:

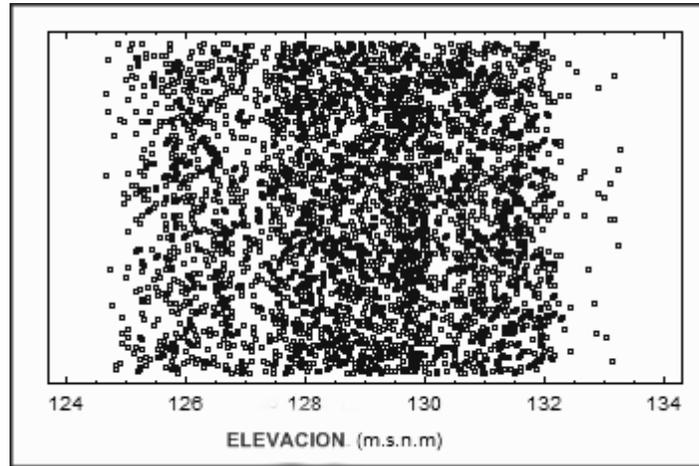


Figura 45. *Dispersión para la variable elevación.*

Embalse Pao La Balsa

En la Figura 45 se observa poca dispersión de datos respecto del valor promedio. Para respaldar esta afirmación se tiene, que el valor del coeficiente de variación es igual a 1,45% en base al resumen estadístico presentado para la variable elevación.

De acuerdo a Maneiro y Mejías (2010), cuanto mayor es el coeficiente de variación, mayor es la dispersión de los datos y menor la representatividad de la media. En este caso, se tiene un coeficiente de variación muy pequeño, es decir, que la desviación estándar equivale a 1,45% del valor promedio ($Cv = 0,0145$); por ende la distribución es homogénea y además la media es un valor representativo del conjunto de datos.

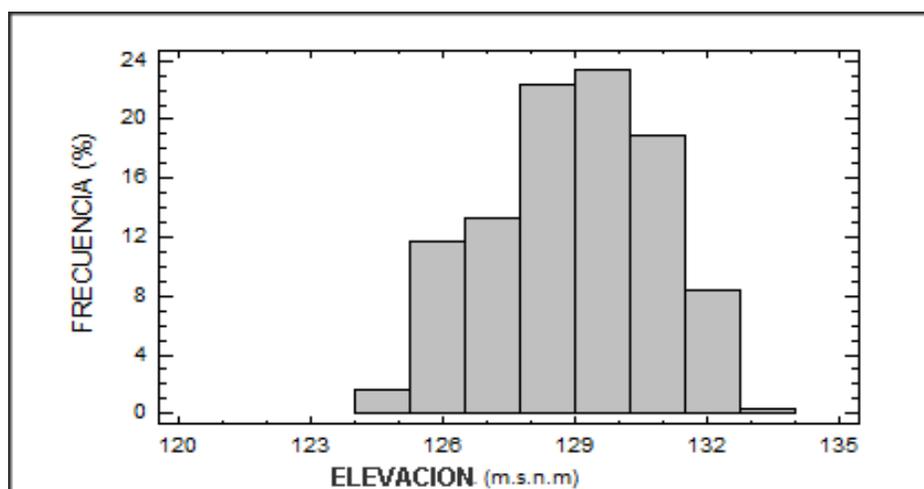


Figura 46. Histograma de frecuencia relativa para variable elevación.

Embalse Pao La Balsa

Tabla 10:

Frecuencia relativa de la variable elevación. Embalse Pao La Balsa

Clase	Límite Inferior	Límite Superior	Punto Medio	Frecuencia	Frecuencia Relativa
	Menor o igual	124		0	0
1	124	125,25	124,625	61	0,0162
2	125,25	126,5	125,875	439	0,1166
3	126,5	127,75	127,125	503	0,1336
*4	127,75	129	128,375	841	0,2234
*5	129	130,25	129,625	878	0,2333
6	130,25	131,5	130,875	711	0,1889
7	131,5	132,75	132,125	317	0,0842
8	132,75	134	133,375	14	0,0037
	mayor de	134		0	0

*Nota: *Valores que ocurren con mayor frecuencia*

En base a la información mostrada en la Figura 46 y en la Tabla 10, las elevaciones que se presentan con mayor frecuencia, están por debajo del nivel máximo de aguas del embalse igual a 132,50 m.s.n.m. Estos valores se encuentran dentro de la clase que va desde 129,0 m.s.n.m hasta 130,25

m.s.n.m sin incluir este último. Se dan con una frecuencia absoluta de 878 y frecuencia relativa del 23,33% durante el período de estudio.

A continuación en la Figura 47, se presenta la serie diaria para la variable en estudio. En la misma se ha indicado el nivel máximo de aguas del embalse (NMAE) igual a 132,50 m.s.n.m, el nivel normal de operación (NNE) igual a 131,00 m.s.n.m, y el nivel muerto (NME) igual a 112,00 m.s.n.m. A simple vista se pueden observar los eventos extremos tanto de exceso como de déficit que han ocurrido desde Enero 2005 hasta Abril 2015.

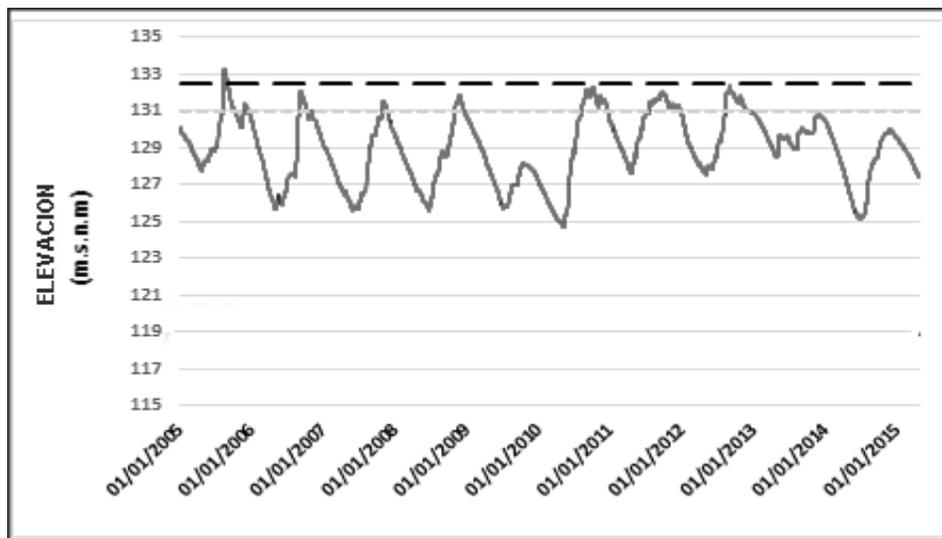


Figura 47. Elevaciones diarias. Embalse Pao La Balsa (Ene 2005 - Abr 2015)

En la Figura 47 se observan los valores mínimos, medios y máximos mensuales de la variable, registrados mes a mes del año hidrológico en un período de 10 años. En base a la información disponible se aprecia en la Tabla 11, que los meses en donde se registran mayormente los valores mínimos son: abril, mayo, y junio. Los meses de julio, agosto y septiembre presentan la mayor variabilidad sobre todo en agosto, mes donde se ha registrado algunos de los mayores niveles embalsados, tal es el caso del 15 de agosto de 2005.

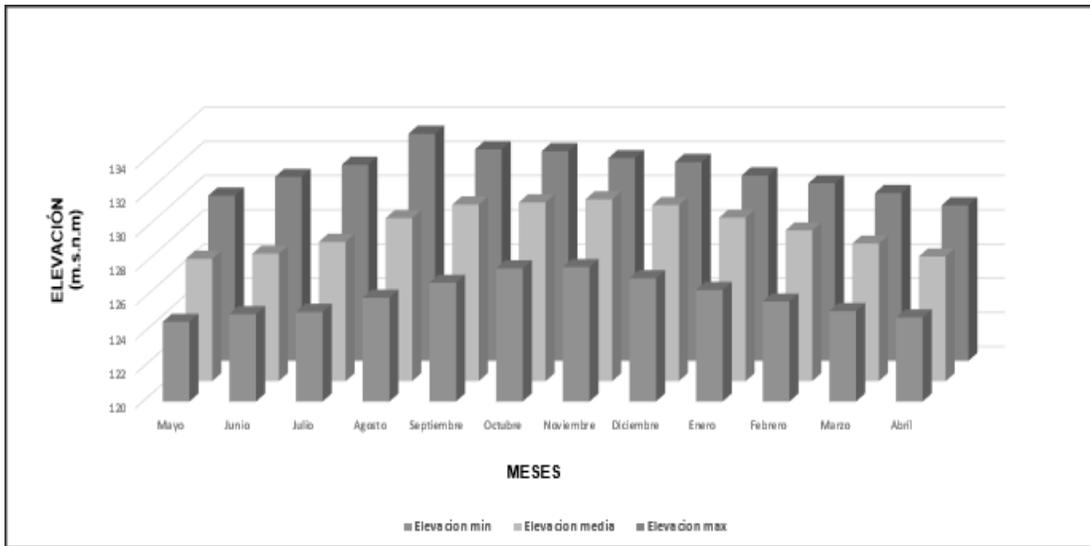


Figura 48. Resumen estadístico de elevaciones promedios mensuales.
Embalse Pao La Balsa (2005- 2015)

Tabla 11:

Resumen estadístico de elevaciones mínimas, medias y máximas mensuales del embalse Pao La Balsa

Elev	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr
Mín	124,6	125,1	125,2	126,0	126,9	127,7	127,8	127,2	126,5	125,8	125,2	124,9
Med	127,1	127,4	128,1	129,5	130,3	130,4	130,6	130,2	129,5	128,8	128,0	127,2
Máxi	129,6	130,7	131,4	133,2	132,3	132,2	131,8	131,6	130,8	130,3	129,8	129,0

Descripción estadística para la variable volumen de agua del embalse Pao La Balsa, Estado Cojedes

A continuación se describe la variable volumen de agua. Esta variable representa los millones de metros cúbicos de agua que contiene el embalse.

Tabla 12:

*Resumen estadístico para la variable volumen. Embalse Pao La Balsa (2005-2015).
Coordenadas: N 9°35'39.3" 68°09'27.1" W*

	Volumen (Hm³)
Recuento	3764
Promedio	260,30
Mediana (P ₅₀)	257,30
Desviación Estándar	72,598
Coeficiente de Variación	27,89%
Mínimo	121,20
Máximo	464,00
Rango	342,80
Sesgo Estandarizado	3,51
Curtosis Estandarizada	-10,66
Primer Cuartil (P ₂₅)	205,55
Tercer Cuartil (P ₇₅)	318,20
Nivel de Confianza	95%

De acuerdo la información presentada en la Tabla 12, se tiene un volumen de agua embalsada promedio igual a 260,30 Hm³, con una variabilidad de 72,598 Hm³. Entre el volumen mínimo y el volumen máximo registrado, existe una diferencia de 342,80 Hm³. Se observa además, que el 50% de los datos se encuentran entre 205,55 Hm³ y 318,20 Hm³.

El valor máximo de volumen registrado en la Tabla 12 supera en 44,34 Hm³ al volumen que corresponde al actual nivel máximo operacional del

embalse, el cual es 419,66 Hm³, según la ficha técnica del embalse Pao La Balsa, corroborando una vez más, la ocurrencia de eventos máximos en el periodo de estudio.

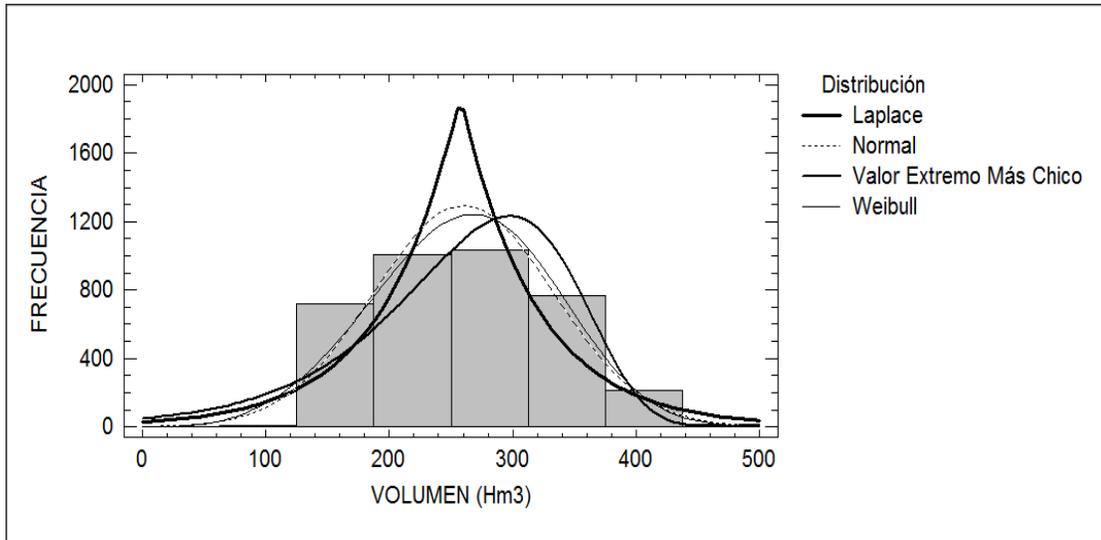


Figura 49. Ajuste de distribuciones para la variable volumen
Embalse Pao La Balsa

Tabla 13:

Comparación de distribuciones alternas para la variable volumen. Embalse Pao La Balsa

Distribución	Parámetros Est.	Log Verosimilitud	KS D
*Weibull	2	-21452,5	0,0386427
Valor Extremo Más Chico	2	-21728,7	0,0823902
Normal	2	-21468,9	0,0395465
Laplace	2	-21829,3	0,0677692

*Nota: *Distribución que más se ajusta a la variable*

En la Figura 49 se observa que la distribución de probabilidad que más se ajusta al comportamiento de la variable volumen, es la distribución weibull, ya

que presenta un estadístico log verosimilitud igual a $-0,0386427$ de acuerdo a la Tabla 13.

Esta distribución está descrita según el parámetro de forma igual a $3,99157$ y el parámetro escala igual a $287,608$ y es una alternativa a la distribución normal, en caso de que existan datos asimétricos, como ocurren en este caso.

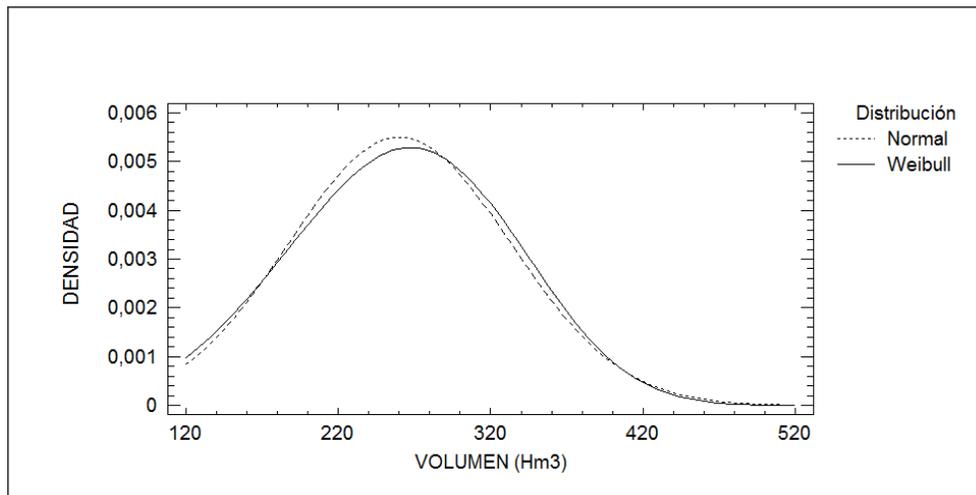


Figura 50. *Distribución normal y distribución weibull para la variable volumen Embalse Pao La Balsa*

La distribución weibull que se ajusta a la variable volumen, presenta asimetría positiva. La distribución no se comporta de manera normal en su totalidad, pero se aproxima mucho a ella.

A continuación, se muestra de que manera están distribuidos los datos y con qué frecuencia ocurren:

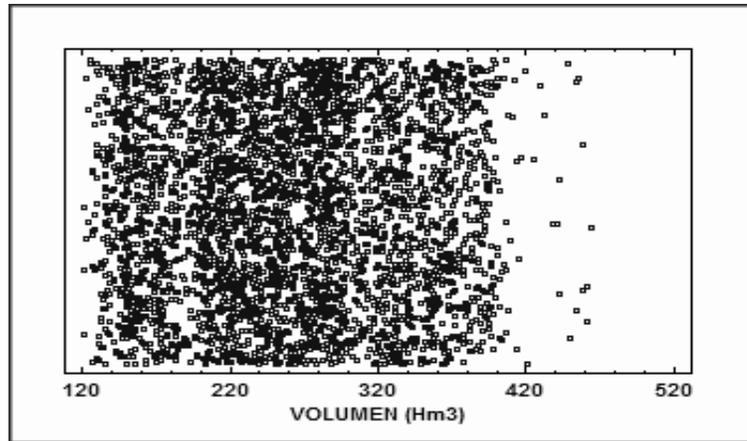


Figura 51. Gráfico de dispersión para la variable volumen.

Embalse Pao La Balsa

En la Figura 51 se observa mayor concentración de datos por debajo del volumen promedio; por encima de él, existe una considerable dispersión, es decir, existe heterogeneidad.

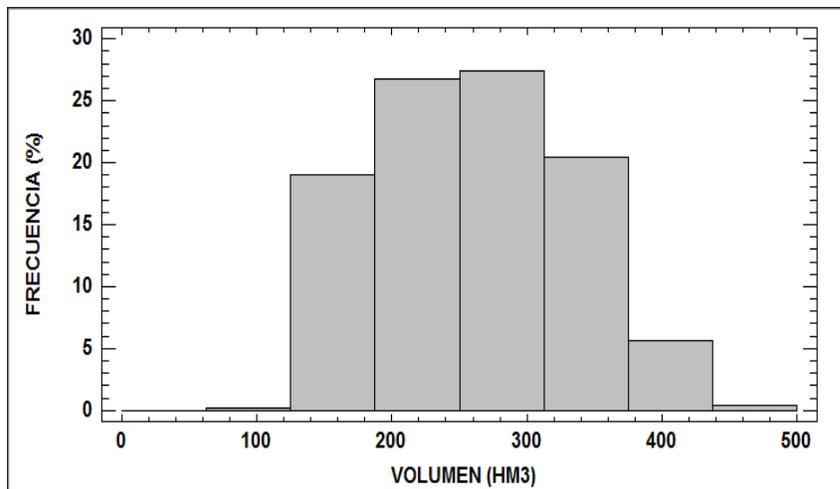


Figura 52. Histograma de frecuencia relativa para la variable volumen

Embalse Pao La Balsa.

Tabla 14:

Histograma de frecuencia relativa para la variable volumen. Embalse Pao La Balsa

Clase	Límite Inferior	Límite Superior	Punto Medio	Frecuencia	Frecuencia Relativa
	Menor o igual	0		0	0
1	0	62,5	31,25	0	0
2	62,5	125	93,75	8	0,0021
3	125	187,5	156,25	717	0,1905
4	187,5	250	218,75	1009	0,2681
*5	250	312,5	281,25	1032	0,2742
6	312,5	375	343,75	770	0,2046
7	375	437,5	406,25	214	0,0569
8	437,5	500	468,75	14	0,0037
	mayor de	500		0	0

*Nota: *Valores que ocurren con mayor frecuencia*

Según la Figura 52 y la Tabla 14, es frecuente encontrar volúmenes embalsados de agua que van desde 250,0 Hm³ a 312,5 Hm³, sin incluir éste último. Esta clase presenta una frecuencia absoluta de 1032 y frecuencia relativa del 27,42%. El valor promedio se encuentra dentro de los valores que ocurren con mayor frecuencia.

Descripción estadística para la variable área del embalse Pao La Balsa, Estado Cojedes

A continuación se describe la variable área del embalse. Esta variable representa el área inundada o también llamada espejo de agua del embalse.

Tabla 15:

Resumen estadístico para la variable área. Embalse Pao La Balsa (2005 - 2015).

Coordenadas: N 9°35'39.3" 68°09'27.1" W

	Área (Ha)
Recuento	3764
Promedio	4005,44
Mediana (P ₅₀)	4012
Desviación Estándar	698,146
Coefficiente de Variación	17,43%
Mínimo	2525
Máximo	5788
Rango	3263
Sesgo Estandarizado	0,67
Curtosis Estandarizada	-10,92
Primer Cuartil (P ₂₅)	3497
Tercer Cuartil (P ₇₅)	4572
Nivel de Confianza	95%

De acuerdo a la Tabla 15 se obtiene para el área inundada del embalse, un valor promedio igual a 4005,44 Ha, con una variabilidad de 698,146 Ha. Entre el área mínima y el área máxima registrada existe una diferencia de 3263 Ha. Se observa además que el 50% de los valores se encuentran entre 3497 Ha y 4572 Ha.

Se evidencia en la Tabla 15 que el área promedio se aproxima al valor máximo de la variable, indicando de esta manera, un área inundada cercana

al área que corresponde al nivel máximo operacional del embalse, siendo esta igual a 5700 Ha, según la ficha técnica del embalse Pao La Balsa.

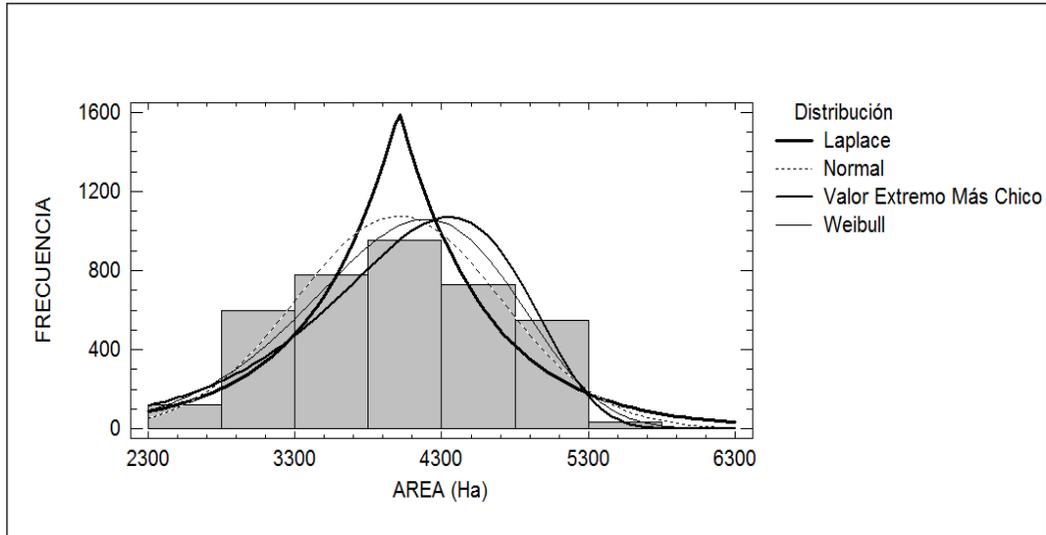


Figura 53. Ajuste de distribuciones para la variable área.

Embalse Pao La Balsa

Tabla 16:

Comparación de distribuciones alternas para la variable volumen. Embalse Pao La Balsa

Distribución	Parámetros Est.	Log Verosimilitud	KS D
*Normal	2	-29988,7	0,0423129
Weibull	2	-30003,5	0,0392842
Valor Extremo Más Chico	2	-30145,2	0,0637376
Laplace	2	-30346,8	0,062056

*Nota: *Distribución que más se ajusta a la variable*

En la Figura 53 se observa que la distribución de probabilidad que más se ajusta al comportamiento de la variable área, es la distribución normal, ya que presenta un estadístico log verosimilitud igual a -29988,7 de acuerdo a la Tabla 16.

A continuación, se muestra de que manera están distribuidos los datos y con qué frecuencia ocurren

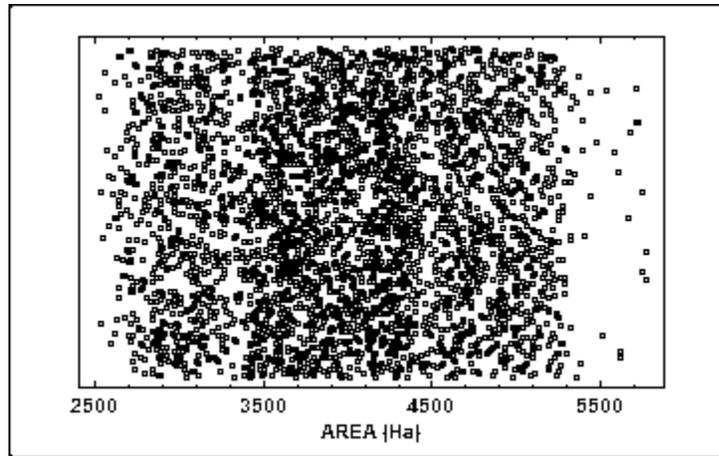


Figura 54. *Dispersión para la variable área.*

Embalse Pao La Balsa

En la Figura 54 se observa una leve dispersión de datos por encima del valor promedio. Para respaldar esta afirmación se tiene que el valor del coeficiente de variación es igual a 17,43% de acuerdo al resumen estadístico presentado para la variable área.

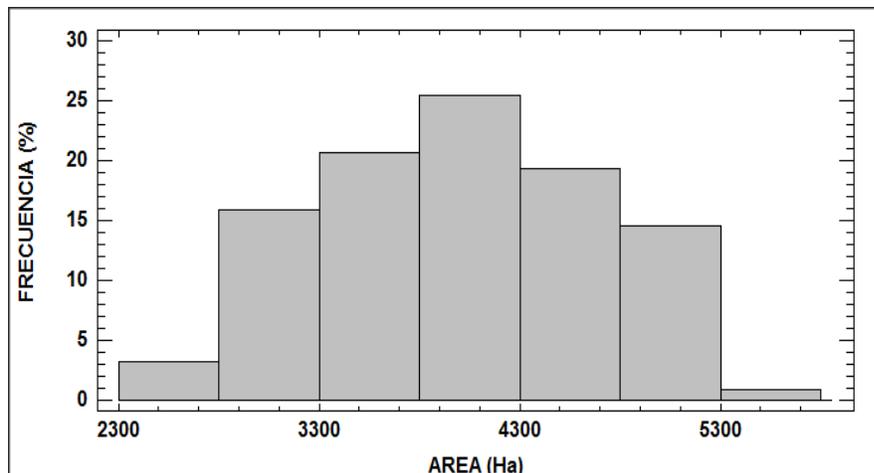


Figura 55. *Histograma de frecuencia relativa para la variable área.*

Embalse Pao La Balsa

Tabla 17:*Histograma de frecuencia relativa para la variable área. Embalse Pao La Balsa*

Clase	Límite Inferior	Límite Superior	Punto Medio	Frecuencia	Frecuencia Relativa
	menor o igual	2300		0	0
1	2300	2800	2550	121	0,0321
2	2800	3300	3050	598	0,1589
3	3300	3800	3550	776	0,2062
*4	3800	4300	4050	956	0,2540
5	4300	4800	4550	729	0,1937
6	4800	5300	5050	549	0,1459
7	5300	5800	5550	35	0,0093
8	5800	6300	6050	0	0
	mayor de	6300		0	0

*Nota: *Valores que ocurren con mayor frecuencia*

De acuerdo a la Tabla 17, los valores de área inundada del embalse que se registran con mayor frecuencia, van desde 3800 Ha hasta 4300 Ha, sin incluir este último. Se dan con una frecuencia absoluta de 956 y frecuencia relativa de 25,40%. El valor promedio se encuentra dentro de la clase que ocurre con mayor frecuencia.

Análisis comparativo

A continuación se realiza un análisis comparativo estadístico entre las variables elevación, volumen y área del embalse Pao La Balsa.

Tabla 18:

Comparación de coeficientes de variación de las variables nivel, volumen y área.

VARIABLE	Media (\bar{X})	Mediana (P_{50})	Desviación estándar (S)	Coefficiente de Variación	Coefficiente de Variación (%)
ELEVACION (m.s.n.m)	128,95	129,07	1,872	0,0145	1,45
VOLUMEN (Hm ³)	260,30	257,30	72,598	0,2789	27,89
AREA (Ha)	4005,44	4012	698,146	0,1743	17,43

En la Tabla 18 se observa que la desviación estándar de la variable volumen equivale al 27,89% del promedio, mientras que para la variable área, su desviación estándar es el 17,43% de su valor promedio; asimismo sucede con la variable elevación, donde la desviación estándar es solo el 1,45% de su valor medio.

De acuerdo a los coeficientes de variación, el volumen y el área presentan mayor dispersión en sus datos respecto al valor promedio. Esto evidencia la heterogeneidad de ambas variables, generada en parte por la pérdida de millones de metros cúbicos en capacidad de almacenamiento de agua en el embalse, que se produce cada año a causa de la sedimentación. Es decir, se

produce una reducción del área inundada del embalse, por lo tanto, se reduce la capacidad útil del mismo.

A pesar de que los coeficientes de variación de volumen y de área son elevados, el promedio sigue siendo un valor representativo de cada variable, ya que no existen valores aberrantes que puedan distorsionar la media, como se aprecia en la Figura 56.

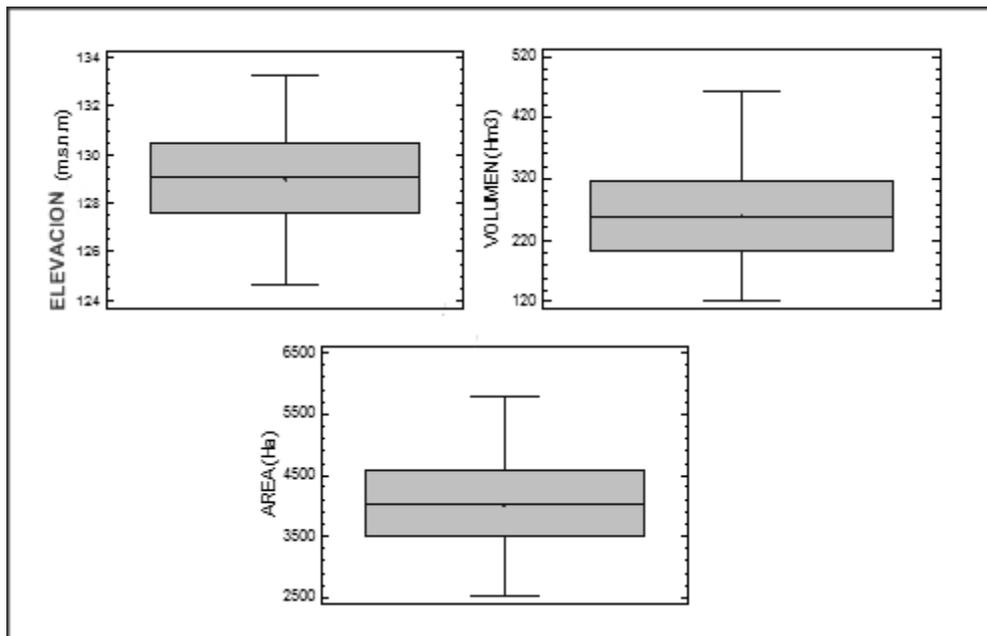


Figura 56. Diagrama de caja y bigotes para las variables elevación, volumen y área.

Embalse Pao La Balsa

Descripción estadística resumida para la variable caudal de entrada del embalse Pao La Balsa, Estado Cojedes

A continuación se describe la variable caudal de entrada del embalse. Este caudal es el aportado por las lluvias y por los afluentes del embalse como lo son el río Paíto, Mucaria y Pacaragua.

Tabla 19:

Resumen estadístico para la variable caudal de entrada. Embalse Pao La Balsa
(2005-2015). Coordenadas: N 9°35'39.3" 68°09'27.1" W

Caudal de entrada (m³/s)	
Recuento	3764
Promedio	0,86
Mediana(P ₅₀)	0,46
Desviación Estándar	1,102
Coeficiente de Variación	128,79%
Mínimo	0,000453378
Máximo	28,84
Rango	28,84
Sesgo Estandarizado	175,40
Curtosis Estandarizada	1625,54
Primer Cuartil (P ₂₅)	0,19
Tercer Cuartil (P ₇₅)	1,20
Nivel de Confianza	95%

De acuerdo con la Tabla 19, el caudal promedio diario que ingresa al embalse es igual a 0,86 m³/s con una variabilidad de 1,102 m³/s. Entre el caudal mínimo de entrada y el caudal máximo de entrada registrado existe una diferencia de 28,84 m³/s. Se observa además que el 50% de los caudales que ingresan diariamente al embalse se encuentran por debajo de 0,46 m³/s asimismo, estos están comprendidos entre los valores 0,19 m³/s y 1,20 m³/s.

Se evidencia que la desviación estándar es mucho mayor al valor promedio, esto sugiere que durante el período de estudio, se presentaron gran cantidad de caudales extremos.

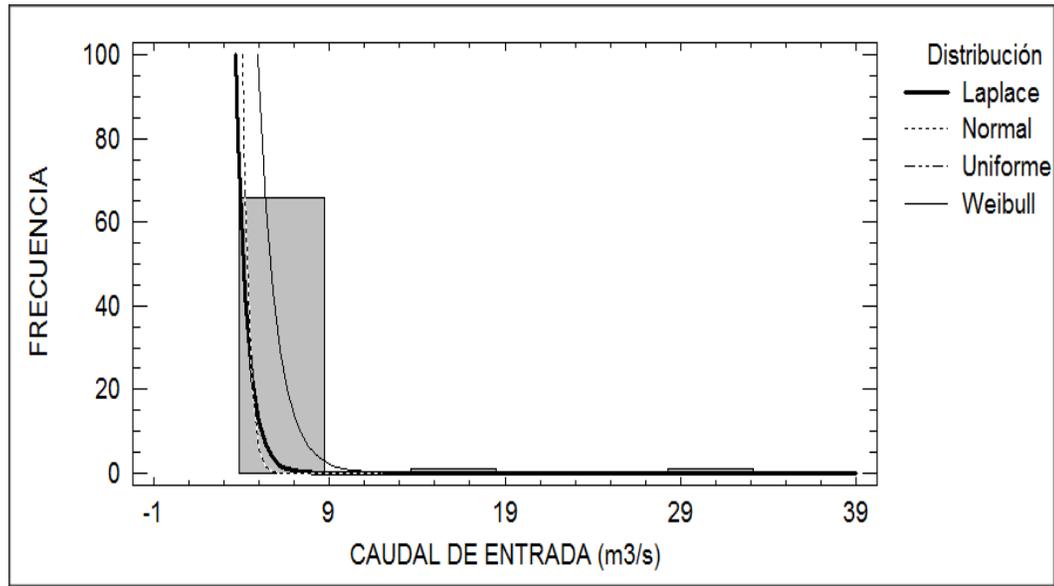


Figura 57. Ajuste de distribuciones para la variable caudal de entrada.
Embalse Pao La Balsa.

Tabla 20:

Comparación de distribuciones alternas para la variable caudal de entrada. Embalse Pao La Balsa

Distribución	Parámetros Est.	Log Verosimilitud	KS D
*Weibull	2	-3150,05	0,0506279
Laplace	2	-4710,01	0,242639
Uniforme	2	-12654,5	0,864186
Normal	2	-1,00E+09	0,218858

*Nota: *Distribución que más se ajusta a la variable*

En la Figura 57 se observa que la distribución de probabilidad que más se ajusta al comportamiento de la variable caudal de entrada, es la distribución weibull, ya que presenta un estadístico log verosimilitud igual a -3150,05 de acuerdo a la Tabla 20.

Esta distribución está descrita según el parámetro de forma igual a 0,913289 y el parámetro escala igual a 0,817027 y es una alternativa a la distribución normal, en caso de que existan datos asimétricos, como ocurren en este caso.

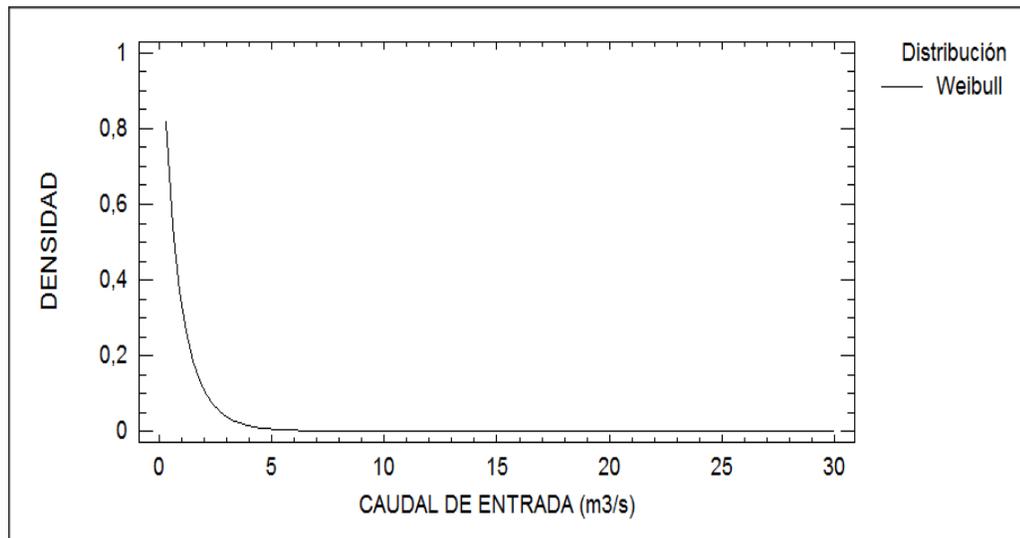


Figura 58. Densidad para la variable caudal de entrada.

Embalse Pao La Balsa

De acuerdo a la Figura 58 los valores de caudal de entrada, con una media de 0,86 m³/s muestran una distribución de frecuencias con sesgo positivo dando lugar a un número considerable de años con caudales de aporte inferiores a la media.

A continuación, se muestra de que manera están distribuidos los datos y con qué frecuencia ocurren

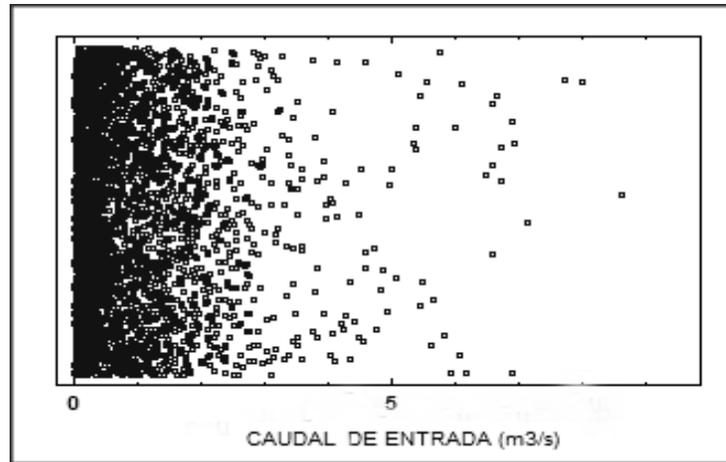


Figura 59. *Dispersión para la variable caudal de entrada.*

Embalse Pao La Balsa

En la Figura 59 se observa mayor concentración de datos hacia valores cercanos al promedio. A pesar de que el coeficiente de variación es mayor al 100%, mediante este gráfico puede evidenciarse la poca dispersión que existe respecto al valor promedio. Esto se observa en la Figura 60 donde se presenta el diagrama de caja y bigotes

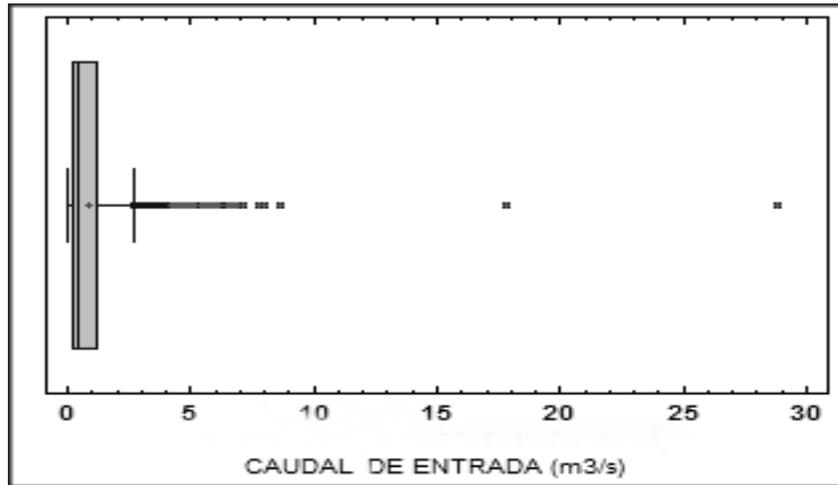


Figura 60. Gráfico de caja y bigotes para la variable caudal de entrada
Embalse Pao La Balsa.

El gráfico 60 muestra la poca variabilidad que existe en los caudales que entran al embalse. El coeficiente de variación arroja un valor mayor al 100% debido a la presencia de valores atípicos que distorsionan el valor promedio. Por esta razón, se toma la mediana como valor representativo del conjunto de datos.

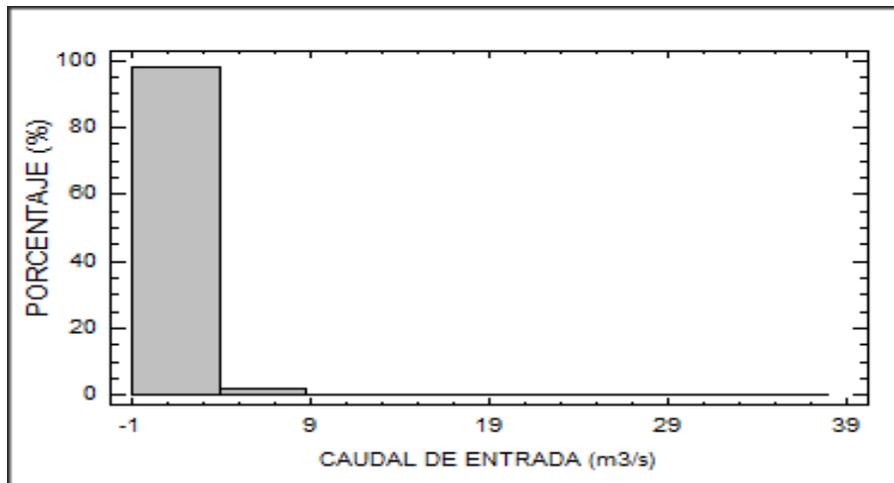


Figura 61. Histograma de frecuencia para la variable caudal de entrada.
Embalse Pao La Balsa

Tabla 21:

Histograma de frecuencia relativa para la variable caudal de entrada. Embalse Pao La Balsa

Clase	Límite Inferior	Límite Superior	Punto Medio	Frecuencia	Frecuencia Relativa
	menor o igual	-1		0	0
*1	-1	3,875	1,4375	3696	0,9819
2	3,875	8,75	6,3125	66	0,0175
3	8,75	13,625	11,1875	0	0
4	13,625	18,5	16,0625	1	0,0003
5	18,5	23,375	20,9375	0	0
6	23,375	28,25	25,8125	0	0
7	28,25	33,125	30,6875	1	0,0003
8	33,125	38	35,5625	0	0
	mayor de	38		0	0

*Nota: *Valores que ocurren con mayor frecuencia*

De acuerdo a la Tabla 21, los valores de caudal que entran con mayor frecuencia al embalse, se encuentran dentro de la clase 1 que va desde -1 a 3,875 m³/s, siendo 0,000453378 el mínimo valor que toma la variable. Estos valores se dan con una frecuencia absoluta de 3696 y frecuencia relativa del 98,19%.

Descripción estadística resumida para la variable caudal de salida del embalse Pao La Balsa, Estado Cojedes

A continuación se describe la variable caudal de salida. El caudal de salida en el embalse, se da debido al gasto por aliviadero, gasto ecológico y gasto por extracción.

Tabla 22:

*Resumen estadístico de la variable caudal de salida. Embalse Pao La Balsa (2005-2015).
Coordenadas: N 9°35'39.3" 68°09'27.1" W*

Caudal de salida (m³/s)	
Recuento	3764
Promedio	0,85
Mediana(P ₅₀)	0,60
Desviación Estándar	0,630
Coficiente de Variación	73,89%
Mínimo	0,00263933
Máximo	3,58
Rango	3,58
Sesgo Estandarizado	31,98
Curtosis Estandarizada	15,95
Primer Cuartil (P ₂₅)	0,43
Tercer Cuartil (P ₇₅)	1,22
Nivel de Confianza	95%

De acuerdo a la Tabla 22, en promedio, el caudal que sale del embalse es igual a 0,85 m³/s con una desviación típica de 0,630 m³/s. Entre el caudal mínimo y el caudal máximo de salida registrado existe una diferencia de 3,58 m³/s. Asimismo se observa que el 50% de los caudales se encuentran entre 0,43 m³/s y 1,22 m³/s.

Se evidencia la semejanza que existe entre los caudales que salen del embalse versus los caudales que ingresan a él, con solo comparar los valores promedio de cada uno. Esto sugiere un caudal desembalsado mayor al caudal aportado al embalse.

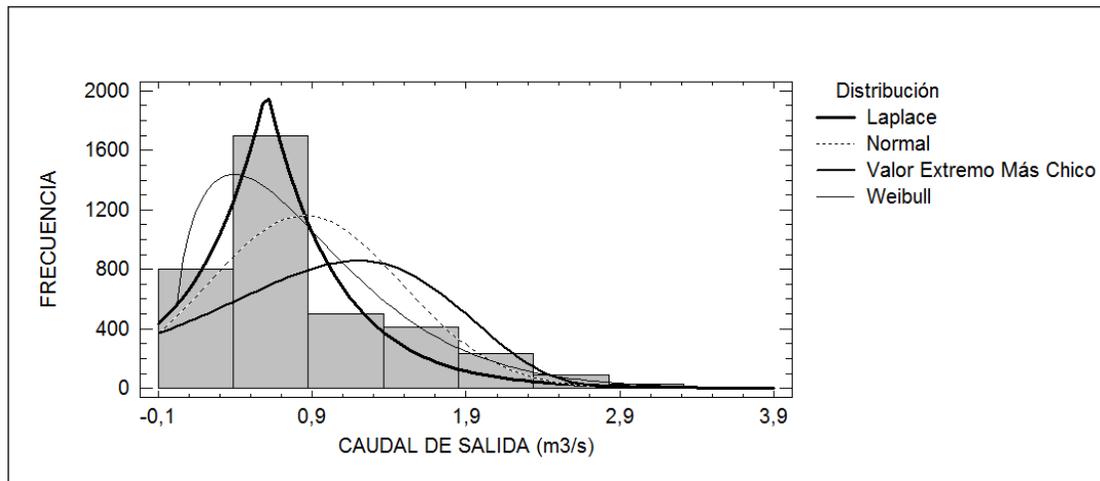


Figura 62. Ajuste de distribuciones para la variable caudal de salida.

Embalse Pao La Balsa.

Tabla 23:

Comparación de distribuciones alternas para la variable caudal de salida. Embalse Pao La Balsa

Distribución	Parámetros Est.	Log Verosimilitud	KS D
*Laplace	2	-3409,08	0,167848
Weibull	2	-2841,49	0,123419
Normal	2	-3602,2	0,199155
Valor Extremo Más Chico	2	-4525,53	0,197629

*Nota: *Distribución que más se ajusta a la variable*

En la Figura 62 se observa que la distribución de probabilidad que más se ajusta al comportamiento de la variable caudal de salida es la distribución laplace, ya que presenta un estadístico log verosimilitud igual a -3409,08 de acuerdo a la Tabla 23.

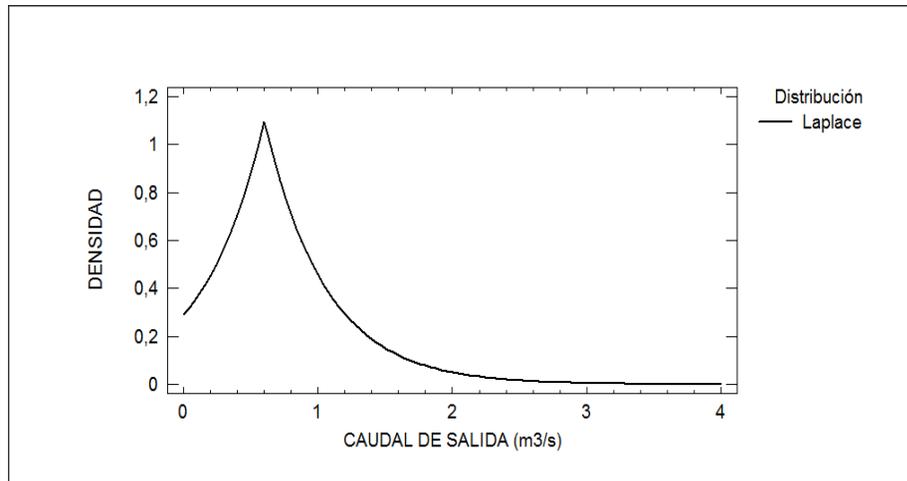


Figura 63. Densidad para la variable caudal de entrada.

Embalse Pao La Balsa

De acuerdo a la Figura 63, Los valores de distribución de la variable caudal de salida presentan asimetría positiva dando lugar a un mayor número de años con caudales de salida inferiores a la media.

A continuación, se muestra de que manera están distribuidos los datos y con qué frecuencia ocurren:

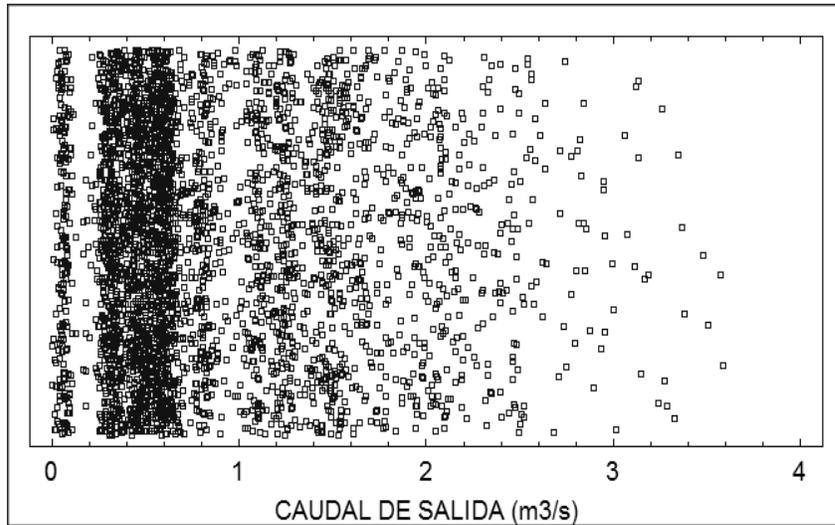


Figura 64. *Dispersión para la variable caudal de salida.*

Embalse Pao La Balsa

En la Figura 64 se observa mayor concentración de valores por debajo de la media. El valor de coeficiente de variación es igual a 73,89% , lo que indica una considerable dispersión de datos por encima del valor promedio.

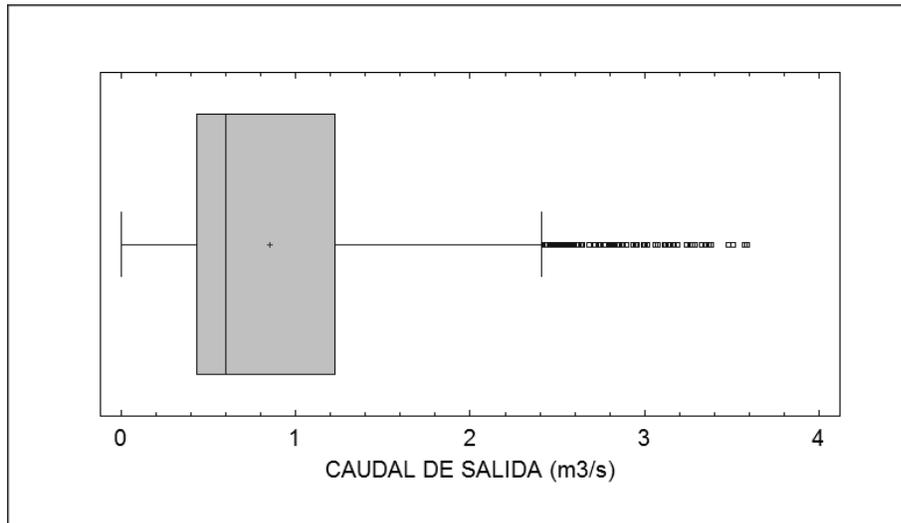


Figura 65. *Gráfico de caja y bigotes para la variable caudal de salida*

Embalse Pao La Balsa

En la Figura 65 se observa la presencia de valores atípicos de caudal de salida

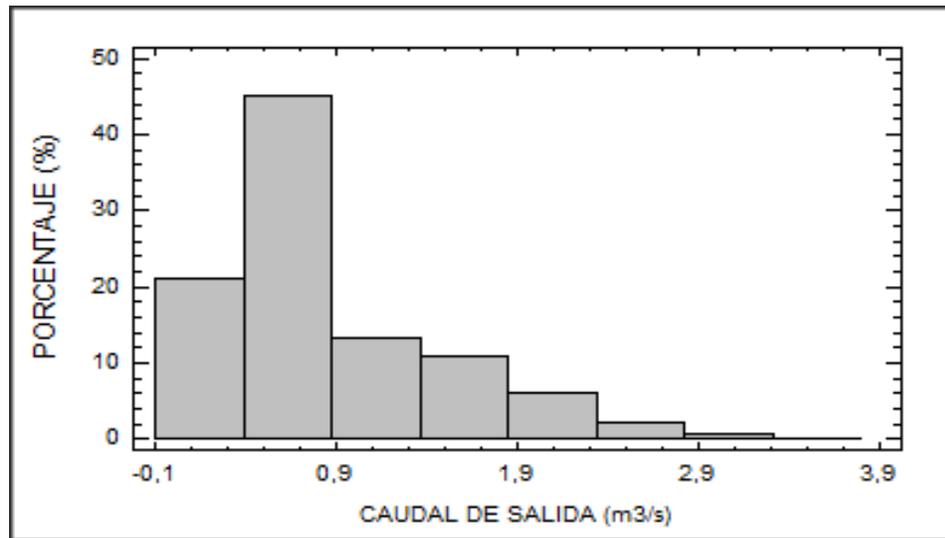


Figura 66. Histograma de frecuencia para la variable caudal de salida.
Embalse Pao La Balsa.

Tabla 24:

Histograma de frecuencia relativa para la variable caudal de salida. Embalse Pao La Balsa

Clase	Límite Inferior	Límite Superior	Punto Medio	Frecuencia	Frecuencia Relativa
	menor o igual	-0,1		0	0
1	-0,1	0,3875	0,14375	799	0,2123
*2	0,3875	0,875	0,63125	1696	0,4506
3	0,875	1,3625	1,11875	499	0,1326
4	1,3625	1,85	1,60625	413	0,1097
5	1,85	2,3375	2,09375	234	0,0622
6	2,3375	2,825	2,58125	87	0,0231
7	2,825	3,3125	3,06875	28	0,0074
8	3,3125	3,8	3,55625	8	0,0021
	mayor de	3,8		0	0

*Nota: *Valores que ocurren con mayor frecuencia.*

De acuerdo con la Tabla 24, los caudales que salen del embalse con mayor frecuencia se encuentran entre $0,3875 \text{ m}^3/\text{s}$ a $0,875 \text{ m}^3/\text{s}$, estos valores se dan con una frecuencia absoluta de 1696 y frecuencia relativa del 45,06%.

Pese a que el valor promedio está dentro de la clase que ocurre con mayor frecuencia, el coeficiente de variación es cercano a 100% y además existe la presencia de valores atípicos que pueden visualizarse en la Figura 65; por lo tanto el valor que mejor representa a la variable caudal de salida es la mediana igual a $0,60 \text{ m}^3/\text{s}$.

Descripción estadística resumida para la variable caudal de alivio del embalse Pao La Balsa, Estado Cojedes

A continuación se describe la variable caudal de alivio del embalse. Este caudal es descargado mediante el aliviadero del embalse, con la finalidad de que el mismo mantenga sus niveles operacionales y no sufra excesos.

Tabla 25:

*Resumen estadístico de la variable caudal alivio. Embalse Pao La Balsa (2005-2015).
Coordenadas: N 9°35'39.3" 68°09'27.1" W*

Caudal de alivio (m³/s)	
Recuento	3764
Promedio	0,090
Mediana(P ₅₀)	0
Desviación Estándar	0,292
Coefficiente de Variación	323,06%
Mínimo	0
Máximo	2,98
Rango	2,98
Sesgo Estandarizado	118,71
Curtosis Estandarizada	366,59
Primer Cuartil (P ₂₅)	0
Tercer Cuartil (P ₇₅)	0
Nivel de Confianza	95%

De acuerdo a la Tabla 25 el caudal promedio diario que descarga el aliviadero del embalse es igual a 0,090 m³/s con una variabilidad de 0,292 m³/s. Entre el caudal mínimo y el caudal máximo de alivio registrado, existe una diferencia de 2,98 m³/s. Se observa además que el 75% de los caudales de alivio son iguales a 0 m³/s.

Se evidencia que el caudal máximo registrado, no supera el caudal máximo de descarga que permite el aliviadero del embalse, el cual es igual a $6 \text{ m}^3/\text{s}$ según la ficha técnica del embalse Pao La Balsa. Es decir, el aliviadero ha descargado solo el 50% del caudal permitido en los 10 años de estudio.

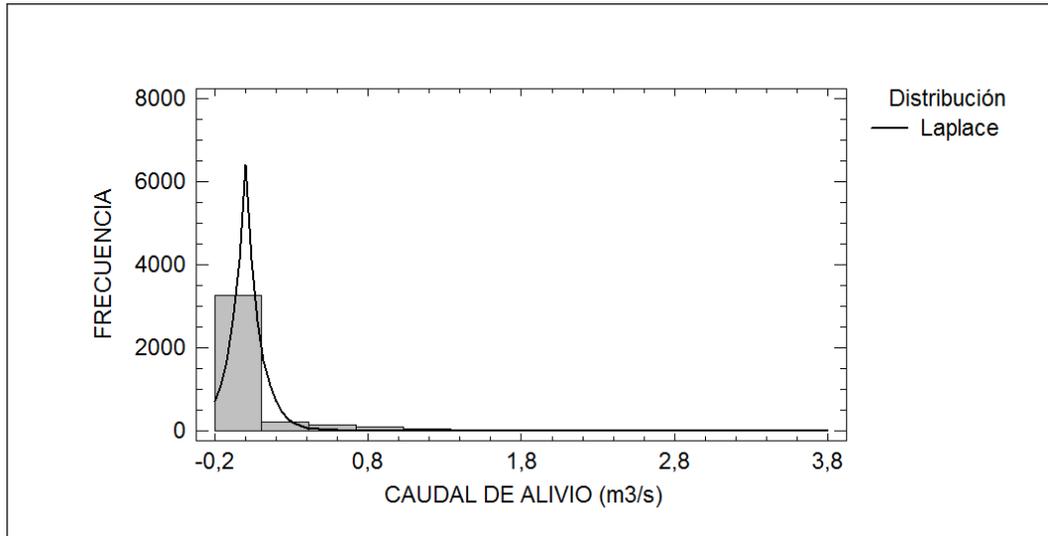


Figura 67. Ajuste de distribuciones para la variable caudal de alivio.

Embalse Pao La Balsa

La distribución que se ajusta a la variable caudal alivio es la distribución laplace, descrita por los parámetros:

Media: 0,0

Escala: 11,608

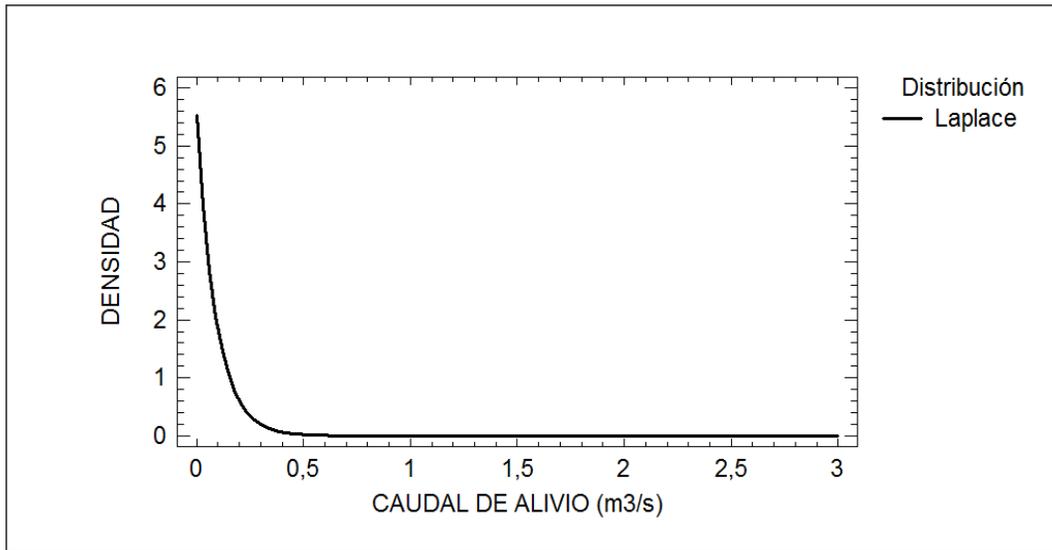


Figura 68. Gráfico de densidad para la variable caudal de alivio.

Embalse Pao La Balsa

En la figura 68, evidentemente los valores de sesgo que presenta la variable caudal de alivio demuestran que la distribución no es normal.

A continuación, se muestra de que manera están distribuidos los datos y con qué frecuencia ocurren:

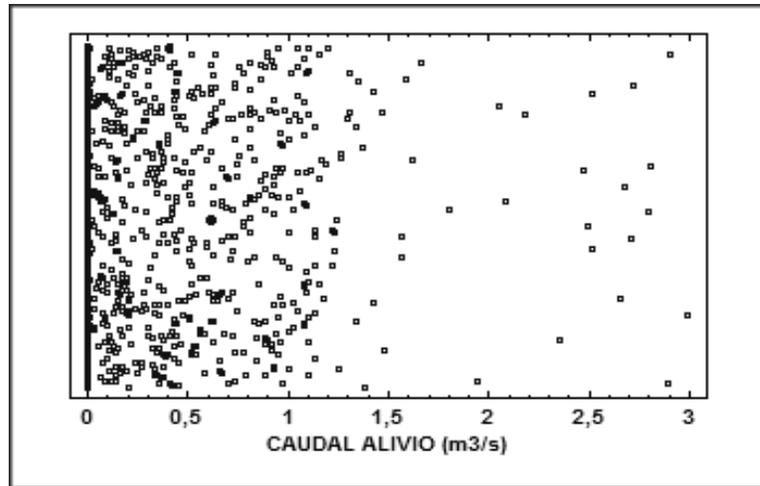


Figura 69. Gráfico de dispersión para la variable caudal de alivio
Embalse Pao La Balsa

En la Figura 69 se refleja una aparente dispersión de datos. Para conocer mejor el comportamiento de la variable, se observa la Figura 70

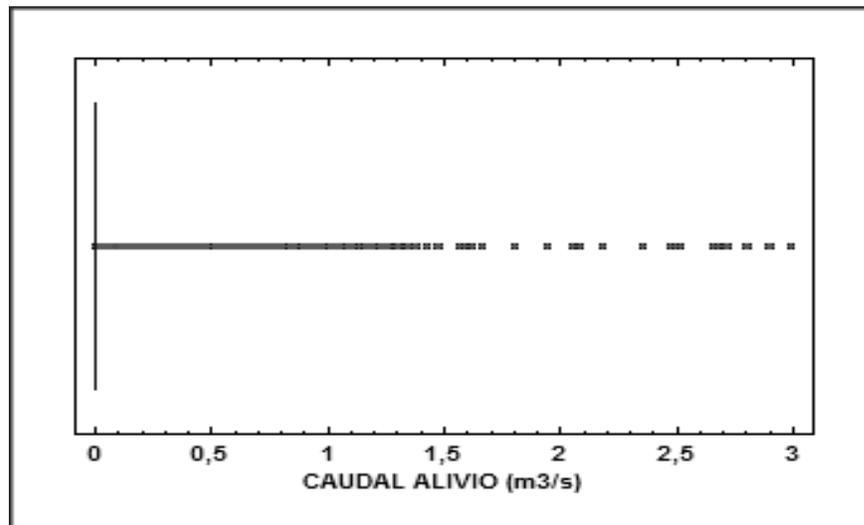


Figura 70. Gráfico de caja y bigotes para la variable caudal de alivio
Embalse Pao La Balsa

En el gráfico de caja y bigotes se evidencia la inexistencia del rango intercuartílico y gran cantidad de valores atípicos. Esto quiere decir, que no hay dispersión de datos, además dado que el coeficiente de variación depende de la desviación típica, y en mayor medida de la media aritmética, si la media es cercana a cero, como ocurre en este caso, el valor del coeficiente pierde significado.

El análisis realizado tiene sentido, ya que la mayor parte del tiempo el nivel del embalse se sitúa por debajo del nivel de la cresta del vertedero y por ende no existe descarga.

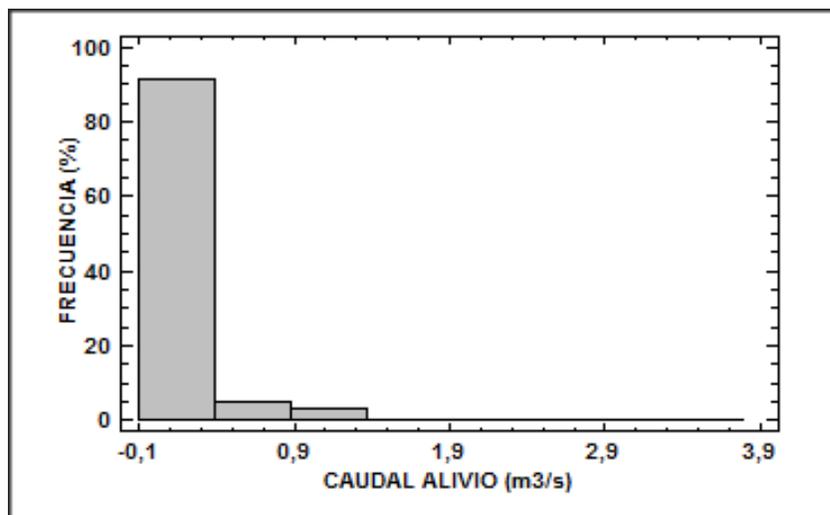


Figura 71. Histograma de frecuencia relativa para la variable caudal de alivio
Embalse Pao La Balsa.

Tabla 26:*Histograma de frecuencia relativa para la variable caudal de alivio*

Clase	Límite Inferior	Límite Superior	Punto Medio	Frecuencia	Frecuencia Relativa
	menor o igual	-0,1		0	0
*1	-0,1	0,3875	0,14375	3436	0,9129
2	0,3875	0,875	0,63125	188	0,0499
3	0,875	1,3625	1,11875	110	0,0292
4	1,3625	1,85	1,60625	12	0,0032
5	1,85	2,3375	2,09375	4	0,0011
6	2,3375	2,825	2,58125	11	0,0029
7	2,825	3,3125	3,06875	3	0,0008
8	3,3125	3,8	3,55625	0	0
	mayor de	3,8		0	0

*Nota: *Valores que ocurren con mayor frecuencia*

Los valores de caudal de alivio que se dan con mayor frecuencia se encuentran entre $-0,1 \text{ m}^3/\text{s}$ a $0,3875 \text{ m}^3/\text{s}$, siendo 0 el mínimo valor que toma la variable. Estos valores se dan con una frecuencia absoluta de 3436 y frecuencia relativa significativa del 91,29%

Descripción estadística resumida para la variable caudal ecológico del embalse Pao La Balsa, Estado Cojedes

A continuación se describe la variable caudal ecológico del embalse. Este caudal, es el necesario para preservar los valores ecológicos en el cauce del río.

Tabla 27:

*Resumen estadístico de la variable caudal ecológico. Embalse Pao La Balsa (2005-2015).
Coordenadas: N 9°35'39.3" 68°09'27.1" W*

Caudal ecológico (m³/s)	
Recuento	3764
Promedio	0,56
Mediana(P ₅₀)	0,39
Desviación Estándar	0,456
Coficiente de Variación	81,90%
Mínimo	1,16E-10
Máximo	1,77
Rango	1,77
Sesgo Estandarizado	17,13
Curtosis Estandarizada	-7,13
Primer Cuartil (P ₂₅)	0,19
Tercer Cuartil (P ₇₅)	0,91
Nivel de Confianza	95%

De la información de la Tabla 27 se obtiene un caudal ecológico promedio igual a 0,56 m³/s con una variabilidad de 0,456 m³/s. Entre el caudal mínimo ecológico y el caudal máximo ecológico registrado, existe una diferencia de 1,77 m³/s. Asimismo, el 50% de los valores están comprendidos entre 0,19 m³/s y 0,91 m³/s.

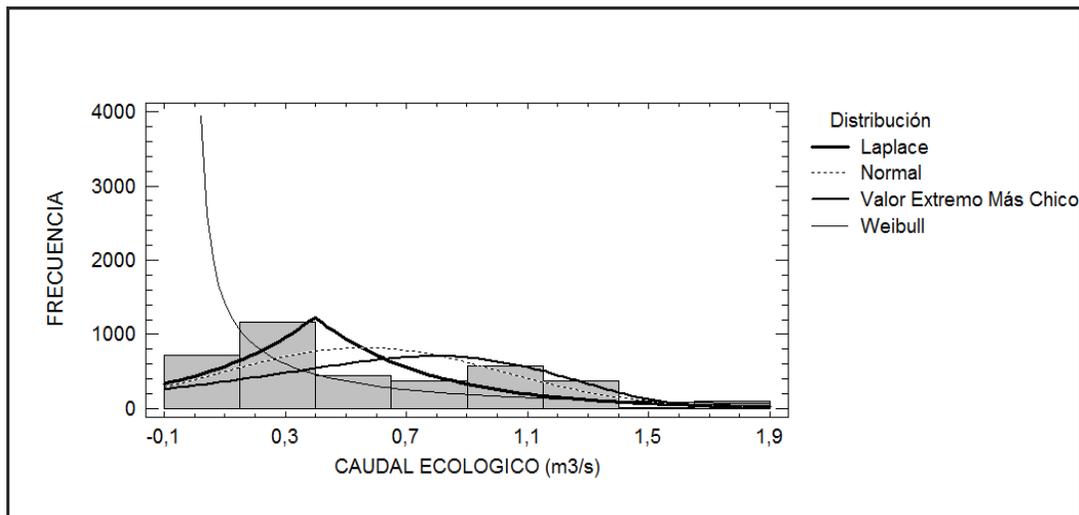


Figura 72. Ajuste de distribuciones para la variable caudal ecológico
Embalse Pao La Balsa

Tabla 28:

Comparación de distribuciones alternas para la variable caudal ecológico. Embalse Pao La Balsa

Distribución	Parámetros Est.	Log Verosimilitud	KS D
*Laplace	2	-2750,62	0,176974
Weibull	2	-397,739	0,247805
Valor extremo más pequeño	2	-2055	0,150327
Normal	2	-2389,37	0,180803

*Nota: *Distribución que más se ajusta a la variable*

En la Figura 72 se observa que la distribución de probabilidad que más se ajusta al comportamiento de la variable caudal ecológico es la distribución laplace, ya que presenta un estadístico log verosimilitud igual a $-2750,62$ de acuerdo a la Tabla 28.

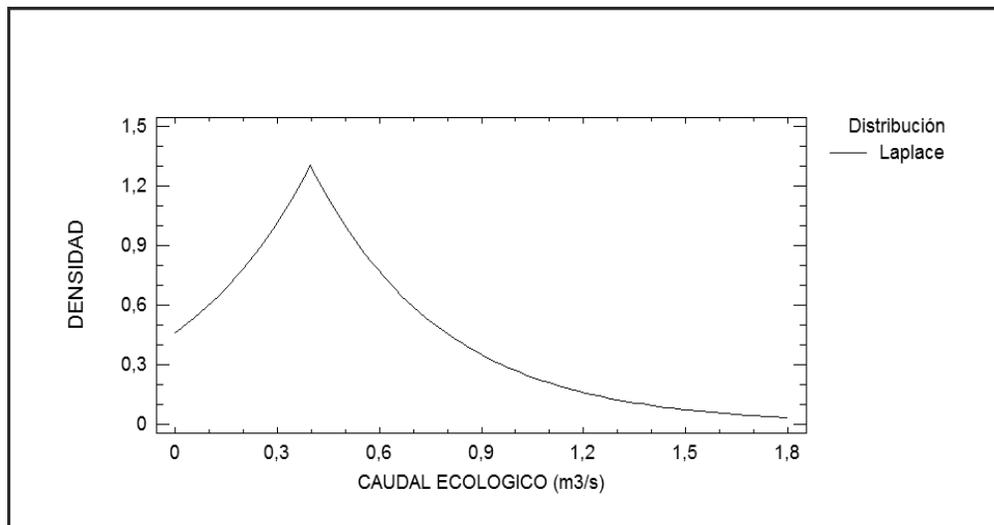


Figura 73. Gráfico de densidad para la variable caudal ecológico

Embalse Pao La Balsa.

De acuerdo con la figura 73, los valores de distribución de la variable caudal ecológico presentan una asimetría positiva dando lugar a un mayor número de años con caudales ecológicos inferiores a la media

A continuación, se muestra de que manera están distribuidos los datos y con qué frecuencia ocurren:

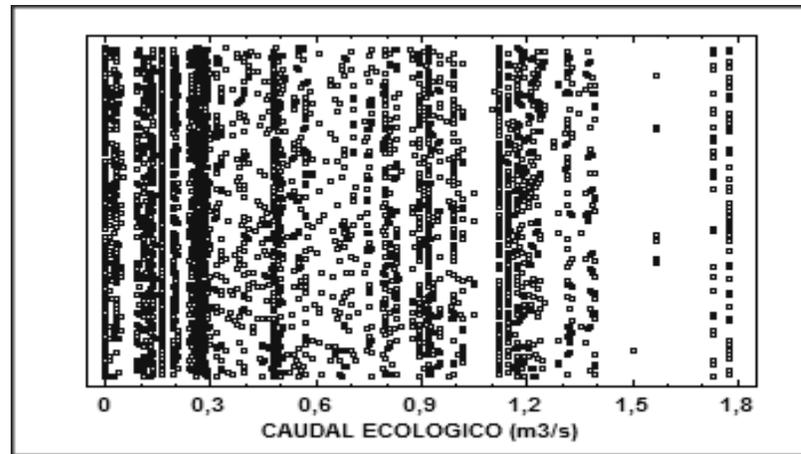


Figura 74. Gráfico de dispersión para la variable caudal ecológico
Embalse Pao La Balsa

En la Figura 74 se observa una alta dispersión de los datos, concentrándose por debajo de la media. Para respaldar dicha afirmación se tiene que el valor de coeficiente de variación es igual a 81,8956% de acuerdo al resumen estadístico presentado.

El coeficiente de variación es cercano al 100% por lo tanto existe alta variabilidad en los caudales ecológicos del embalse tal como se aprecia en la Figura 75, por lo tanto se toma la mediana como valor representativo del conjunto de datos.

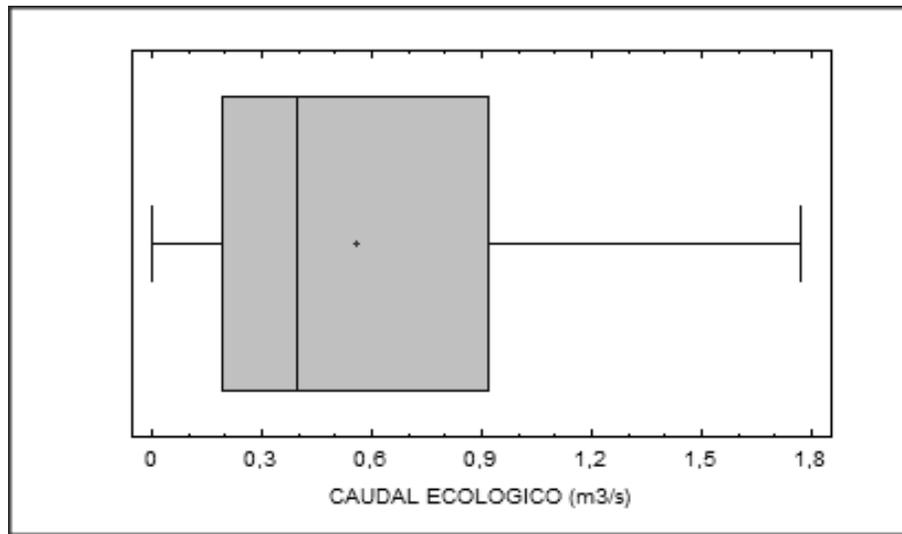


Figura 75. Diagrama de caja y bigotes para la variable caudal ecológico
Embalse Pao La Balsa

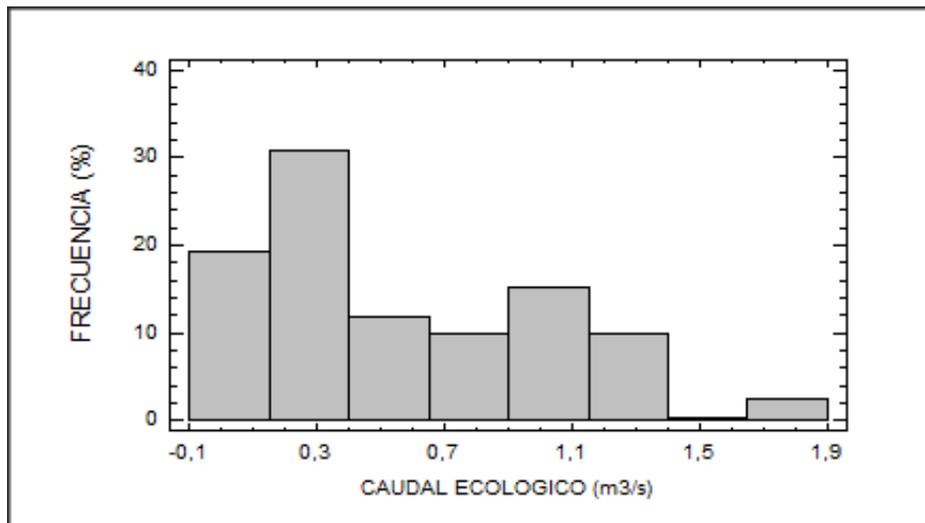


Figura 76. Histograma de frecuencia relativa para la variable caudal ecológico
Embalse Pao La Balsa

Tabla 29:*Histograma de frecuencia relativa para la variable caudal ecológico Embalse Pao La Balsa*

Clase	Límite Inferior	Límite Superior	Punto Medio	Frecuencia	Frecuencia Relativa
	menor o igual	-0,1		0	0
1	-0,1	0,15	0,025	725	0,1926
*2	0,15	0,4	0,275	1163	0,309
3	0,4	0,65	0,525	446	0,1185
4	0,65	0,9	0,775	373	0,0991
5	0,9	1,15	1,025	576	0,153
6	1,15	1,4	1,275	377	0,1002
7	1,4	1,65	1,525	9	0,0024
8	1,65	1,9	1,775	95	0,0252
	mayor de	1,9		0	0

*Nota: *Valores que ocurren con mayor frecuencia*

De acuerdo a la Tabla 29 los valores de caudal ecológico que se dan con mayor frecuencia se encuentran entre 0,15 m³/s y 0,4 m³/s, sin incluir éste último. Estos valores se dan con una frecuencia absoluta de 1163 y frecuencia relativa del 30,90%.

El valor representativo del conjunto de datos, la mediana, está dentro de la clase que ocurre con mayor frecuencia.

Descripción estadística resumida para la variable caudal de extracción del embalse Pao La Balsa, Estado Cojedes

A continuación se describe la variable caudal de extracción del embalse. Este caudal es con el cual sale el agua para la obra de toma, luego de allí llega a la estación de bombeo Pao I, con el fin de cumplir con el abastecimiento de la región central del país.

Tabla 30:

Resumen estadístico de la variable caudal de extracción. Embalse Pao La Balsa (2005-2015).

Coordenadas: N 9°35'39.3" 68°09'27.1" W

Caudal de extracción (m³/s)	
Recuento	3764
Promedio	0,230
Mediana(P ₅₀)	0,239
Desviación Estándar	0,031
Coefficiente de Variación	13,63%
Mínimo	0,032
Máximo	0,265
Rango	0,233
Sesgo Estandarizado	-69,641
Curtosis Estandarizada	146,857
Primer Cuartil (P ₂₅)	0,239
Tercer Cuartil (P ₇₅)	0,246
Nivel de Confianza	95%

De la información de la Tabla 30 se obtiene un caudal de extracción diario promedio igual a 0,230 m³/s con una variabilidad de 0,031 m³/s. Entre el caudal mínimo de extracción y el caudal máximo de extracción registrado, existe una diferencia de 0,233 m³/s. Asimismo, el 50% de los valores están comprendidos entre 0,239 m³/s y 0,246 m³/s.

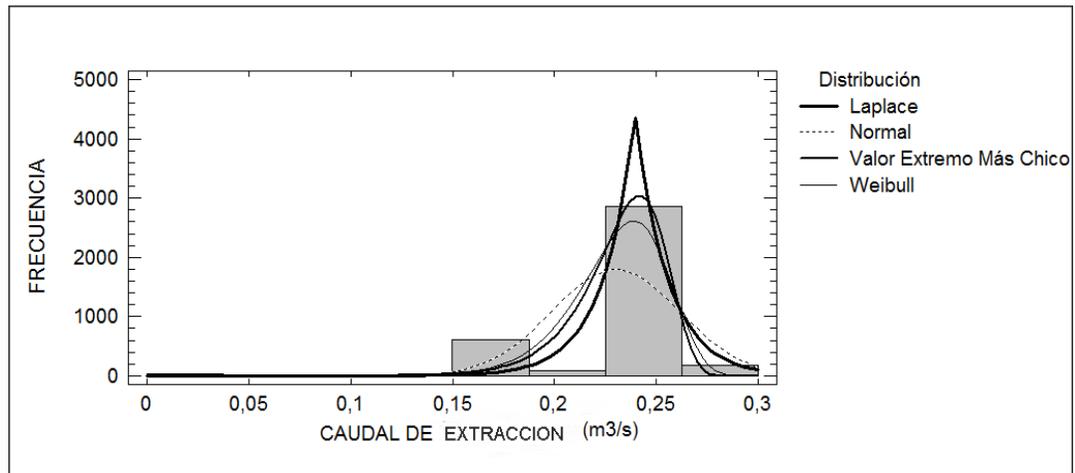


Figura 77. Ajuste de distribuciones para la variable caudal de extracción.

Embalse Pao La Balsa

Tabla 31:

Comparación de distribuciones alternas para la variable caudal de extracción. Embalse Pao La Balsa

Distribución	Parámetros Est.	Log Verosimilitud	KS D
*Valor extremo más pequeño	2	8987,61	0,393257
Weibull	2	8437,13	0,420211
Normal	2	7689,11	0,425542
Laplace	2	9198,71	0,305526

*Nota: *Distribución que más se ajusta a la variable*

En la Figura 77 se observa que la distribución de probabilidad que más se ajusta al comportamiento de la variable caudal de extracción, es la distribución valor extremo más pequeño, ya que presenta un estadístico log verosimilitud igual a 8987,61, de acuerdo a la Tabla 31.

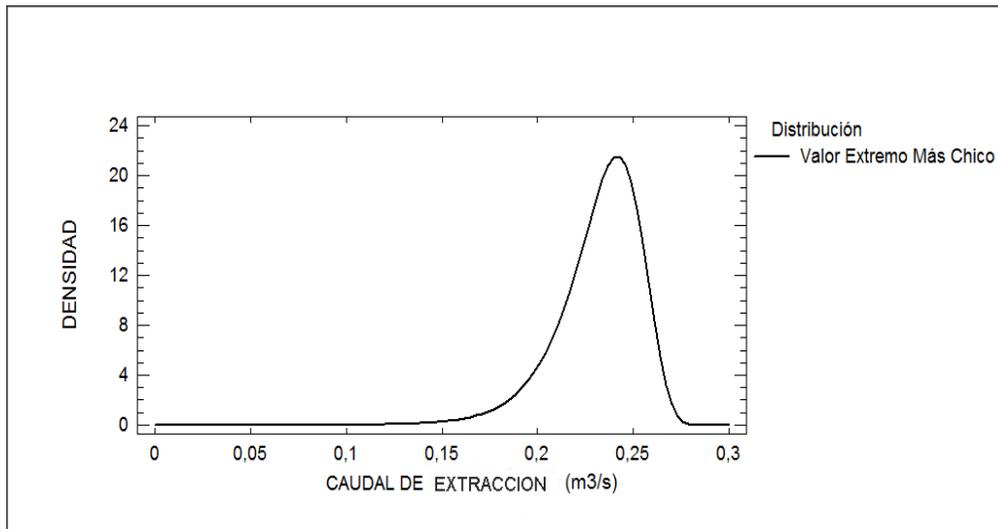


Figura 78. Gráfico de densidad para la variable caudal de extracción
Embalse Pao La Balsa.

De acuerdo con la Figura 78, los valores de distribución de la variable caudal de extracción, presentan asimetría negativa, dando lugar a un mayor número de años con caudales de extracción mayores a la media.

A continuación, se muestra de que manera están distribuidos los datos y con qué frecuencia ocurren:

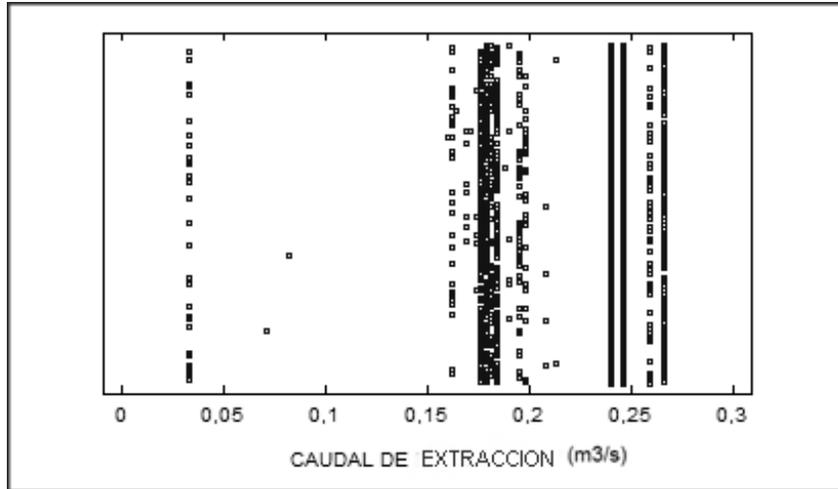


Figura 79. Gráfico de dispersión para la variable caudal de extracción
Embalse Pao La Balsa.

Ya que el coeficiente de variación es del 13,63%, el promedio sigue siendo el valor representativo de la distribución

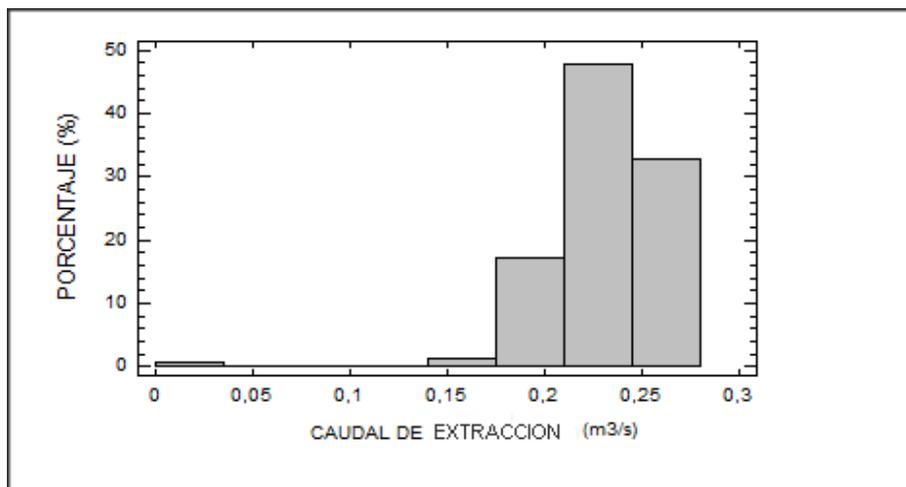


Figura 80. Histograma de frecuencia relativa para la variable caudal de extracción
Embalse Pao La Balsa.

Tabla 32:*Histograma de frecuencia relativa para la variable caudal de extracción. Embalse Pao La Balsa*

Clase	Límite <i>Inferior</i>	Límite <i>Superior</i>	Punto Medio	Frecuencia	Frecuencia Relativa
	menor o igual	0		0	0
1	0	0,035	0,0175	31	0,0082
2	0,035	0,07	0,0525	0	0
3	0,07	0,105	0,0875	2	0,0005
4	0,105	0,14	0,1225	0	0
5	0,14	0,175	0,1575	46	0,0122
6	0,175	0,21	0,1925	651	0,173
*7	0,21	0,245	0,2275	1803	0,479
8	0,245	0,28	0,2625	1231	0,327
	mayor de	0,28		0	0

*Nota: *Valores que ocurren con mayor frecuencia*

De acuerdo con la la Tabla 32, los valores de caudal de extracción que se dan con mayor frecuencia se encuentran entre 0,21 m³/s y 0,245 m³/s, sin incluir éste último. Estos valores se dan con una frecuencia absoluta de 1803 y frecuencia relativa del 47,90%.

Series de tiempo para las variables hidroenergéticas

A continuación se describen las series de tiempo para las variables hidroenergéticas del embalse Pao La Balsa, Estado Cojedes.

-Serie de tiempo para las variables elevación, volumen y área

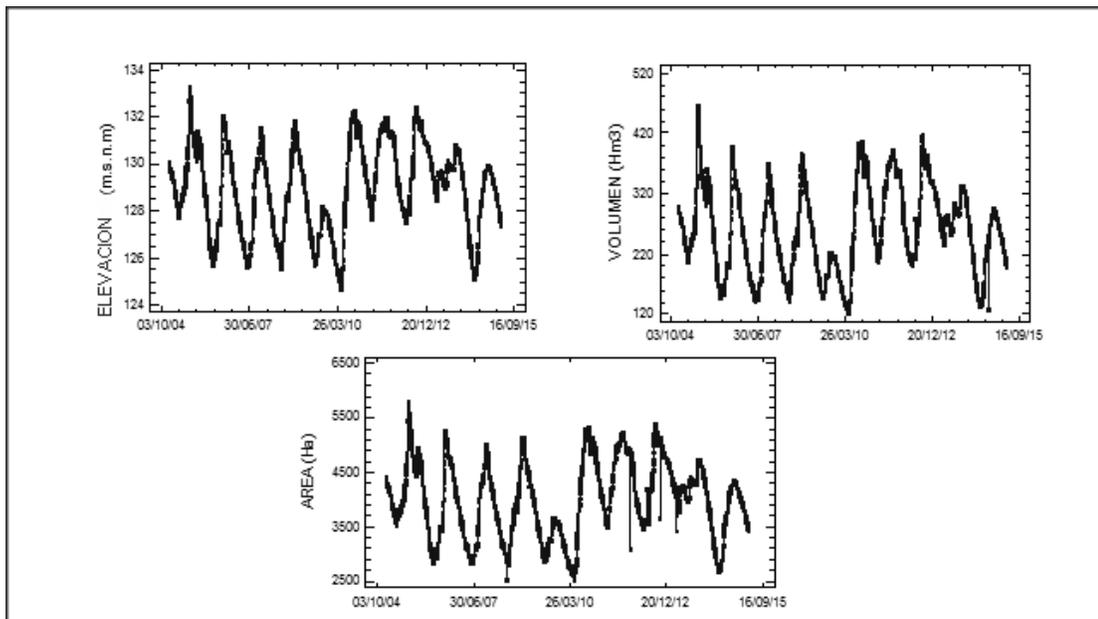


Figura 81. *Serie de tiempo para las variables elevación, volumen y área.
Embalse Pao La Balsa (2005-2015)*

De acuerdo a la Figura 81, no se podría hablar de una tendencia marcada ni al alza ni a la baja de las series, sin embargo, se tiene un comportamiento estacional traducido en subidas y bajadas que se repiten en un período de tiempo asociado a las estaciones del año. Se observa que para los meses entre julio y agosto se dan los valores más elevados de la serie, mientras que

para el primer trimestre del año se producen caídas considerables, donde se generan los picos más bajos.

Además de la componente estacional presente en las series, se evidencia una componente cíclica que inicia aproximadamente a mitad del año 2009 y se extiende hasta mitad del año 2010, este comportamiento se repite entre los años 2014 y 2015. Para estos períodos se observa que a mitad de año, se alcanzan los niveles mínimos aumentando muy poco en los meses de invierno, muy por debajo del nivel normal del embalse.

Otra característica importante de las series de tiempo mostradas, es que en general se mantienen cercana a su valor promedio. A partir de julio de 2010 hasta principios del 2014 se evidencia poca variabilidad en los datos comparados con los años anteriores.

-Serie de tiempo para caudal de entrada, caudal de salida, caudal de alivio, y caudal ecológico

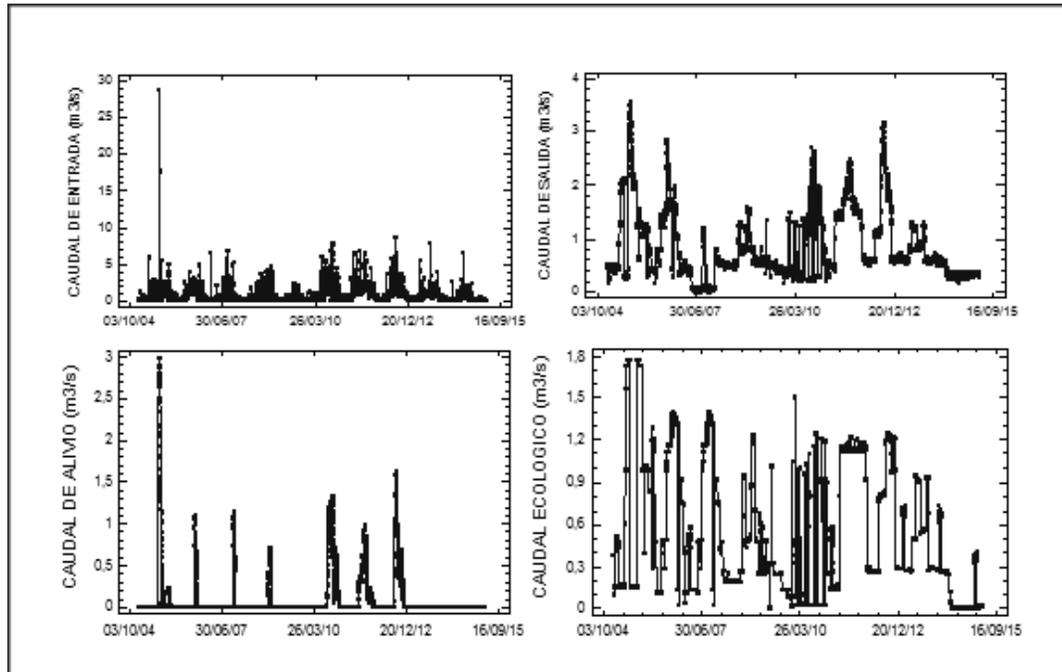


Figura 82. Serie de tiempo para los caudales característicos del embalse.
Embalse Pao La Balsa (2005 -2015)

Las series de tiempo de caudal de entrada, caudal de salida, caudal de alivio y caudal ecológico presentan las mismas características de las series de tiempo de elevación, volumen y área, son series estacionarias que no presentan tendencia alguna. No obstante, es importante recalcar que para agosto del año 2005 se produce un máximo en todas las series, esto debido a los eventos hidrológicos ocurridos para ese año.

En las Figuras 82 se muestra la serie de tiempo para cada uno de los caudales que se mencionan

Resumen estadístico para las variables hidroenergéticas del embalse Pao La Balsa, Estado Cojedes

Tabla 33:

Resumen estadístico para las variables hidroenergéticas. Embalse Pao La Balsa

Variable	Promedio	Mediana	Valor Representativo	Valor Max	Valor Min	Frecuencia de valores iguales o mayores al valor representativo
<i>ELEVACION(m.s.n.m)</i>	128,95	129,07	128,95	133,27	124,66	841/3764
<i>VOLUMEN(Hm3)</i>	260,30	257,30	260,30	464,00	121,20	1032/3764
<i>AREA(Ha)</i>	4005,44	4012	4005,44	5788	2525	956/3764
<i>CAUDAL DE ENTRADA(m3/s)</i>	0,86	0,46	0,46	28,84	0,00045	3696/3764
<i>CAUDAL DE SALIDA(m3/s)</i>	0,85	0,60	0,60	3,58	0,00263	1696/3764
<i>CAUDAL DE ALIVIO(m3/s)</i>	0,090	0	0	2,98	0	3436/3764
<i>CAUDAL ECOLÓGICO(m3/s)</i>	0,56	0,39	0,39	1,77	1,16E-10	1163/3764
<i>CAUDAL EXTRACCION(m3/s)</i>	0,230	0,239	0,230	0,265	0,032	1803/3764

Potencial Hidroeléctrico

Caudal disponible

El embalse Pao La Balsa dispone de caudales que pudiesen usarse para la generación de energía eléctrica. Estos caudales son: caudal ecológico, caudal de extracción y caudal de alivio.

Según HIDROCENTRO, el caudal de extracción equivale al 77% del caudal regulado del embalse el cual es igual a $9,8 \text{ m}^3/\text{s}$ mientras que el caudal ecológico representa solo el 21%. El caudal de alivio no se considera en este estudio, ya que solo ocurre en épocas lluviosas, cuando el nivel de la cresta del vertedero es superado por el nivel de aguas del embalse.

Según la empresa HIDROCENTRO desde el año 2001 se está extrayendo hasta $7,5 \text{ m}^3/\text{s}$ para cumplir con el propósito principal del embalse, el cual es abastecer de agua a la región central del país. Además se informa que se tiene proyectado incrementar la extracción hasta $15 \text{ m}^3/\text{s}$, ya que se espera aumentar la capacidad mecánica de los equipos de bombas. Es por esta razón, que se descarta su uso.

En este estudio se plantean dos alternativas que solo toman en cuenta el caudal ecológico como referencia para obtener un caudal de diseño.

Con el apoyo de la Tabla de frecuencia relativa de caudal ecológico (Ver Tabla 29) y la gráfica 83 se escoge un caudal de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ para la primera alternativa. Para la segunda alternativa es el mismo caudal, solo que por tratarse de una bifurcación que se genera en la tubería de gasto ecológico, el

caudal se divide en dos: 0,5 m³/s sigue por la tubería de gasto ecológico y 0,5 m³/s que sigue hacia la turbina.

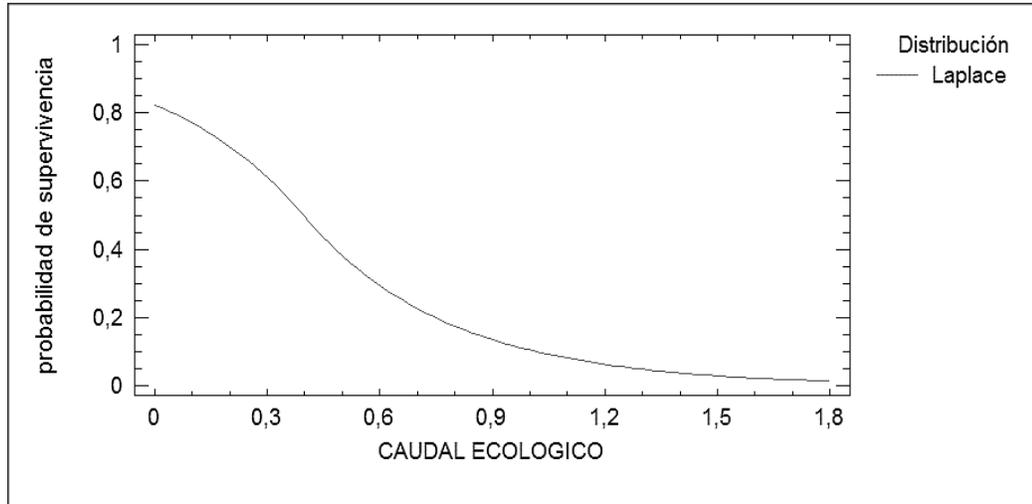


Figura 83. *Función supervivencia para la variable caudal ecológico.
Embalse Pao La Balsa.*

Para seleccionar la elevación o nivel en donde será dispuesto el túnel de conducción para la alternativa I y, con quien se establecerá referencia para obtener el salto de diseño en la alternativa II, se hace un estudio de supervivencia de la variable elevación para saber qué nivel presenta un alto porcentaje de supervivencia en el tiempo. En este trabajo de investigación se seleccionó la elevación 127 m.s.n.m, pues a pesar de que no se trata de la elevación promedio de aguas del embalse, presenta un porcentaje alto de supervivencia, ocurre con mucha frecuencia y además el pronóstico para la variable es favorable, obteniendo valores futuros superiores a él, con un nivel de confianza del 95%. En la Figura 84 se observa el pronóstico realizado para esta variable.

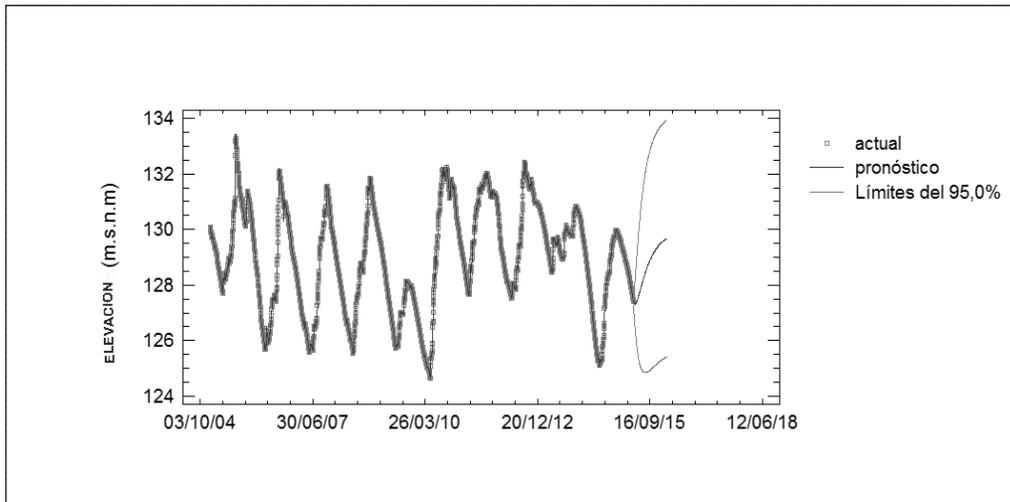


Figura 84. Pronósticos para la variable elevación
Embalse Pao La Balsa

Para el cálculo de la potencia aprovechable en el embalse, se calculan las alturas de diseño. Si la carga que tendrá la turbina es igual a toda la carga de agua del embalse: $H = \text{Elevación de diseño} - \text{elevación de fondo del embalse}$. En la Figura 85 se muestra la gráfica Área vs Capacidad obtenida con datos provenientes de la batimetría realizada en el embalse para el año 2006, donde puede conseguirse la elevación de fondo del embalse.

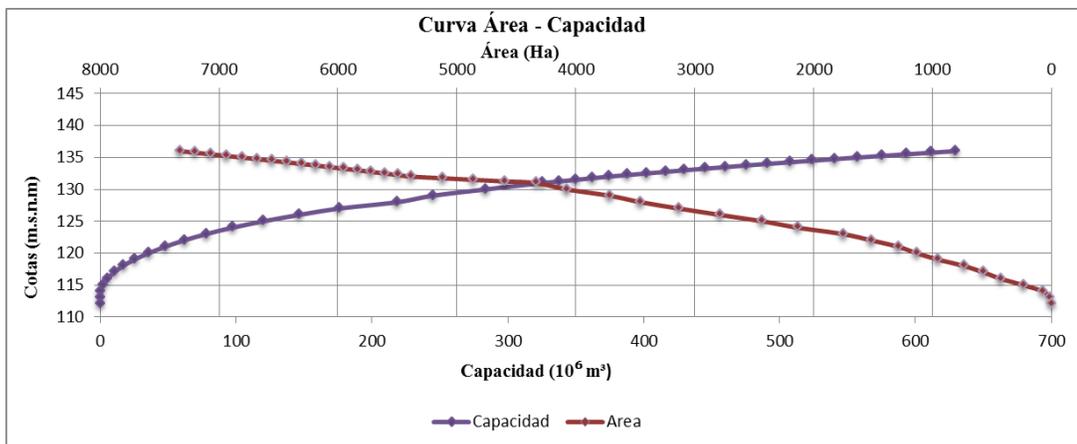


Figura 85. Pronósticos para la variable elevación
Embalse Pao La Balsa

Diseño de las obras civiles del sistema de generación hidroeléctrica en el Embalse Pao la Balsa, Estado Cojedes

En este trabajo de investigación se presentan dos alternativas de diseño de un sistema de generación hidroeléctrica, cada una de ellas viene acompañada con el trazado y ubicación de las obras civiles que la conforman.

ALTERNATIVA I

En esta alternativa se realiza el diseño de un sistema de generación hidroeléctrica del tipo “Centrales de embalse o regulación, por derivación de las aguas”.

El trazado y la ubicación de las obras a diseñar para esta alternativa, se muestran en la figura 86.



Figura 86. Ubicación de las obras civiles en el Embalse Pao la Balsa. Alternativa I

A continuación se presentan los resultados obtenidos del diseño de cada uno de los elementos que conforman el sistema de generación hidroeléctrica del embalse Pao La Balsa, asociados a la alternativa I.

Diseño del Túnel de Conducción

El túnel de conducción representa el canal que conducirá el agua necesaria del embalse Pao la Balsa, hacia la cámara de carga. El material de construcción del mismo es de concreto con acabado liso, con una rugosidad de 0,012.

La elevación del túnel de conducción en la entrada es de 127 m.s.n.m, ya que es un valor que tiene alto porcentaje de permanencia en el tiempo. De esta manera se asegura la elevación del agua en la cámara de carga, de donde parte la tubería forzada que llegará a la turbina.

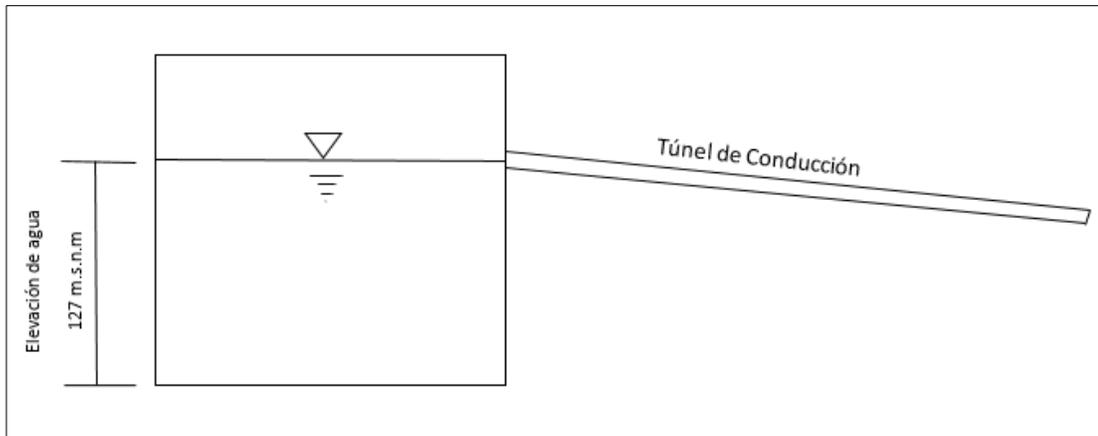


Figura 87. Elevación de diseño del túnel de conducción

Las Tablas 34, 35 y 36 que se muestran a continuación, presentan las dimensiones y elementos geométricos del túnel de conducción, así como también las características del flujo en el canal.

Tabla 34:*Dimensiones del túnel de conducción*

Diámetro (m)	1,070
Longitud (m)	129,850
Pendiente, i (%)	0,200

Según Castro (2006), los túneles o canales de conducción deben ser construidos con muy poca pendiente ya que el agua debe trasladarse a baja velocidad para evitar al máximo pérdidas de carga.

Tomando en cuenta lo antes mencionado, se tiene una pendiente de diseño del túnel de conducción igual a 0,20% de acuerdo con la Tabla 34, lo que indica que las pérdidas a generarse son bastante bajas, ya que no se produce una fricción considerable entre las partículas del agua y las paredes del túnel. Esto se debe también a la poca velocidad que lleva el fluido dentro del túnel.

Tabla 35:*Elementos geométricos del túnel de conducción*

Profundidad Normal, y_0 (m)	0,671
Espejo de agua, T (m)	1,035
Área, A (m ²)	0,594
Perímetro, P (m)	1,957
Radio Hidráulico, R (m)	0,304
Borde Libre, F (m)	0,399

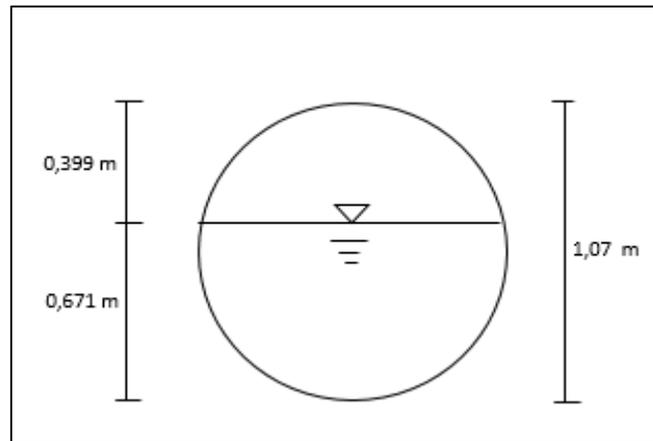


Figura 88. *Diámetro, profundidad del agua y borde libre del túnel de conducción*

El borde libre, según Sparrow (2008), debe ser siempre superior a los 30 cm para los canales más pequeños y hasta 1,20 m en canales donde transite caudales de hasta 85 m³/s.

El borde libre de diseño en el túnel, señalado en la Tabla 35, se encuentra dentro del rango establecido por Sparrow, con un valor de 0,3985 m. Esto indica que no existe rebose de agua que ocasione daños al terreno.

Por su parte, Llamozas (2010) recomienda un borde libre mínimo y máximo en función del gasto, donde indica un mínimo de 20 cm y un borde máximo de 50 cm cuando el caudal es de 1 m³/s. El borde libre calculado también entra en este rango de diseño, ya que para esta alternativa se cuenta con un caudal igual a 1 m³/s.

Tabla 36:

Características del flujo en el túnel de conducción

Velocidad V (m/s)	1,683
Número de Froude, F	0,709
Energía Especifica, E (m-kg/kg)	0,816

Según Bolinaga (1985) “El flujo critico es aquel en el cual las fuerzas de gravedad y de inercia ($F = 1$) están en equilibrio. El régimen subcritico ($V < V_c$) corresponderá a valores de $F < 1$ (fuerzas gravitatorias mayor que las de inercia) y el supercrítico ($V > V_c$) corresponderá a valores de $F > 1$ (fuerzas de inercia mayor que la gravedad)”

En la Tabla 36, se obtiene un valor de número de froude igual a 0,7093 y una velocidad de 1,683 m/s. De acuerdo a estos valores el flujo clasifica en subcritico, donde la velocidad por ser pequeña (característica de este flujo), no ocasiona erosión sobre los canales de concreto, siendo la velocidad máxima admisible para canales de hormigón igual a 5 m/s y la velocidad mínima de 0,75 m/s, según Llamozas (2010).

El número de froude además de estar relacionado con la velocidad, también se encuentra relacionado con la energía específica. Bolinaga (2010) comenta que “Un aumento de la energía específica produce efectos contrarios en las profundidades para cada tipo de flujo; en subcritico aumentan, mientras que en supercrítico disminuyen”.

El valor de la energía específica igual a 0,8159 m – kg/kg, presentada en la Tabla 36, corresponde al igual que la velocidad y el número de froude, a un flujo subcritico con una profundidad que supera a la crítica.

Diseño de la cámara de carga

Posteriormente, el túnel de conducción llevará el agua captada del embalse a la cámara de carga, donde se manejará la elevación del agua para obtener la altura necesaria, y así desarrollar la máxima potencia en la turbina.

Las dimensiones de la cámara de carga se presentan en la Tabla 37, mientras que las variables que se manejan para su obtención se muestran en las Tablas 38, 39, 40 y 41.

Tabla 37:

Dimensiones de la cámara de carga

Volumen Total , Vt (m ³)	51,190
Ancho, B (m)	7,996
Longitud total, Lt (m)	6,334
Altura total, ht (m)	3,534

A continuación se describe cada una de las variables necesarias para la obtención de las dimensiones antes señaladas.

Tabla 38:

Variables para determinar el volumen de la cámara de carga

Caudal de diseño, Qd (m ³ /s)	1,000
Área del túnel de conducción, A (m ²)	0,690
Pendiente del túnel de conducción, i	0,002

Tabla 39:

Variables para la determinación de la longitud total de la cámara de carga

Longitud necesaria, L1 (m)	5,873
Longitud por caída vertical, L1' (m)	4,731
Longitud horizontal de la rejilla, L2 (m)	0,461

Según Farinango (2013), la longitud necesaria debe ser comparada con el valor de la longitud por caída vertical del agua, adoptando como valor de longitud de diseño, el mayor. En este caso, la longitud mayor corresponde a la longitud necesaria L1 igual a 5,873 m de acuerdo con Tabla 39. Por lo tanto, L1 se adopta como longitud de diseño.

Las rejillas que se colocan en la cámara de carga son rejillas finas con una inclinación de 75° con respecto al eje de la tubería forzada, recomendado por Farinango (2013).

Tabla 40:

Variables para la obtención del ancho de la cámara de carga

Volumen total, Vt (m ³)	51,190
Altura mínima, h1 (m)	0,801

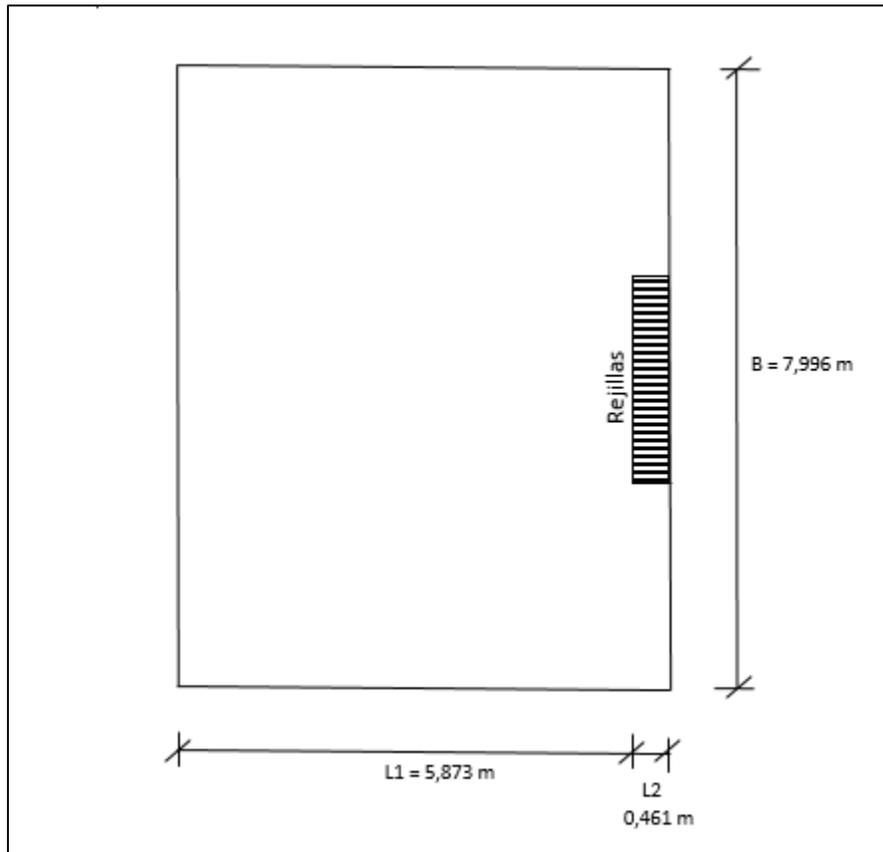


Figura 89. Sección en planta de la cámara de carga

Tabla 41:

Variables para la obtención de la altura total de la cámara de carga

Altura necesaria que evita el ingreso de sedimentos, $a1$ (m)	0,400
Diámetro interno de la tubería de presión, D (m)	0,908
Altura mínima de agua sobre el túnel de conducción, $h1$ (m)	0,801
Altura del agua en el desborde, h_v (m)	1,070
Borde Libre, B (m)	0,357

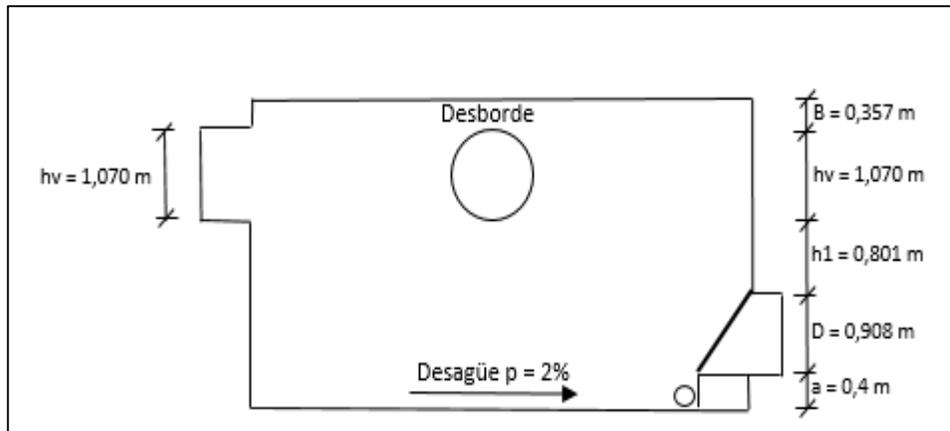


Figura 90. Sección en elevación de la cámara de carga

Farinango (2013) recomienda una altura necesaria que evita el ingreso de sedimentos entre un rango de 0,3 y 0,5 m, debido a esto se toma el promedio del rango recomendado con un valor de 0,4 expresado en la Tabla 41

De acuerdo con la Tabla 41, el valor de borde libre es igual a 0,357 m. Este valor es 1/3 de la altura bruta de acuerdo a Farinango (2013)

Diseño de la Tubería Forzada

El conducto por el cual el agua es conducida desde la cámara de carga hasta la turbina, se denomina tubería forzada.

Este tipo de tubería se diseña con un material de acero comercial, siendo este el más común en la elaboración de tuberías forzadas, ya que las pérdidas de carga son bajas y además soportan altas presiones.

A continuación, se presentan las dimensiones de la tubería forzada en la Tabla 42.

Tabla 42:*Dimensiones de la tubería forzada*

Diámetro Interno, d (m)	0,907
Diámetro Externo, D (m)	0,908
Longitud, L (m)	117,121
Espesor, e (mm)	1,465

Los valores de espesor y diámetro externo presentados en la Tabla 42 son llevados a valores comerciales, quedando de esta manera una tubería forzada de diámetro comercial igual a 0,91 m (36”) y espesor de 7,95 mm.

El espesor de la tubería forzada debe compararse con el espesor calculado para el fenómeno de golpe de ariete. A continuación en la tabla 43 se presentan las variables que intervienen en la obtención del espesor debido al golpe de ariete.

Tabla 43:*Variables para la obtención del diámetro interno de la tubería forzada*

Caudal de diseño, Q_d (m ³ /s)	1,00
Altura Útil, H_u (m)	8,210
Altura por Golpe de ariete, h_s (m)	2,463

Se toma una altura por golpe de ariete del 30% de la altura útil, dando como resultado una altura de 2,463 m, señalado en la Tabla 43.

El criterio utilizado para hallar la altura por golpe de ariete, es expuesto por Farinango (2013), a diferencia de que él recomienda el 30% de la altura bruta. Debido a que se está diseñando una central hidroeléctrica de regulación

por derivación de las aguas, la altura aprovechable es la útil, siendo la altura por golpe de ariete 30% de la altura útil.

Tabla 44:

Variables para la obtención del espesor de la tubería forzada por golpe de ariete

Presión de Diseño, P (m.c.a)	8,210
Carga del trabajo del material, τ (Mpa)	98,100
Tolerancia o sobreespesor por corrosión, C	1,000
Sobrepresión por el Golpe de ariete, Δp (m.c.a)	10,569
Coeficiente de trabajo del acero, K (Kg/mm ²)	13,000
Espesor por el golpe de ariete, e (mm)	0,286

En la Tabla 44 se muestra un valor para la tolerancia o sobreespesor por corrosión igual a 1, y el espesor producido por el golpe de ariete igual a 0,286 mm.

La tolerancia por corrosión según Ruiz (2013), es clasificada según la forma de los tramos de la tubería forzada. Para tramos rectos $C = 1$ y para tramos curvos $C = 1,5$. En este caso, el valor de la tolerancia por corrosión corresponde a tramos rectos, por lo tanto $C = 1$.

Adicionalmente, Ruiz (2013) compara el espesor de la tubería por el golpe de ariete con el espesor de diseño, seleccionando el mayor de ellos. Ese espesor será quien va a resistir las sobrepresiones generadas en la tubería debido al fenómeno golpe de ariete. En este caso, el espesor de diseño es el mayor.

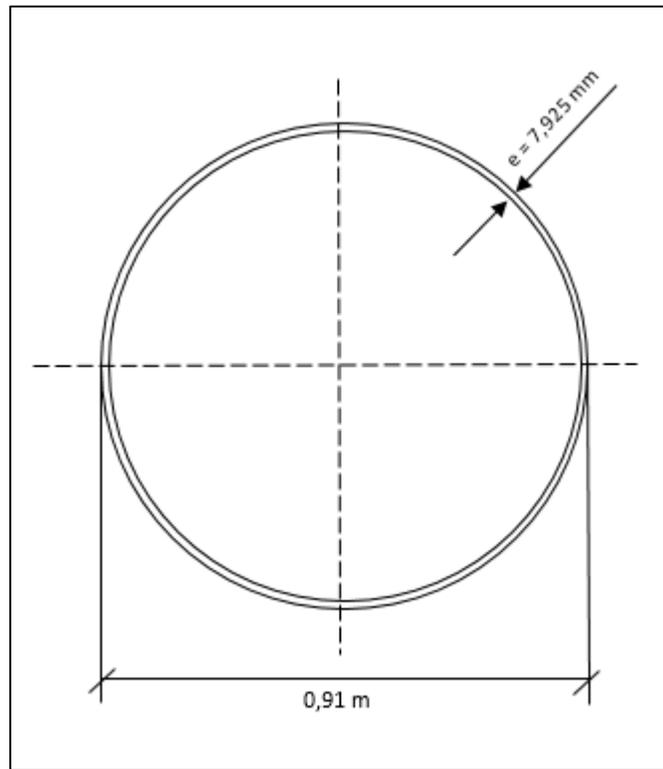


Figura 91. Sección transversal de la tubería forzada. Diámetro y espesor comercial

Tabla 45:

Pérdidas de carga en la tubería forzada

Pérdida por fricción (m)	0,205
Pérdida por codos (m)	0,024
Pérdida por válvulas (m)	0,066
Pérdida por rejillas (m)	0,031

La pérdida por fricción es de 0,205 m, de acuerdo a la Tabla 45. El valor de las pérdidas por fricción o pérdidas primarias para este caso se consideran bajas, esto se debe al tipo de material de la tubería forzada (acero comercial) y el régimen del flujo (turbulento).

En la Tabla 45 se presentan las pérdidas en la tubería por los siguientes accesorios: dos codos que producen una pérdida de 0,024 m, con un coeficiente de pérdida de 0,1 correspondiente a codos poco pronunciados; las rejillas con una pérdida de 0,031 m, y con separación entre barrotes de 30 mm y las pérdidas por válvulas de 0,066m con un coeficiente de pérdida 0,25.

Diseño del túnel de desagüe

El túnel de desagüe es el canal encargado de restituir el agua turbinada al Rio Pao. Al igual que el túnel de conducción, el material de construcción es de concreto con acabado liso.

A continuación en las tablas 46, 47 y 48 se muestran las dimensiones del túnel, elementos geométricos y las características del flujo.

Tabla 46:

Dimensiones del túnel de desagüe

Diámetro (m)	1,371
Longitud (m)	102,980
Pendiente, i (%)	0,150

Al igual que en el túnel de conducción, la pendiente del canal de desagüe es baja, con un valor de 0,15% de acuerdo a la Tabla 46. Por lo tanto, las pérdidas generadas son reducidas.

Tabla 47:

Elementos geométricos del túnel de desagüe

Profundidad Normal, y_0 (m)	0,617
Espejo de agua, T (m)	1,363
Área, A (m^2)	0,658
Perímetro, P (m)	2,036
Radio Hidráulico, R (m)	0,323
Borde Libre, F (m)	0,754

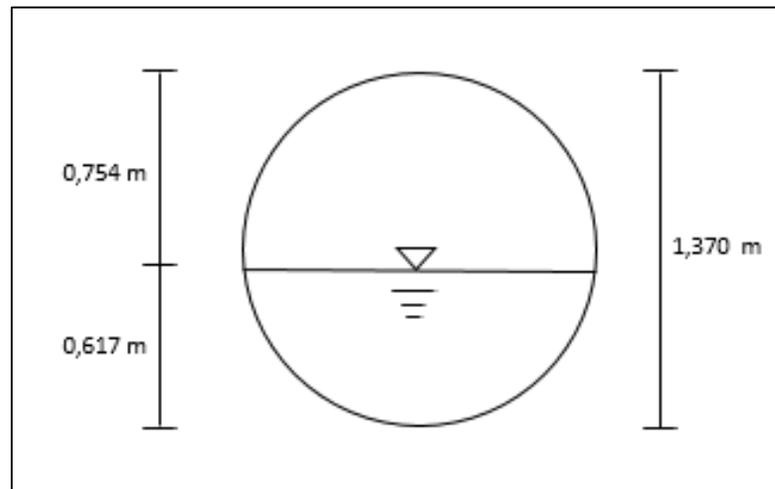


Figura 92. *Diámetro, profundidad del agua y borde libre del túnel de desagüe*

El borde libre es igual a 0,7535 m señalado en la Tabla 47. Este cumple con las restricciones de altura en el diseño de canales.

Tabla 48:

Características del flujo en el túnel de desagüe

Velocidad V (m/s)	1,520
Número de Froude, F	0,659
Energía Específica, E (m-kg/kg)	0,745

Las características del flujo toman el mismo criterio descrito en el túnel de conducción. Los valores de velocidad, el número de froude y la energía específica clasifican al flujo como subcrítico.

Adicionalmente, la velocidad de diseño cumple con las velocidades máximas y mínimas admisibles en canales revestidos con hormigón para que no ocurra erosión.

Diseño de la Turbina

✓ Selección de la Turbina

Los parámetros que deben tomarse en cuenta para la selección de la turbina son los mostrados en la Tabla 49

Tabla 49:

Parámetros para la selección de la Turbina

Altura Neta, Hn (m)	7,883
Caudal de Diseño, Qd (m ³ /s)	1,000
Eficiencia, e (%)	95,000
Potencia de Diseño, Pd (KW)	73,394

Por medio de la Figura 93, la turbina que se ajusta a una potencia de 73,394 kW, altura neta de 7,883 m y caudal de diseño de 1 m³/s, es la turbina Francis. Esta turbina opera en un rango que va desde los 50 kW hasta 2000 Kw.

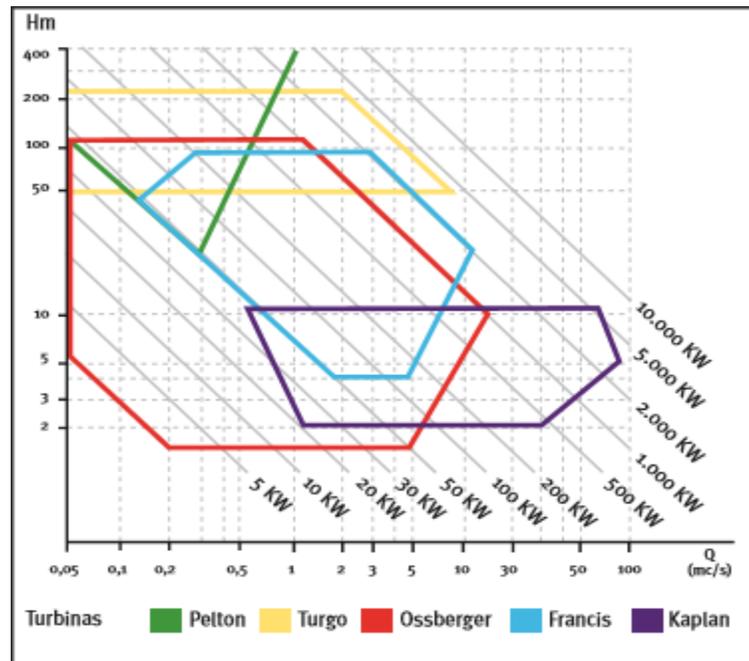


Figura 93. Campo de utilización de los diferentes tipos de turbinas
Fuente: Minicentrales hidroeléctricas (2006)

La turbina Francis según Valencia (2015), "... se diseñan de forma individual para cada aprovechamiento hidroeléctrico, a efectos de lograr el máximo rendimiento posible, habitualmente más del 90%". Bajo esta premisa, para esta alternativa se escoge la eficiencia de diseño de la turbina igual al 95%.

✓ *Parámetros para el diseño de la turbina*

A continuación, en la Tabla 50, se presentan los parámetros de diseño para los elementos que componen la turbina Francis.

Tabla 50:

Parámetros para el diseño de los elementos de la turbina

Velocidad Específica, n_s (rpm)	168,982
Velocidad Síncrona de rotación, n (rpm)	225,000
Frecuencia, f (Hz)	60,000
Número de Polos, P	16,000
Coefficiente de Velocidad Periférica, Φ	0,733

De la Tabla 50 se obtiene una velocidad específica igual a 168,982 rpm, clasificando a la turbina como una “Francis Normal”.

La velocidad síncrona de rotación de diseño expuesta en la Tabla 50, es de 225 rpm, esta velocidad de la turbina está relacionada con los 16 números de pares de polos, quienes hacen que la turbina gire a una frecuencia de 60 Hz (frecuencia usada en Venezuela)

✓ *Diseño de los elementos de la Turbina*

Los elementos a diseñar para la turbina Francis son: rodete, carcasa y el tubo de aspiración.

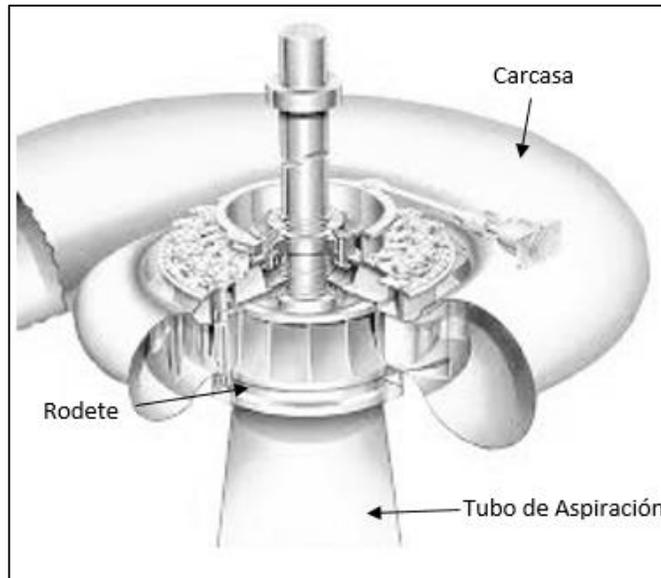


Figura 94. Montaje de los elementos a diseñar para la turbina Francis

- *Rodete*

Es el elemento que distribuirá el caudal de forma radial a axial por medio de los alabes o paletas de la turbina.

A continuación, en la Tabla 51 se muestran las dimensiones del rodete

Tabla 51:

Dimensiones del rodete

Diámetro de descarga, D3 (m)	0,772
Diámetro medio, D2 (m)	0,754
Diámetro de entrada, D1 (m)	0,741
Distancia de D1 al eje del distribuidor, H1 (m)	0,105
Distancia de D3 al eje del distribuidor, H2 (m)	0,263

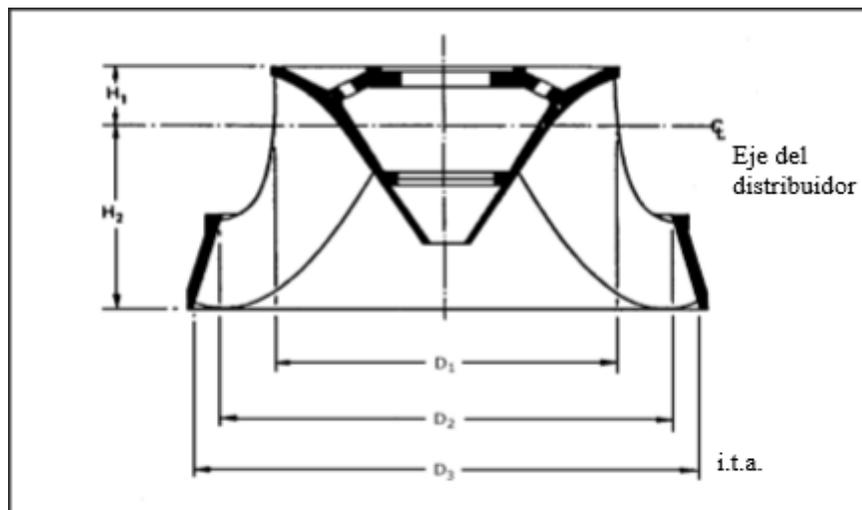


Figura 95. Dimensiones del Rodete

El diámetro de descarga D3, es una dimensión en común para el diseño del rodete, la carcasa y el tubo de aspiración.

- *Carcasa*

A través de este elemento ingresa el caudal de diseño a la turbina, haciendo que el flujo siga un comportamiento radial debido a su forma espiral.

Tabla 52:

Resumen de las dimensiones de la carcasa

A (m)	0,837
B (m)	1,100
C (m)	1,245
D (m)	1,382
E (m)	1,271
F (m)	1,373
G (m)	1,128
H (m)	0,984
I (m)	0,162
L (m)	0,744
M (m)	0,463

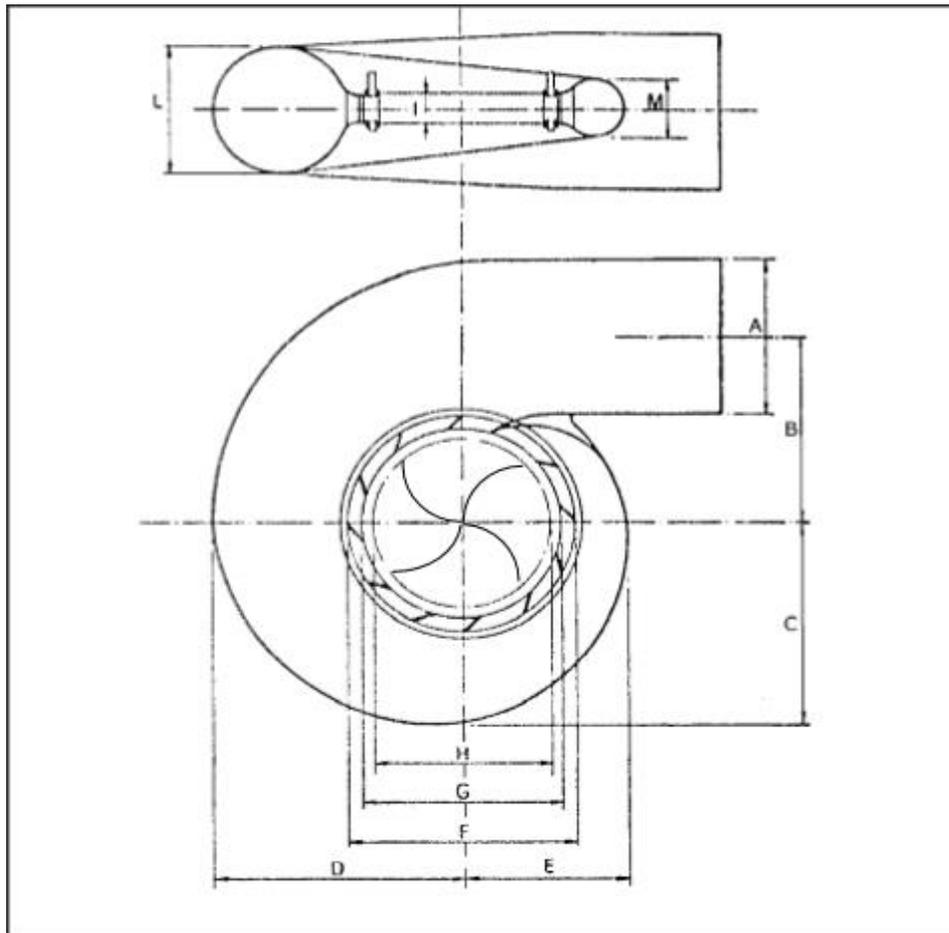


Figura 96. Dimensiones de la carcasa

El valor de la dimensión “A” igual a 0,837 m, corresponde al diámetro de entrada de la carcasa, la cual será conectada a la tubería forzada de diámetro 0,91 m.

Según García y Nava (2013), el diámetro de la tubería forzada debe ser mayor al diámetro de entrada de la carcasa de la turbina. La reducción del área transversal de la tubería forzada al entrar en contacto con la carcasa produce un efecto denominado “Efecto Venturi”, este consiste en el aumento de la velocidad del fluido y disminución de la presión del mismo al pasar por una sección de menor área. Este efecto se basa en el principio del Teorema de

Bernoulli el cual afirma que un flujo incomprensible y no viscoso se mantiene constante a lo largo de una línea de corriente, por lo tanto cuando la velocidad aumenta, se mantiene el equilibrio disminuyendo la presión, existiendo una compensación en el fluido.

En este caso, el incremento de la velocidad es favorable, ya que el agua experimenta una aceleración al pasar de un diámetro mayor a un diámetro menor, esto produce en los alabes una mayor velocidad y por ende un aumento en la eficiencia de la turbina.

- *Tubo de Aspiración*

Es el elemento que recupera la mayor parte posible de la energía cinética a la salida del rodete.

En la tabla 53 se muestran las dimensiones que requiere el tubo de aspiración para recuperar la energía cinética del agua.

Tabla 53:

Dimensiones del tubo de aspiración

N (m)	2,120
O (m)	1,284
P (m)	1,058
Q (m)	0,551
R (m)	1,235
S (m)	3,959
T (m)	1,183
U (m)	0,485
V (m)	1,095
Z (m)	2,186

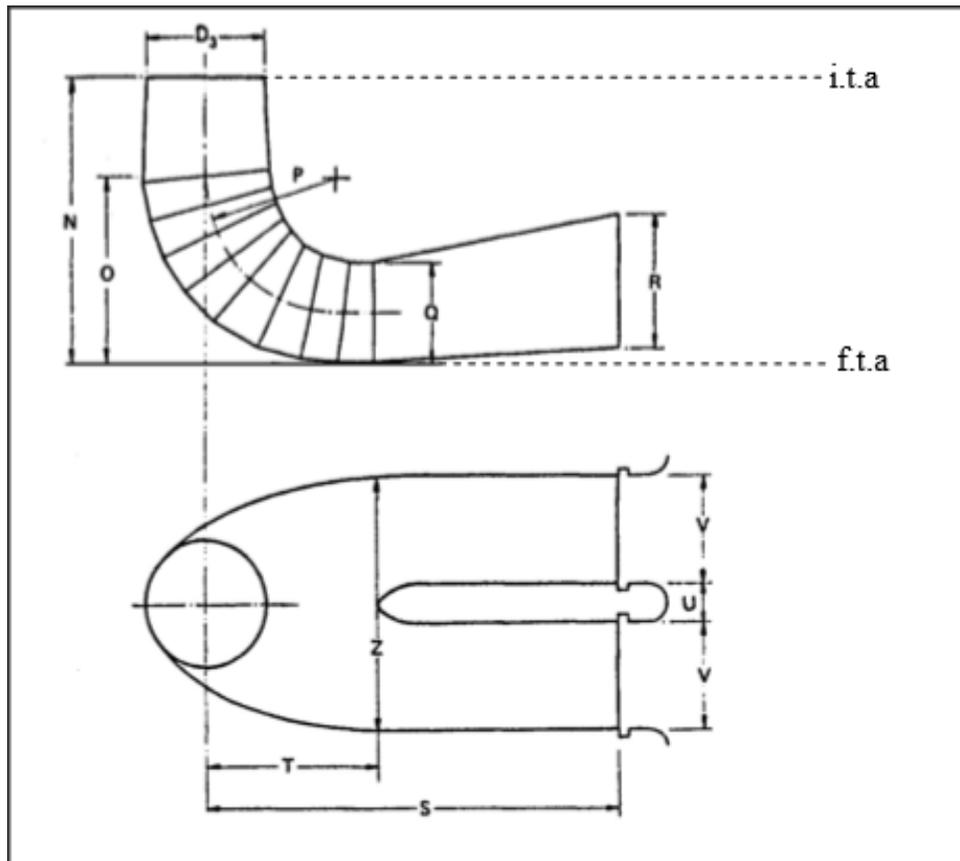


Figura 97. Dimensiones del tubo de aspiración

La tubería de aspiración que dispone el agua turbinada, tiene un diámetro de 1,235 m, mientras que el canal de desagüe que recibe este caudal tiene un diámetro de 1,37 m.

Para este caso, se usa el mismo principio de Bernoulli y Venturi en la unión tubería forzada – carcasa, con la diferencia de que en la unión tubería de aspiración – túnel de desagüe, aumenta el área de la sección transversal ocasionando una disminución de velocidad y un aumento en la presión en el agua.

La disminución de la velocidad evita que se produzca erosión en el canal aguas abajo.

Dimensionamiento de la Casa de Maquinas

Las dimensiones de la casa de máquinas son determinadas tomando en cuenta la posición del eje de la turbina. Para esta alternativa se diseñó la turbina en posición del eje vertical.

Tabla 54:

Dimensiones de la casa de máquinas

Longitud (m)	9,000
Altura (m)	12,000
Ancho (m)	8,000
Área (m)	72,000

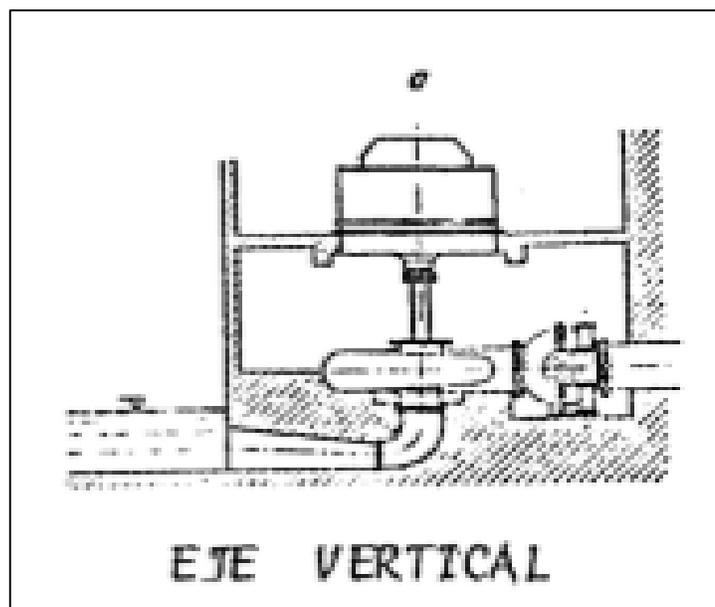


Figura 98. Posición del sistema electromecánico en eje vertical

ALTERNATIVA II

En esta alternativa se plantea el uso de la tubería de riego del embalse, como tubería forzada, mediante una bifurcación ó empalme con una tubería del mismo diámetro y material. De esta manera se direcciona parte del caudal ecológico hacia la turbina para la producción de energía eléctrica, y la otra parte continua por la tubería de riego.

Para ubicar el empalme en la tubería de riego, se toma como referencia la bifurcación existente en la tubería de abastecimiento de agua, la diferencia radica en que la instalación de la tubería de empalme en la tubería de gasto ecológico tendrá una dirección de 90° con respecto al eje de la misma.

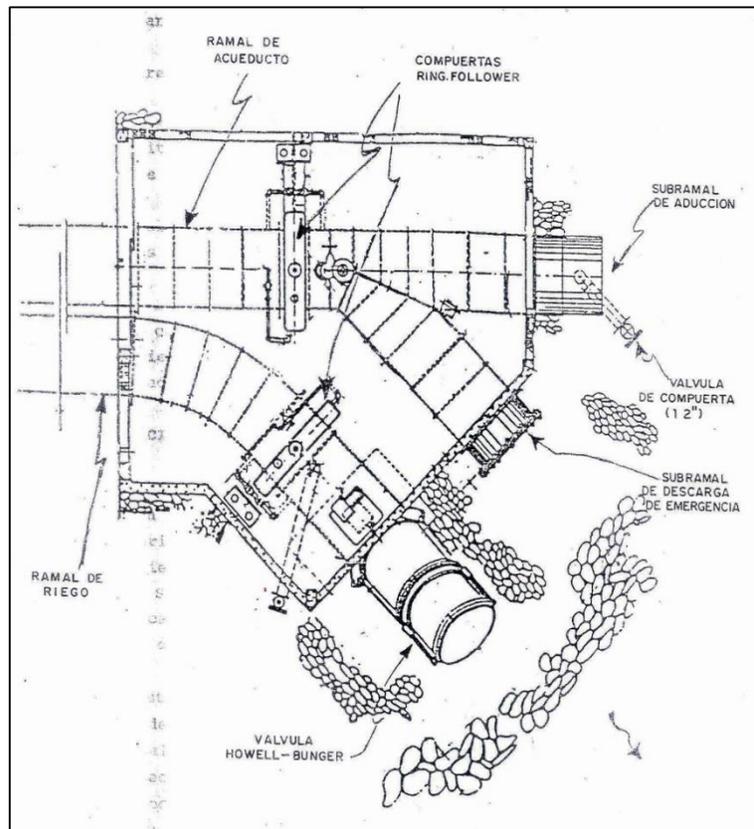


Figura 99. Representación de la bifurcación de la tubería de abastecimiento.

Embalse Pao La Balsa

En la Figura 100 se señala la ubicación de las obras civiles asociadas a esta alternativa.



Figura 100. Ubicación de las obras civiles en el Embalse Pao la Balsa. Alternativa II

Se observa que la tubería de empalme parte de la tubería de riego y sale a través de la casa de válvulas, para finalizar en la casa de máquinas donde se sitúa la turbina del sistema de generación hidroeléctrica propuesto.

Finalmente el agua turbinada es descargada al río Pao por medio del túnel de desagüe.

Diseño de la Tubería de empalme

La tubería de empalme se diseña con el mismo material de la tubería de riego, siendo este acero comercial.

En la Tabla 55 y 56, se muestran los parámetros para el diseño de la tubería de empalme como también las pérdidas de carga que se generan a lo largo de la tubería forzada.

Tabla 55:

Parámetros de dimensionamiento de la tubería de empalme

Longitud, LE (m)	13,500
Diámetro, DE (m)	2,000
Pendiente Longitudinal (%)	1,500
Angulo de Bifurcación (grados)	90
Caudal en el Empalme, QE (m ³ /s)	0,5

El diámetro de la tubería de empalme es de 2 m, señalado en la Tabla 55. Se diseña con un diámetro igual que la tubería seleccionada, con la finalidad de generar una repartición equitativa del caudal de diseño. Una vez que este caudal equivalente a 1 m³/s entra por la tubería de empalme, se divide en caudales de 0,5 m³/s.

Tabla 56:*Perdidas de carga en la tubería forzada*

Pérdida por fricción (m)	0,564
Pérdida por codos (m)	0,012
Pérdida por válvulas (m)	0,031
Pérdida por rejillas (m)	0,066
Pérdida por Bifurcación (m)	0,012

Las pérdidas en esta alternativa se calculan con una velocidad de 0,318 m/s, velocidad del flujo en la tubería forzada (unión de la tubería de riego con la tubería de empalme) y con los coeficientes de pérdidas correspondientes a los accesorios como: codos, válvulas y rejillas, usados en la alternativa I, dando como resultado las pérdidas señaladas en la Tabla 56.

La pérdida por bifurcación tiene un valor de 0,012 m, con K igual a 0,92 para la tubería de empalme y un valor de k igual a 0,01 para la rama que sigue la misma dirección de la tubería antes de la bifurcación.

Diseño del túnel de desagüe

A continuación se muestran las dimensiones del túnel de desagüe y elementos geométricos. El túnel es de concreto con acabado liso.

Tabla 57:*Dimensiones del túnel de desagüe*

Diámetro (m)	1,07
Longitud (m)	13,660
Pendiente, i (%)	0,15

De acuerdo con la Tabla 57, la pendiente del túnel de desagüe es igual a 0,15%. Esta pendiente es óptima en la construcción de canales, ya que se evita en la medida de lo posible las pérdida de carga.

Tabla 58:

Elementos geométricos del túnel de desagüe

Profundidad Normal, yo (m)	0,4805
Espejo de agua, T (m)	1,0644
Área, A (m ²)	0,3914
Perímetro, P (m)	1,5715
Radio Hidráulico, R (m)	0,2490
Borde Libre, F (m)	0,5895

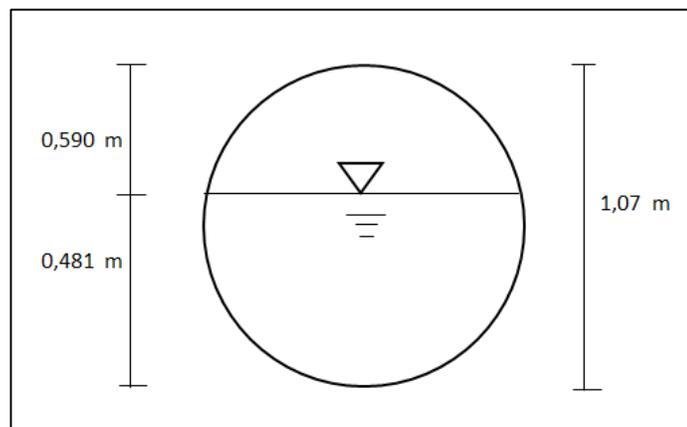


Figura 101. *Diámetro, profundidad del agua y borde libre del túnel de desagüe*

Llamozas (2010), establece valores de borde libre máximo y mínimo para varios caudales de diseño. Para un caudal de diseño de 0,5 m³/s, el mínimo de borde libre es de 0,15 m y el máximo de 0,4 m.

Para el túnel de desagüe, donde transita un caudal igual a $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$, el borde libre de diseño es de $0,589 \text{ m}$ presentado en la Tabla 58. Este valor no se encuentra dentro del rango establecido por Llamozas, sin embargo, está por encima del valor máximo de borde libre, lo que ocasiona un sobredimensionamiento del canal haciendo que la altura de este aumente.

El sobredimensionamiento es premeditado, ya que por el diámetro de salida del tubo de aspiración, la altura del túnel está obligada a ser mayor para así disminuir la velocidad del agua a la salida de la turbina y no ocasionar socavamiento en el túnel.

Tabla 59.

Características del flujo en el túnel de desagüe

Velocidad V (m/s)	1,2775
Número de Froude, F	0,6727
Energía Especifica, E (m-kg/kg)	0,5637

Al igual que en la alternativa I, las características del flujo en el túnel de desagüe corresponden al tipo de flujo subcrítico. Además se cumple con las velocidades máximas y mínimas admisibles en canales revestidos con hormigón, indicado por Llamozas (2010).

Diseño de la Turbina

✓ Selección de la Turbina

En la siguiente tabla se muestran los parámetros que se requieren para la selección del tipo de turbina.

Tabla 60:

Parámetros para la selección de la turbina

Altura Neta, Hn (m)	15,872
Caudal de Diseño, Qd (m ³ /s)	0,500
Eficiencia, e	0,950
Potencia de Diseño, Pd (Kw)	73,884

La potencia de diseño es de 73,884 kW, expuesta en la Tabla 60, potencia que clasifica junto con el caudal y la altura neta de diseño, en una turbina Francis.

✓ Parámetros para el diseño de la turbina

Como se mencionó en la alternativa I, el diseño de la turbina viene dado por el diseño de cada uno de sus elementos.

Tabla 61:

Parámetros para el diseño de los elementos de la turbina

Velocidad Especifica, ns (rpm)	94,259
Velocidad Síncrona de rotación, n (rpm)	300
Frecuencia, f (Hz)	60
Numero de Polos, P	12
Coefficiente de Velocidad Periférica, Φ	0,552

De acuerdo con la Tabla 61, la velocidad específica tiene un valor de 94,259 rpm, clasificando la turbina en “Francis Lenta”.

De acuerdo a la ecuación de la velocidad específica:

$$n_s = \frac{\sqrt{P_{util}} \times n}{H_{neta}^{\frac{5}{4}}} \quad 4.1$$

se analiza que para alturas netas de gran magnitud, dada una potencia y velocidad síncrona de rotación, se requiere de una máquina de baja velocidad específica, mientras que para bajas alturas netas, se necesita una máquina de alta velocidad específica. En este caso, dado que la velocidad específica de diseño es baja, la altura neta es considerada de gran magnitud.

La velocidad síncrona de rotación de diseño de 300 rpm, junto a los 12 números de pares de polos mencionados en la Tabla 61, hacen que la turbina gire a la frecuencia de 60 Hz.

✓ *Diseño de los elementos de la turbina*

- *Rodete*

Tabla 62:

Dimensiones de rodete

Diámetro de descarga, D3 (m)	0,6085
Diámetro medio, D2 (m)	0,6105
Diámetro de entrada, D1 (m)	0,8374
Distancia de D1 al eje del distribuidor, H1 (m)	0,0719
Distancia de D3 al eje del distribuidor, H2 (m)	0,2336

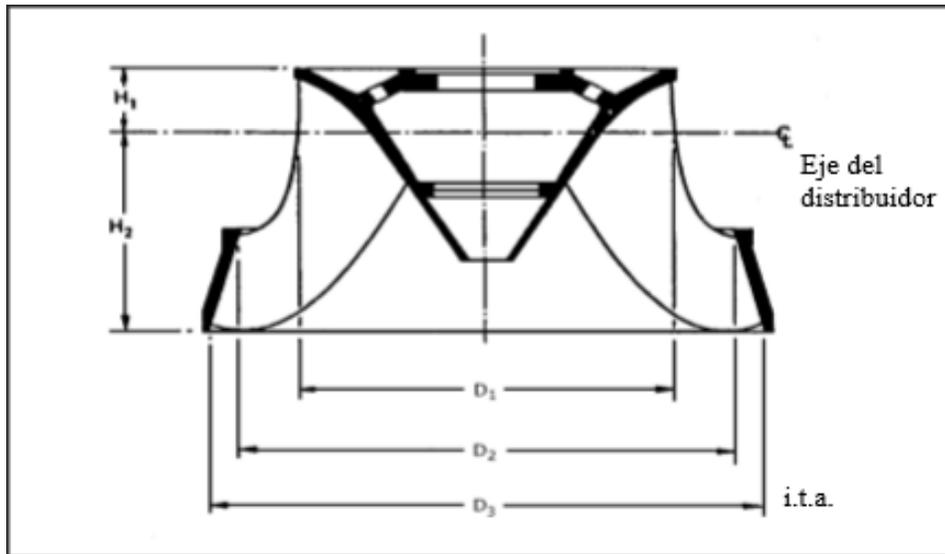


Figura 102. Dimensiones del Rodete de la Turbina

- *Carcasa*

Tabla 63:

Dimensiones de la carcasa

A (m)	0,6073
B (m)	1,0139
C (m)	1,1129
D (m)	1,2196
E (m)	1,3798
F (m)	1,4345
G (m)	1,1482
H (m)	0,9946
I (m)	0,0991
L (m)	0,5644
M (m)	0,3651

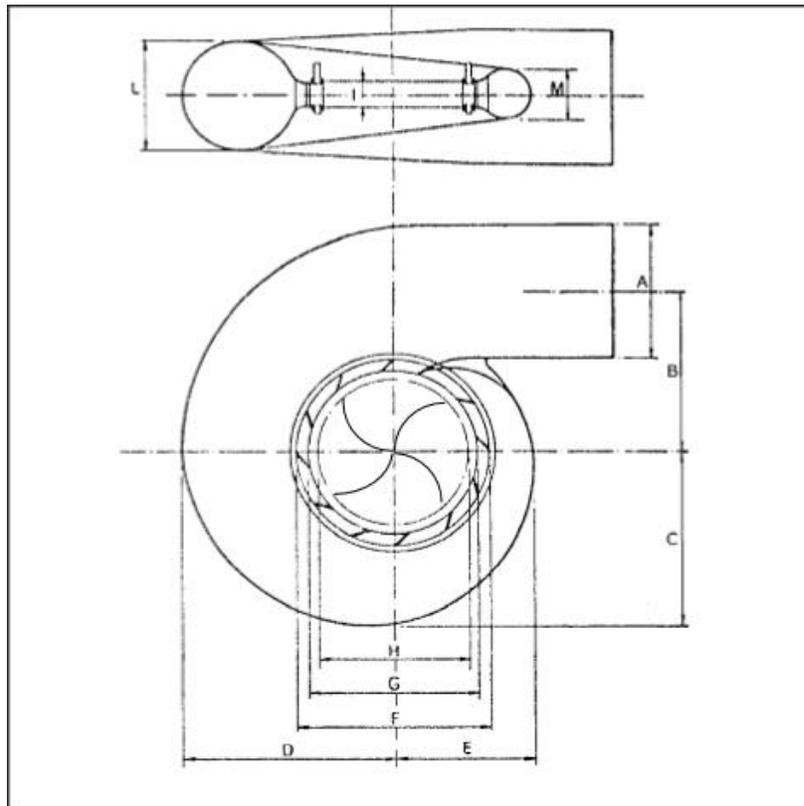


Figura 103. Dimensiones de la Carcasa

Al igual que en la alternativa I, el diámetro de entrada de la carcasa que corresponde al valor de "A" igual a 0,607 m es menor al diámetro de la tubería forzada igual a 2 m. Por lo tanto, esto hace que la velocidad aumente al pasar de la tubería forzada a la carcasa y disminuye la presión. También hace que la velocidad en los alabes del rodete sea aún mayor, y por consiguiente, se produzca un aumento en el rendimiento de la turbina.

- *Tubo de Aspiración*

Tabla 64:

Dimensiones del tubo de aspiración

N (m)	2,2164
O (m)	1,3895
P (m)	0,8337
Q (m)	0,4950
R (m)	0,9736
S (m)	3,9480
T (m)	0,9240
U (m)	0,3516
V (m)	1,0069
Z (m)	1,8129

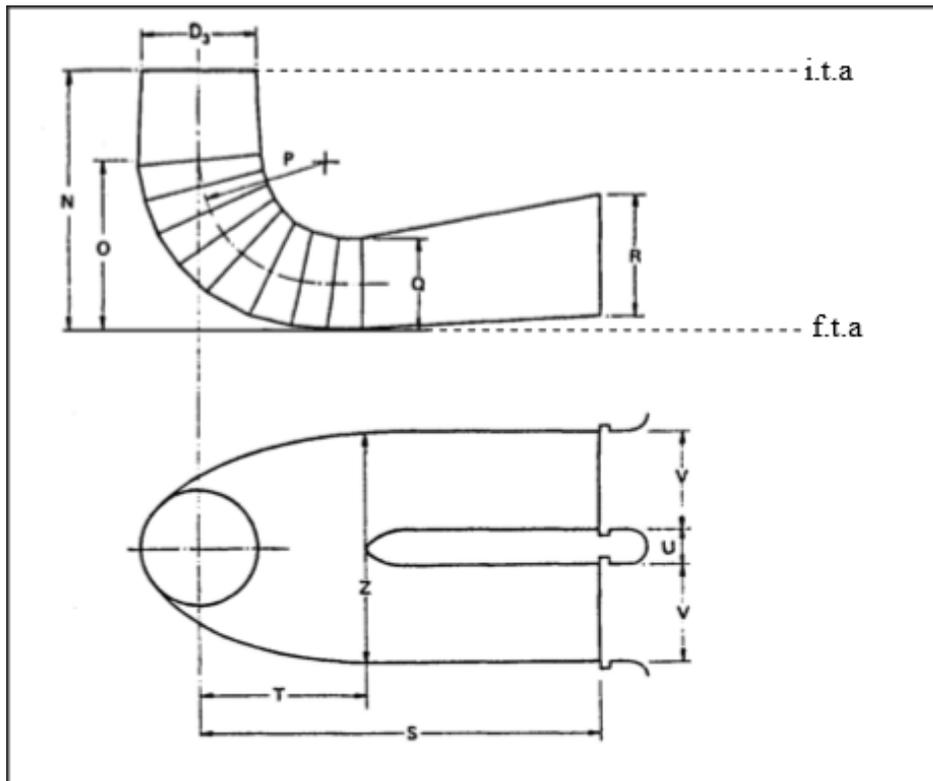


Figura 104. *Dimensiones del tubo de aspiración*

El diámetro de salida del tubo de aspiración es de 0,9736 m señalado en la Tabla 64. Por lo antes mencionado en el túnel de desagüe, se obliga a este ser diseñado con un diámetro mayor al de la salida del tubo de aspiración.

Diseño de la Casa de Maquinas

Al igual que en la alternativa I se dimensiona la casa de máquinas de acuerdo a la posición del eje de la turbina. En este caso de diseño, la turbina es posicionada en eje horizontal.

Tabla 65:

Dimensiones de la casa de máquinas

Longitud (m)	9
Altura (m)	5
Ancho (m)	9
Área (m)	81

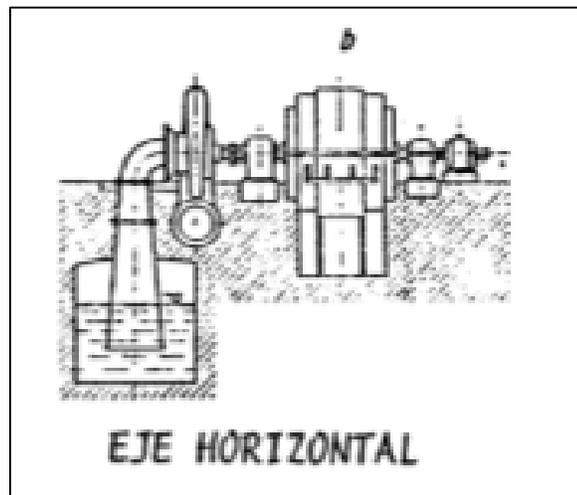


Figura 105. Posición del sistema electromecánico en eje horizontal.

Análisis de factibilidad del Sistema de generación Hidroeléctrica propuesto para el Embalse Pao la Balsa, Estado Cojedes

Toda propuesta debe ser analizada a profundidad con relación a los costos que la misma conlleva, en tal sentido, se debe incluir una evaluación económica con información básica, con la que se pueda determinar su factibilidad de acuerdo a la rentabilidad que se obtenga al ejecutarla.

En tal sentido se hace necesario comparar las alternativas descritas en este trabajo de investigación para determinar la factibilidad económica de ambas. El método escogido para realizar la comparación entre ambas alternativas es el valor presente ó valor actual (VA), quien expresa la rentabilidad de un proyecto de inversión.

ALTERNATIVA I

A continuación se presentan los resultados derivados del análisis de costos, realizado para la alternativa I. Todos los precios fueron calculados en base a la tasa SIMADI 437,51 Bs/\$ (Mayo 2016)

Análisis de costos

Tabla 66:

*Costos de equipos y obras civiles que componen el sistema de generación hidroeléctrica.
Alternativa I. Embalse Pao La Balsa*

CONCEPTO	COMPONENTES	PRECIO US\$	PRECIO BSF
Equipo Turbo - Generador	Turbina francis, generador, tableros de control, mecanismos de regulación y control, válvulas de regulación, tubos de aspiración, etc.	152.639,439	66.781.281,080
Obras civiles	Excavaciones, senderos, casa de máquinas, obra de toma, accesorios, tubería forzada, túnel de conducción y túnel de desagüe	73.179,60	32.016.809,29

De acuerdo con la Tabla 66, los costos del equipo turbo – generador ascienden a 152.639,439\$ equivalente a 66.781.281,080 Bsf, mientras que el costo asociado a las obras civiles es igual a 73.179,60 US\$, equivalente a 32.016.809,29 Bsf.

Para la estimación de estos costos, que representan alrededor del 70% del presupuesto total, se hizo uso de una expresión matemática que involucra los principales parámetros de diseño de una minicentral hidroeléctrica, caudal, altura de diseño y potencia.

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 m³/s y 2,5 m³/s.

Tabla 67:

Costos de transporte e instalación turbina Francis. Alternativa I. Embalse Pao La Balsa.

CONCEPTO	COMPONENTES	PRECIO US\$	PRECIO BSF
Transporte	Transporte, seguro y embalaje	3.050,40	1.334.580,504
Instalación	Montaje y puesta en servicio del equipo	4.000,00	1.750.040,000

En base a la Tabla 67, los costos por transporte e instalación son iguales a: 3.050,40 US\$ y 4.000 US\$ respectivamente. Estos costos fueron calculados tomando como referencia el proyecto de una P.C.H en el embalse dos cerritos, estado Lara, propuesta desarrollada por Rebolledo y González (2015).

El costo de transporte abarca el traslado hasta el sitio, de: materiales y consumibles de obra, del equipo electromecánico junto con los equipos y maquinaria de obra.

Tabla 68:

Costos de operación y mantenimiento Alternativa I. Embalse Pao La Balsa

CONCEPTO	PRECIO US\$	PRECIO BSF
Costos de operación y mantenimiento	6.986,083	3.056.481,248

La Tabla 68 muestra que los costos asociados a la operación y mantenimiento de los equipos, obras civiles, e instalaciones donde se encuentra ubicada la minicentral hidroeléctrica, ascienden a 6.986,083 US\$ equivalente a 3.056.481,173 Bsf.

Existe diversidad de maneras para estimar estos costos, ya sea por criterio derivado de la experiencia ó por el uso de una ecuación. De acuerdo al “Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial” (CIDIAT), para los costos de mantenimiento y operación se tomará el 3% del costo de la inversión inicial. Por otro lado “La Organización Latinoamericana De Energía” (OLADE) recomienda el uso de una ecuación, la cual depende solo de la potencia generada por la turbina.

Para estimar los costos de operación y mantenimiento en este trabajo de investigación, se tomó el 3% de la inversión inicial, ya que no solo depende de la potencia de la turbina, sino que también depende de los costos de los demás componentes del sistema de generación hidroeléctrica.

Tabla 69:

Total de inversión. Alternativa I. Embalse Pao La Balsa

CONCEPTO	PRECIO US\$	PRECIO BSF
Costo de turbina francis	152.639,439	66.781.281,080
Costo de obras civiles	73.179,60	32.016.809,29
Costo de transporte	3.050,40	1.334.580,504
Costo de instalación	4.000,00	1.750.040,000
TOTAL	232.869.439	101.882.708,3

De acuerdo con la Tabla 69, se deberá hacer una inversión total de 232.869.439 US\$ equivalentes a 101.882.708,3 Bsf, para llevar a cabo el sistema de generación hidroeléctrica que se propone en la alternativa I.

Tabla 70:*Ingresos anuales estimados. Alternativa I. Embalse Pao La Balsa*

CONCEPTO	PRECIO US\$	PRECIO BSF
INGRESOS	37.144,26	16.250.985,19

La Tabla 70, muestra los ingresos estimados que se generan una vez transcurrido el primer año de funcionamiento de la minicentral hidroeléctrica. Estos ingresos anuales son iguales a: 37.144,26 US\$ equivalentes a 16.250.985,19 Bsf.

Para el cálculo de los ingresos anuales de la minicentral, se necesita conocer la energía media anual que será vertida a la red y el costo de 1 kWh, que en Venezuela es igual 3,1 cent US\$/kWh.

Rentabilidad

Tabla 71:*Rentabilidad con n= 25 años. Alternativa I. Embalse Pao La Balsa*

Valor Actual (VA)	0
Tasa interna de retorno (TIR)	5%
Período de retorno de la inversión (n)	10

El análisis de rentabilidad aplicado a la alternativa I, da como resultado un valor actual igual a 0, con una tasa interna de retorno del 5% para un período de 25 años.

De acuerdo a estos resultados, los costos generados por el proyecto y los ingresos brutos, se igualan, es decir, no se producen ni excedentes ni déficit de los ingresos sobre los costos. Otro aspecto importante que se puede derivar de los resultados obtenidos es que cualquier valor imin comprendido entre 0% y 5%, reporta valores actuales positivos, tal como se ilustra en la Figura 106.

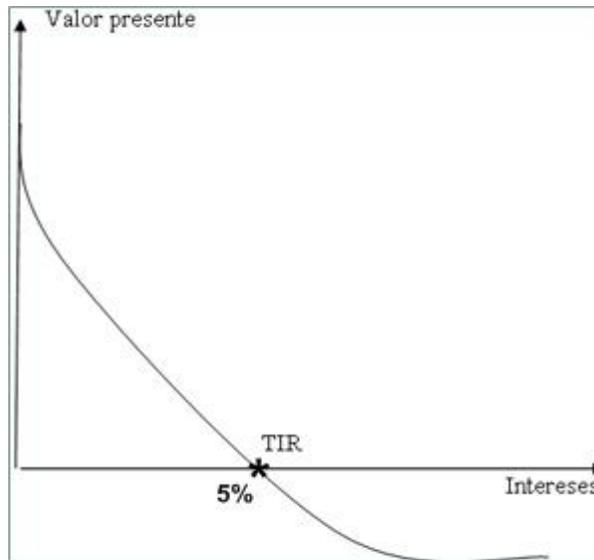


Figura 106. Valor actual vs tasa mínima de rendimiento para la alternativa I

ALTERNATIVA II

A continuación se presentan los resultados derivados del análisis de costos, realizado para la alternativa II

Análisis de costos

Tabla 72:

*Costos de equipos y obras civiles que componen el sistema de generación hidroeléctrica.
Alternativa II. Embalse Pao La Balsa*

CONCEPTO	COMPONENTES	PRECIO US\$	PRECIO BSF
Equipo Turbo – Generador	Turbina francis, generador, tableros de control, mecanismos de regulación y control, válvulas de regulación, tubos de aspiración, etc.	148.832,58	65.115.743,42
Obras civiles	Excavaciones, senderos, casa de máquinas, accesorios, tubería forzada y túnel de desagüe	59.697,43	26.118.221,72

De acuerdo con la Tabla 72, los costos del equipo turbo – generador para la alternativa II, ascienden a 148.832,58 US \$ equivalente a 65.115.743,42 Bsf, mientras que el costo asociado a las obras civiles es igual a 59.697,43 US\$, equivalente a 26.118.221,72 Bsf.

Para esta estimación, se hizo uso de la fórmula empleada para estimar costos de equipos y obras civiles en la alternativa I, ya que el caudal de esta alternativa por ser igual a 0,5 m³/s, entra dentro del rango que “North West Hydro Resource Model, Lancaster University” establece.

Tabla 73:*Costos de transporte e instalación turbina Francis. Alternativa II. Embalse Pao La Balsa*

CONCEPTO	COMPONENTES	PRECIO US\$	PRECIO BSF
Transporte	Transporte, seguro y embalaje	2500,40	1.093.950,004
Instalación	Montaje y puesta en servicio del equipo	3000	1.312.530

En base a la Tabla 73, los costos por transporte e instalación son iguales a: 2500,40 US\$ y 3000 US\$ respectivamente. Al igual que en la alternativa I, estos costos fueron calculados tomando como referencia el proyecto de una P.C.H en el embalse dos cerritos, estado Lara, propuesta desarrollada por Rebolledo y González (2015).

Tabla 74:*Costos de operación y mantenimiento. Alternativa II. Embalse Pao La Balsa*

CONCEPTO	PRECIO US\$	PRECIO BSF
Costos de operación y mantenimiento	6.420,91	2.809.213,34

La Tabla 74 muestra que los costos asociados a la operación y mantenimiento de los equipos, obras civiles, e instalaciones donde se encuentra ubicada la minicentral hidroeléctrica, se elevan a 6.420,91 US\$ equivalente a 2.809.213,34BsF.

Para estimar los costos de operación y mantenimiento en esta alternativa, se tomó el 3% de la inversión inicial, de la misma manera que para la alternativa I.

Tabla 75:*Total de inversión. Alternativa II. Embalse Pao La Balsa*

CONCEPTO	PRECIO US\$	PRECIO BSF
Costo de turbina francis	148.832,58	65.115.743,42
Costo de obras civiles	59.697,43	26.118.221,72
Costo de transporte	2.500,40	1.093.950,00
Costo de instalación	3.000,00	1.312.530,00
TOTAL	214.030	93.640.445,14

De acuerdo con la Tabla 75, se deberá hacer una inversión total de 214.030 US\$ equivalentes a 93.640.445,14 Bsf, para llevar a cabo la alternativa II.

Tabla 76:*Ingresos anuales estimados. Alternativa II. Embalse Pao La Balsa*

CONCEPTO	PRECIO US\$	PRECIO BSF
INGRESOS	40.600,26	17.763.019,75

La Tabla 76, muestra los ingresos estimados que se generan una vez transcurrido el primer año de funcionamiento de la minicentral hidroeléctrica. Estos ingresos anuales son iguales a: 40.600,26 US\$ equivalentes a 17.763.019,75 Bsf.

Para el cálculo de los ingresos anuales de la minicentral, se necesita conocer la energía media anual que será vertida a la red y el costo de 1 kWh, que en Venezuela es igual 3,1 cent US\$/kWh.

Rentabilidad

Tabla 77:

Rentabilidad n= 25 años. Alternativa II. Embalse Pao La Balsa

Valor Actual (VA)	0
Tasa interna de retorno (TIR)	4%
Período de retorno de la inversión (n)	8

El análisis de rentabilidad aplicado a la alternativa II, da como resultado un valor actual igual a 0, con una tasa interna de retorno del 5% para un período de 10 años. De acuerdo a estos resultados, los costos generados por el proyecto y los ingresos brutos, se igualan, es decir, a la tasa interna de retorno, los ingresos y los costos de un proyecto son exactamente iguales.

Otro aspecto importante que se puede derivar de los resultados obtenidos es que cualquier valor imin comprendido entre 0% y 4%, reporta valores actuales positivos, tal como se ilustra en la Figura 107

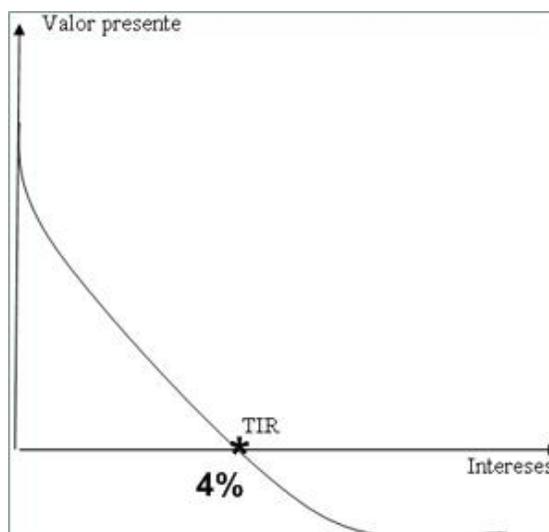


Figura 107. Valor actual vs tasa mínima de rendimiento para la alternativa

CAPITULO V

CONCLUSIONES

- A pesar de que las variables hidroenergéticas del embalse Pao La Balsa han sido influenciadas por diversos factores a lo largo del período de estudio, las mismas, mantuvieron un comportamiento estable en el tiempo sin presentar tendencia alguna, con poca ocurrencia de eventos extremos.
- El análisis estadístico descriptivo realizado a la variable elevación del agua, demuestra que el embalse nunca llegó a niveles críticos durante el período de estudio.
- El embalse por lo general evacua más de lo que recibe. Esto quiere decir, que en época de sequía muy marcada, debe disponer del caudal de reserva para cumplir con el riego y el abastecimiento de agua.
- Mediante el estudio realizado para la alternativa I se determinó, que el caudal de diseño sería igual a $1 \text{ m}^3/\text{s}$ de acuerdo a los criterios empleados para su selección, tomando como referencia el gasto ecológico.
- En la alternativa II el caudal que transita por la tubería forzada luego de la bifurcación es igual a $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$. De esta manera, no se ve comprometido el caudal ecológico, ya que el caudal que vá hacia la turbina será posteriormente restituido al río, al igual que el caudal que continúa por la tubería de riego.
- La potencia de diseño en la alternativa I y II, son de 73,394 Kw y 73,884 Kw respectivamente, ambas potencias entran en el rango de selección de la turbina Francis, también clasifican el tipo de central en una

minicentral hidroeléctrica, la cual puede generar una potencia de 50 a 500 Kw.

- Se seleccionan canales tipo túnel, ya que son los que mejor se adaptan al terreno.
- Las pendientes en los túneles de conducción y/o desagüe en ambas alternativas son de 0,20% y 0,15%, lo que reduce las pérdidas de carga y disminuye la velocidad del fluido, evitando la erosión en los túneles.
- Para el cálculo de la sobrepresión máxima producida en la tubería forzada de la alternativa I, se desarrolla la expresión de Michaud, llegando a un valor de 10,568 m.c.a. La tubería debe tener un espesor de 0,2863 mm para soportar el golpe de ariete, sin embargo, el espesor de diseño ya cumple con el mínimo para soportar estas presiones, arrojando un valor de 1,4648 mm.
- Se ha elegido acero comercial como material para la tubería forzada y de empalme en la alternativa I y II, ya que este material genera pérdidas menores que otros materiales.
- Las pérdidas primarias o pérdidas por fricción en la alternativa II son menores que en la alternativa I, esto se debe a que la velocidad en la alternativa II es menor debido al diámetro de la tubería forzada, por ser grande con respecto a la otra alternativa, el flujo que transita por ella se mantiene en régimen laminar y la velocidad es baja, lo cual evita la pérdida de energía.
- La turbina Francis en la alternativa I tiene una velocidad de rotación menor que en la alternativa II, de 225 rpm, por lo que la turbina en la alternativa II es más rápida, sin embargo, las potencias de diseño en ambas son prácticamente iguales.
- Implementar ambas alternativas en el embalse Pao La Balsa es factible económicamente, ya que ambas recuperan la inversión inicial en un

tiempo menor a la vida útil de la minicentral hidroeléctrica estimada de 25 años.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar pronósticos para todas las variables hidroenergéticas, con el fin de predecir su comportamiento a futuro.
- Se recomienda hacer un estudio minucioso del caudal de alivio, con el fin de determinar si valdría la pena diseñar una obra de toma que aproveche este caudal en conjunto con el caudal ecológico, en épocas lluviosas.
- Se recomienda realizar un estudio geotécnico en el sitio donde estarán ubicadas la cámara de carga y la casa de máquinas, con el fin de garantizar la estabilidad de las mismas.
- Debido a que la cámara de carga se encuentra enterrada por la misma configuración del terreno, se recomienda implementar un canal tipo túnel para el agua en desborde.
- Se recomienda realizar un estudio de las tensiones dentro de la tubería forzada.
- Se recomienda realizar mantenimiento a las obras civiles que conforman el sistema de generación hidroeléctrico.
- Revisar el estado de la carcasa de la turbina periódicamente, para evitar que se corroa.
- Se recomienda indicarle al fabricante los datos exactos de caída neta, caudal máximo y mínimo, tipo de generador y sistema de acople con la turbina, si se desea obtener un diseño óptimo de la misma.
- Se recomienda que el mantenimiento del equipo de generación sea realizado por personal altamente capacitado, con el fin de obtener eficiencia en los trabajos.

- Se recomienda hacer un estudio de demanda eléctrica en la población el pao, para determinar si la minicentral es capaz de absorberla.
- Se recomienda instalar un multiplicador de velocidad entre la turbina y el rotor, para aumentar la velocidad de giro de este último. Si se coloca este aparato, el tamaño del generador disminuye y también su coste, ya que los polos del generador disminuyen.
- En canales se recomienda colocar un espesor de recubrimiento máximo de 0,08 metros en los lados y 0,10 metros en el fondo.
- Se recomienda continuar y desarrollar a mayor profundidad la alternativa II de este trabajo de investigación.
- Para la casa de máquinas se recomienda el diseño de una estructura metálica tipo cercha con cubierta de techo liviana, con paredes de bloques de concreto frisadas por ambas caras.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agencia Internacional de la Energía (2014) www.IEA.org
- Alvarado, L., Etedgui C. y González, I. (1985) *Bases para la evaluación económica de proyectos de inversión.*
- Amaya O., Hernández D., y Villegas D. (2009). *Estudio de las micro y mini plantas eléctricas hidráulicas.*
- Arias, F. (2006). *El Proyecto de Investigación.* Editorial Episteme. Caracas, Venezuela. Pp 24, 83, 85.
- Banco Mundial (2014) www.bancomundial.org
- Behar, D. (2008). *Metodología de la investigación.* Editorial Shalom
- Bolinaga J, (1985). *Mecánica Elemental de los Fluidos.* Fundación Polar. Universidad Católica Andres Bello. Venezuela
- Bolinaga J, (1996). *Proyectos de Ingeniería Hidráulica.* Volumen II. Fundación. Polar.
- Cabrita, R. (2008). *Evaluación del rendimiento del embalse Pao-La Balsa para el período 2007 – 2025.* Caracas, Venezuela
- Camacho. G. y Carrillo A. (2000). *Estudio de factibilidad las pequeñas centrales hidroeléctricas en el estado Amazonas:* Universidad Central de Venezuela.
- Castro, A. (2006). *Minicentrales hidroeléctricas.* Madrid.
- Cervo y Bervian (1989), *Metodología de la investigación*
- Delgado, V. (2007): *Guía para el diseño de pequeñas centrales hidroeléctricas.* Quito, Ecuador.
- Demetriades, (2000). *Centrales eléctricas*
- Farinango, J. (2013) *Dimensionamiento del tanque de carga, tubería de presión, casa de máquinas y la descarga para la micro central*

hidroeléctrica en la estación científica amazónica juri juri kawsay de la universidad central del ecuador. Quito, Ecuador.

- Gonzalez, C. y Rebolledo, M. (2015) *Análisis de la capacidad hidroenergética de los embalses del estado Lara.* Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo. Venezuela.
- Gutiérrez, H. y Nava, A. (2014). *Selección y dimensionamiento de turbinas hidráulicas para centrales hidroeléctricas.* México
- Hernández, Fernández y Baptista (2010). *Metodología de la investigación*
- Llamozas, J. (2010) *Drenaje en carreteras.* Universidad de Carabobo Facultad de Ingeniería Civil. Venezuela.
- Maneiro, N. y Mejías, A. (2010). *Estadística para ingeniería.* Universidad de Carabobo. Venezuela
- Ministerio del poder popular para Ecosocialismo y Aguas (2014) www.minea.gob.ve
- Montes, A. y Sudano, A. (2012). *Diseño hidráulico de pequeñas centrales hidroeléctricas en ríos de bajo caudal.* Universidad Rafael Urdaneta. Maracaibo. Venezuela
- Murray, R. y Stephens, L. 4ta edición (2009). *Estadística Schaum.* Editorial Mc Graw Hill.
- Navarro, F. *Análisis de factibilidad técnico y financiero para la implementación de dos micro centrales hidroeléctricas en zamorano*
- OLADE (2014) www.olade.org
- Perez, J. (1999) *Estudio de factibilidad de equipamiento hidroeléctrico para ocho embalses seleccionados.* Venezuela.
- Poza, E. (2008). *Diseño hidráulico y mecánico de la central mini hidroeléctrica del embalse de valmayor.* Universidad Pontificia Comillas, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Industrial. Madrid, España

- Ruiz, P. (2013) *Estudio del recurso hidráulico y proyecto de una central minihidráulica en la cuenca del río Tormes*. Cartagena, España.
- Sánchez, T., Escobar, R., Ramírez, S., Canedo, W., Gamarra, Alva., Guzmán, Y. (2010). *Evaluación de recursos hidroenergéticos*. Lima, Perú. Soluciones Prácticas.
- Sparrow, E. (2008) *Hidráulica básica de canales*. Universidad Nacional del Santa. Facultad de Ingeniería, Perú.
- Terra, R. y Schenzer, D. (2013) *Factibilidad de pequeñas centrales hidroeléctricas en presas multipropósito*. Uruguay
- Valencia, A. y Rincón, Camilo (2013). *Criterios de diseño y montaje para una central hidroeléctrica con capacidad de generación de 20 MW*. Universidad autónoma de occidente, Facultad de Ingeniería. Santiago de Cali.
- *VENEZUELA: Costo Kw/H del país es el más bajo de la región (2014)*
<http://entorno.venmedios.com/articulo/2860036/VENEZUELA-Costo-KwH-del-pais-es-el-mas-bajo-de-la-region-21072014>.

**APÉNDICE
(CALCULOS)**

Diseño del sistema de generación hidroeléctrica

ALTERNATIVA I

Obras Civiles

Túnel de Conducción

Datos:

Caudal (Q) = 1 m³/s

Material = Concreto

Rugosidad (n) = 0,012

Pendiente (s) = 0,002

Diámetro = 1,07 m (Por tanteo)

$$\frac{Q \times n}{S \cdot o^{\frac{1}{2}} \times d^{8/3}} = \frac{1 \times 0,012}{0,002^{\frac{1}{2}} \times 1,07^{8/3}} = 0,224$$

- Profundidad Normal (y_o)

$$y_o = 0,674 \text{ m}$$

- Espejo de Agua (T)

$$T = 2 \cdot \sqrt{y_o(D - y_o)} = 2 \cdot \sqrt{0,674(1,07 - 0,674)} = 1,033 \text{ m}$$

- Área (A)

$$A = \frac{1}{8}(\theta - \text{Sen}\theta)D^2 = \frac{1}{8}(4,154 - \text{Sen}(238,031)) \cdot 1,07^2 = 0,690 \text{ m}^2$$

- Perímetro (P)

$$P = \frac{1}{2} \cdot D \cdot \theta = \frac{1}{2} \cdot 1,07 \cdot 4,154 = 2,223 \text{ m}$$

- Radio Hidráulico (R)

$$R = \frac{A}{P} = \frac{0,690}{2,223} = 0,310 \text{ m}$$

- Velocidad (V)

$$V = \frac{\frac{2}{R^3} \cdot \frac{1}{S^2}}{n} = \frac{0,310^3 \times 0,002^{\frac{1}{2}}}{0,012} = 1,709 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

- Profundidad Hidráulica (Dh)

$$Dh = \frac{A}{T} = \frac{0,690}{1,033} = 0,668 \text{ m}$$

- Numero de Froude (Fr)

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot Dh}} = \frac{1,709}{\sqrt{9,81 \cdot 0,668}} = 0,668$$

- Energía Especifica (E)

$$E = y_o + \frac{Q^2}{2 \cdot g \cdot A^2} = 0,674 + \frac{1^2}{2 \cdot 9,81 \cdot 0,690^2} = 0,781 \text{ m} - \frac{kg}{kg}$$

Cámara de Carga

Datos:

Altura necesaria que evita la entrada de sedimentos (a) = 0,4 m

Altura de agua en el desborde (h_v) = 1,07 m

Separación entre barrotes de la Rejilla (S) = 0,03 m

Longitud de la Rejilla = 0,5 m

Inclinación de la Rejilla = 75°

Área del túnel de Conducción (A) = 0,690 m²

Pendiente del Túnel de Conducción (i) = 0,002

- Altura

Diámetro de la Tubería Forzada

$$d = 1,27 \cdot \frac{Q^{0,4268}}{(H_B + h_s)^{0,1423}} = 1,27 \cdot \frac{1^{0,4268}}{(8,21 + 2,463)^{0,1423}} = 0,907 \text{ m}$$

Dónde:

Altura por efecto del golpe de ariete: $h_s = 0,3 \cdot H_B = 2,463 \text{ m}$

Altura mínima de agua sobre la tubería forzada

$$h_1 = 0,543 \cdot V \sqrt{d} = 0,543 \cdot 1,549 \sqrt{0,907} = 0,801 \text{ m}$$

Dónde:

Velocidad en la tubería forzada

$$V = \frac{Q}{2\pi \frac{d^2}{4}} = \frac{1}{0,646} = 1,549 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Altura necesaria de la Cámara de carga

$$h_v = a_1 + D + h_1 = 0,4 + 0,908 + 0,801 = 2,109 \text{ m}$$

Dónde:

$$0,3 < a_1 < 0,5$$

Altura total de la Cámara de carga

$$h_t = a_1 + d + h_1 + h_v + B = 0,4 + 0,907 + 0,801 + 1,07 + 0,357$$

Dónde:

$$\text{Borde Libre: } B = \frac{1}{3} \cdot h_v = 0,357 \text{ m}$$

- Longitud

Longitud necesaria de la Cámara de carga

$$L_1 = 0,304 \cdot Q \cdot \frac{L \cdot \sqrt{h_2}}{(H_B + h_s) \cdot D^2} = 0,304 \cdot 1 \cdot \frac{117,121 \cdot \sqrt{2,109}}{(8,21 + 2,463) \cdot 0,908^2} = 5,873 \text{ m}$$

Longitud por caída vertical

$$L'_1 = \left[2,5 + 1,1 \cdot \frac{Y}{h_2} + 0,70 \left(\frac{Y}{h_2} \right)^3 \right] \sqrt{h_2 \cdot Y}$$

$$L'_1 = \left[2,5 + 1,1 \cdot \frac{1,07}{2,109} + 0,70 \left(\frac{1,07}{2,109} \right)^3 \right] \sqrt{2,109 \cdot 1,07} = 4,731 \text{ m}$$

Longitud Horizontal de la Rejilla

$$L_2 = \text{Cos}(75^\circ) \cdot 0,5 = 0,461 \text{ m}$$

Longitud Total de la Cámara de Carga

$$L_t = L_1 + L_2 = 5,873 + 0,461 = \mathbf{6,334 \text{ m}}$$

- Volumen

$$V_t = \frac{0,693 \cdot Q^2}{A \cdot i \cdot g} = \frac{0,693 \cdot 1^2}{0,690 \cdot 0,002 \cdot 9,81} = 51,190 \text{ m}^3$$

- Ancho

$$B = \sqrt{\frac{V_t}{h_1}} = \sqrt{\frac{51,190}{0,801}} = 7,996 \text{ m}$$

Tubería Forzada

Datos:

Longitud = 117,121 m

Diámetro = 0,907 m

Velocidad = 1,549

Rugosidad Absoluta del Acero = 0,008 mm

Viscosidad del agua = 0,000001 m²/s

- *Espesor*

$$e = \frac{4,9 \cdot d \cdot 1,25P}{\tau} + C = \frac{4,9 \cdot 0,907 \cdot 1,25 \cdot 8,21}{98,1} + 1 = 1,465 \text{ mm}$$

Donde:

Presión de Diseño (P) = 8,21 m.c.a

Carga d trabajo del Material (τ) = 98,1 MPa

Sobreespesor o Tolerancia para Corrosión (C) = 1; corresponde a tramos rectos

Golpe de Ariete

Cierre rápido pero no instantáneo de la válvula de compuerta $t_r > t_o > t_{iv}$

- Tiempo del Cierre de la Válvula (t_o)= 3,5 s

- Tiempo de residencia de la partícula (t_r)

$$t_r = \frac{\text{Longitud}}{\text{Velocidad}} = \frac{117,21}{1,549} = 75,668 \text{ s}$$

- Tiempo de las ondas de Presión (t_{iv})

$$t_{iv} = \frac{2 \cdot \text{Longitud}}{C} = \frac{2 \cdot 117,21}{526,659} = 0,445 \text{ s}$$

Dónde:

Celeridad de propagación de la sobrepresión (C)

$$C = \sqrt{\frac{a^2}{1 + \frac{a^2 \cdot \rho \cdot D}{e \cdot E}}} = \sqrt{\frac{1400^2}{1 + \frac{1400^2 \cdot 1000 \cdot 0,907}{1,465 \cdot 2 \cdot 10^{11}}}} = 526,660 \text{ m/s}$$

Densidad del agua (ρ) = 1000 kg/m³

Módulo de elasticidad del material (E)

Velocidad de Propagación de las Ondas (a) = $\frac{E_0}{\rho}$

Presión por el Golpe de Ariete

$$\Delta p = \frac{2\rho Lv}{t_0} = \frac{2 \cdot 1000 \cdot 117,121 \cdot 1,549}{3,5} = 103645,644 \text{ Pa} \approx 10,569 \text{ m. c. a}$$

Espesor por Golpe de Ariete

$$e = \frac{p \cdot D}{2 \cdot K} = \frac{(8,21 + 10,569) \cdot 0,907}{2 \cdot 13} = 0,286 \text{ mm}$$

Donde:

Coeficiente de trabajo del Acero (K) = 13 kg/mm²

Espesor Seleccionado = **1,465 mm**

Perdidas en la Tubería Forzada

- Perdidas Primarias

$$H_{rp} = \frac{\lambda \cdot L \cdot V^2}{D \cdot 2g} = \frac{0,013 \cdot 117,121 \cdot 1,549^2}{0,907 \cdot 2 \cdot 9,81} = \mathbf{0,205 \text{ m}}$$

Rugosidad Relativa (ξ)

$$\xi = \frac{\text{Rugosidad Absoluta}}{D \cdot 1000} = \frac{0,08}{0,907 \cdot 1000} = 8,823 \cdot 10^{-5}$$

Número de Reynolds (Re)

$$Re = V \cdot \frac{D}{\nu} = 1,549 \cdot \frac{0,907}{0,000001} = 1404208,404$$

Relación ξ/D

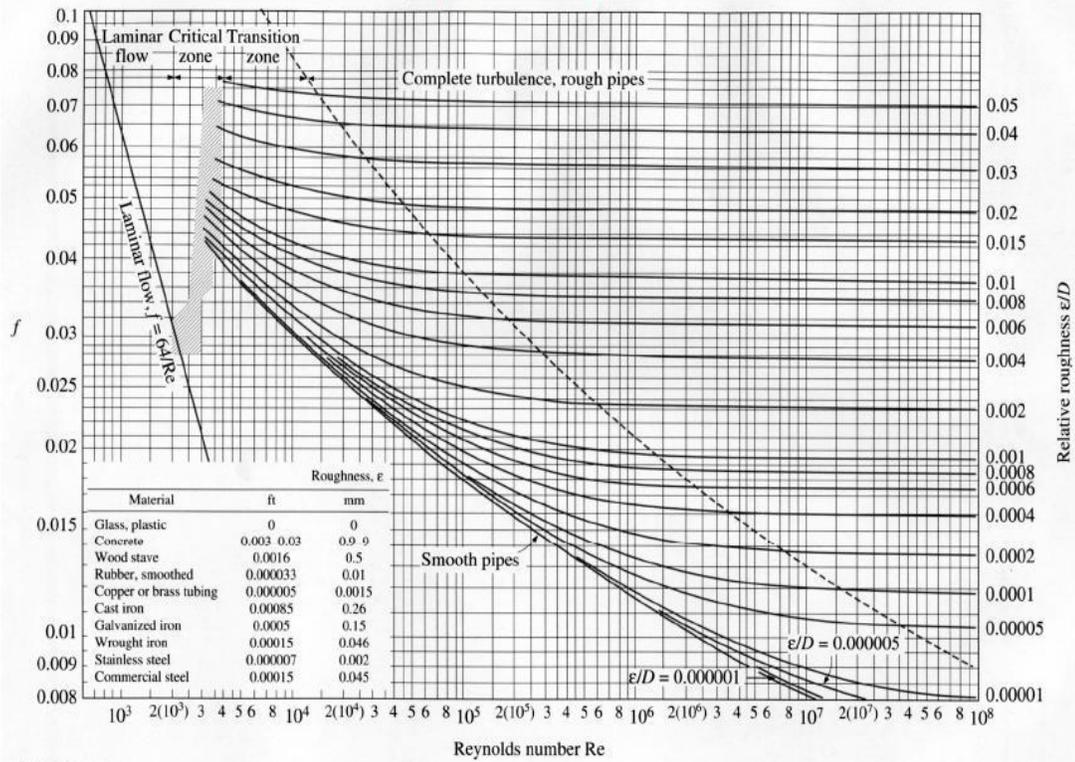
$$\frac{\xi}{D} = \frac{8,823 \cdot 10^{-5}}{0,907} = 9,728 \cdot 10^{-5}$$

Coefficiente de Fricción

$$\lambda = 0,013$$

Se obtiene del Diagrama de Moody = $\xi/D \rightarrow$ Numero de Reynolds

Diagrama de Moody



- Perdidas Secundarias

$$H_{rs} = \frac{\sum k_i V^2}{2g} = \frac{[2(0,1) + 1(0,25) + 1(0,54)] \cdot 1,549^2}{2 \cdot 9,81} = 0,121 \text{ m.c.a}$$

Coeficientes de Perdidas (K)

- Codos = 0,1
- Válvulas de Compuerta = 0,25

- Rejillas = 0,54

Se obtiene al despejar K

$$h_r = \beta \cdot \left(\frac{s}{m}\right)^{\frac{4}{3}} \cdot \frac{V^2}{2g} \cdot \text{sen}(a) = K \cdot \frac{V^2}{2g}$$

Dónde:

Coeficiente de Forma (β) = 2,42

Espesor (s) = 10 mm

Separación entre barrotes (m) = 30 mm

Inclinación de Barrotes (α) = 75°

- *Pérdidas Totales*

$$H_r = H_{rp} + H_{rs} = 0,205 + 0,121 = \mathbf{0,327\ m}$$

Túnel de Desagüe

El mismo procedimiento de cálculo que el Túnel de conducción

Turbina

- Potencia de Diseño

$$P_d = 9,8 \cdot Q_d \cdot H_n \cdot e = 9,8 \cdot 1 \cdot 7,883 \cdot 0,95 = \mathbf{73,899 \text{ kW}}$$

Tipo de Turbina = Francis

- Velocidad Específica

$$n = 160 \text{ rpm} \quad (\text{figura 24})$$

- Velocidad Síncrona de Rotación

$$n = \frac{ns \times H neta^{\frac{5}{4}}}{\sqrt{P_{util}}} = \frac{160 \cdot 7,883^{\frac{5}{4}}}{\sqrt{73,394}} = 246,705 \text{ rpm}$$

Numero de Polos

$$p = \frac{f \cdot 60}{n} = \frac{60 \cdot 60}{246,705} = 14,592$$

$$p = 16 \quad (\text{llevar a multiplo de 4})$$

- Velocidad de Rotación Síncrona de Diseño

$$n = \frac{f \cdot 60}{p} = \frac{60 \cdot 60}{16} = 225 \text{ rpm}$$

- Velocidad Específica de Diseño

$$ns = \frac{\sqrt{P_{\text{util}}} \times n}{H \eta^{\frac{5}{4}}} = \frac{\sqrt{98,423} \cdot 225}{7,883^{\frac{5}{4}}} = 168,982 \text{ rpm}$$

- Coeficiente de Velocidad Periférica

$$\Phi = 0,31 + 2,5 (10^{-3}) \cdot ns = 0,31 + 2,5 (10^{-3}) \cdot 168,982 = 0,732$$

- Rodete

Diámetro de descarga del Rodete

$$D_3 = \frac{84,5 \Phi \sqrt{Hn}}{n} = \frac{84,5 \cdot 0,732 \cdot \sqrt{7,883}}{225} = 0,772 \text{ m}$$

Diámetro de Entrada

$$D_1 = \left(0,4 + \frac{94,5}{ns}\right) \cdot D_3 = \left(0,4 + \frac{94,5}{168,982}\right) \cdot 0,772 \text{ m}$$

Diámetro Medio

$$D_1 = \left(\frac{1}{0,96 + 0,00038 ns} \right) \cdot D_3 = \left[\frac{1}{0,96 + 0,00038(168,982)} \right] \cdot 0,772 = 0,754 m$$

Distancia del diámetro de entrada al eje del distribuidor

$$H_1 = (0,094 + 0,00025 ns) \cdot D_3 = (0,094 + 0,00025(168,982)) \cdot 0,772 = 0,105 m$$

Distancia del diámetro de descarga del rodete al eje del distribuidor

Si $110 < ns \leq 350$

$$H_2 = \left(\frac{1}{3,16 - 0,0013 ns} \right) \cdot D_3 = \left(\frac{1}{3,16 - 0,0013(168,982)} \right) \cdot 0,772 = 0,263 m$$

- Carcasa

$$A = \left(1,2 - \frac{19,56}{ns} \right) \cdot D_3 = \left(1,2 - \frac{19,56}{168,982} \right) \cdot 0,772 = 0,837 m$$

$$B = \left(1,1 + \frac{54,8}{ns} \right) \cdot D_3 = \left(1,1 + \frac{54,8}{168,982} \right) \cdot 0,772 = 1,100 m$$

$$C = \left(1,32 + \frac{49,25}{ns} \right) \cdot D_3 = \left(1,32 + \frac{49,25}{168,982} \right) \cdot 0,772 = 1,245 m$$

$$D = \left(1,5 + \frac{48,8}{ns}\right) \cdot D_3 = \left(1,5 + \frac{48,8}{168,982}\right) \cdot 0,772 = 1,382 \text{ m}$$

$$E = \left(0,98 + \frac{63,6}{ns}\right) \cdot D_3 = \left(0,98 + \frac{63,6}{168,982}\right) \cdot 0,772 = 1,271 \text{ m}$$

$$F = \left(1 + \frac{131,4}{ns}\right) \cdot D_3 = \left(1 + \frac{131,4}{168,928}\right) \cdot 0,772 = 1,373 \text{ m}$$

$$G = \left(0,89 + \frac{96,5}{ns}\right) \cdot D_3 = \left(0,89 + \frac{96,5}{168,928}\right) \cdot 0,772 = 1,128 \text{ m}$$

$$H = \left(\frac{0,79 + 81,75}{ns}\right) \cdot D_3 = \left(\frac{0,79 + 81,75}{168,928}\right) \cdot 0,772 = 1,015 \text{ m}$$

$$I = (0,1 + 0,00065ns) \cdot D_3 = (0,1 + 0,00065(168,928)) \cdot 0,772 = 0,162 \text{ m}$$

$$L = (0,88 + 0,00049 ns) \cdot D_3 = (0,88 + 0,00049 (168,928)) \cdot 0,772 = 0,744 \text{ m}$$

$$M = \left(0,60 + \frac{0,000015}{ns}\right) \cdot D_3 = \left(0,60 + \frac{0,000015}{168,928}\right) \cdot 0,772 = 0,463 \text{ m}$$

- Tubo de Aspiración

$$N = \left(1,54 + \frac{203,5}{ns}\right) \cdot D_3 = \left(1,54 + \frac{203,5}{168,928}\right) \cdot 0,772 = 2,120 \text{ m}$$

$$O = \left(0,83 + \frac{140,7}{ns}\right) \cdot D_3 = \left(0,83 + \frac{140,7}{168,928}\right) \cdot 0,772 = 1,284 \text{ m}$$

$$P = \left(1,37 - \frac{0,00056}{ns}\right) \cdot D_3 = \left(1,37 - \frac{0,00056}{168,928}\right) \cdot 0,772 = 1,058 \text{ m}$$

$$Q = \left(0,58 + \frac{22,6}{ns}\right) \cdot D_3 = \left(0,58 + \frac{22,6}{168,928}\right) \cdot 0,772 = 0,551 \text{ m}$$

$$R = \left(1,6 - \frac{0,0013}{ns}\right) \cdot D_3 = \left(1,6 - \frac{0,0013}{168,928}\right) \cdot 0,772 = 1,236 \text{ m}$$

$$S = \left(\frac{ns}{-9,28 + 0,25 ns}\right) \cdot D_3 = \left(\frac{168,928}{-9,28 + 0,25(168,928)}\right) \cdot 0,772 = 3,960 \text{ m}$$

$$T = (1,50 + 0,00019 ns) \cdot D_3 = (1,50 + 0,00019 (168,928)) \cdot 0,772 = 1,183 \text{ m}$$

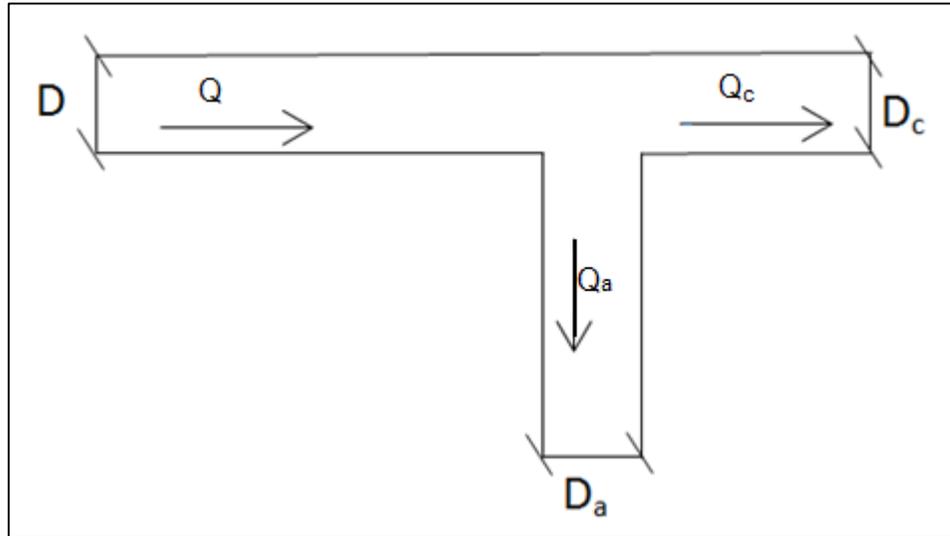
$$U = (0,51 + 0,0007 ns) \cdot D_3 = (0,51 + 0,0007(168,928)) \cdot 0,772 = 0,485 \text{ m}$$

$$V = \left(1,10 + \frac{53,7}{ns}\right) \cdot D_3 = \left(1,10 + \frac{53,7}{168,928}\right) \cdot 0,772 = 1,095 \text{ m}$$

$$Z = \left(2,63 + \frac{33,8}{ns}\right) \cdot D_3 = \left(2,63 + \frac{33,8}{168,928}\right) \cdot 0,772 = 1,830 \text{ m}$$

ALTERNATIVA II

- Pérdidas de Carga por bifurcación



Datos

$$D = D_c = D_a = 2 \text{ m}$$

$$Q = 1 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_a = Q_c = 0,5 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$K_a = 0,1$$

$$K_c = 0,75$$

Calculo de las Velocidades

$$V = \frac{Q}{\frac{\pi \cdot D^2}{4}} = \frac{1}{\frac{\pi \cdot 2^2}{4}} = 0,318 \text{ m/s}$$

$$V_a = V_c = \frac{Q_a}{\frac{\pi \cdot D_a^2}{4}} = \frac{0,5}{\frac{\pi \cdot 2^2}{4}} = 0,159 \text{ m/s}$$

Perdidas

$$h_a = K_a \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} + \frac{V^2 - V_a^2}{2 \cdot g} = 0,1 \cdot \frac{0,318^2}{2 \cdot 9,81} + \frac{0,318^2 - 0,159^2}{2 \cdot 9,81} = 0,00438 \text{ m}$$

$$h_c = K_c \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} + \frac{V^2 - V_c^2}{2 \cdot g} = 0,75 \cdot \frac{0,318^2}{2 \cdot 9,81} + \frac{0,318^2 - 0,159^2}{2 \cdot 9,81} = 0,0077 \text{ m}$$

$$\text{Perdida por Bifurcaci3n} = h_a + h_c = \mathbf{0,012 \text{ m}}$$

Análisis de costos

ALTERNATIVA I

Costo equipo Turbo – Generador (Para caudales 0,5 – 2,5 m³/s)

$$\text{Costo}_{\text{equipo}} = 142000 \times (Q \times H^{0,5})^{0,07}$$

$$\text{Costo}_{\text{equipo}} = 142000 \times (1 \times 7,88^{0,5})^{0,07}$$

$$\text{Costo}_{\text{equipo}} = 152.639,439 \text{ US\$}$$

Costos de obras civiles

$$\text{Coc} = 4600 \times H^{0,08} / P^{0,55}$$

$$\text{Coc} = 4600 \times 7,88^{0,08} / 73,394^{0,55}$$

$$\text{Coc} = 73.179,60 \text{ US\$}$$

Costos de Mantenimiento

$$\text{Costo}_{\text{Mant}} = 3\% \text{ Inversión Inicial}$$

$$\text{Costo}_{\text{Mant}} = 3\% (232.869,439)$$

$$\text{Costo}_{\text{Mant}} = 6.986,083 \text{ US\$}$$