



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**MODELO DEL COMPORTAMIENTO DE PRESAS EN CASCADA  
Y VISUALIZACIÓN POR SOFTWARE**

**David Estuardo Alcántara Arroyave**  
Asesorado por el Ing. Jorge Luis Pérez Rivera

Guatemala, noviembre de 2009

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**MODELO DEL COMPORTAMIENTO DE PRESAS EN CASCADA  
Y VISUALIZACIÓN POR SOFTWARE**

TRABAJAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR:

**DAVID ESTUARDO ALCÁNTARA ARROYAVE**  
ASESORADO POR EL ING. JORGE LUIS PEREZ RIVERA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE  
**INGENIERO ELECTRICISTA**

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2009

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA**



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. José Milton De León Bran
VOCAL V	Br. Isaac Sultán Mejía
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Veliz Vargas

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXÁMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Jorge Luis Pérez Rivera
EXAMINADOR	Ing. Armando Gálvez Castillo
EXAMINADOR	Ing. Julio Rolando Barrios Archila
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Veliz Vargas

**HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

Cumpliendo con los preceptos que establece la Ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo titulado:

**MODELO DEL COMPORTAMIENTO DE PRESAS EN CASCADA Y  
VISUALIZACION POR SOFTWARE**

tema que me fue aprobado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, con fecha 4 de julio del 2008.

A handwritten signature in black ink, enclosed within a circular stamp. The signature is stylized and appears to read 'David Estuardo Alcántara Arroyave'.

David Estuardo Alcántara Arroyave

2002-12726

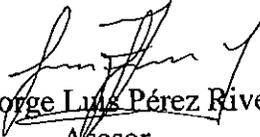


Guatemala, 09 de octubre de 2009

Ing. Guillermo Bedoya  
Coordinador del Área de Potencia  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero,

Atentamente me permito comunicarle que he tenido a la vista el trabajo de graduación del estudiante David Estuardo Alcántara Arroyave, Carné 200212726, titulado: **MODELO DEL COMPORTAMIENTO DE PRESAS EN CASCADA Y VISUALIZACIÓN POR SOFTWARE**, y después de realizar las revisiones correspondiente, lo encuentro satisfactorio, procediendo por este medio a su aprobación.

  
Ing. Jorge Luis Pérez Rivera  
Asesor.



Ref. EIME 44..2009  
Guatemala, 10 de NOVIEMBRE 2009.

FACULTAD DE INGENIERIA

Señor Director  
Ing. Mario Renato Escobedo Martínez  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

**Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:  
MODELO DEL COMPORTAMIENTO DE PRESAS EN CASCADA  
Y VISUALIZACIÓN POR SOFTWARE, del estudiante David  
Estuardo Alcántara Arroyave, que cumple con los requisitos  
establecidos para tal fin.**

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,

**ID Y ENSEÑAD A TODOS**

**Ing. José Guillermo Bedoya Barrios**  
**Coordinador Área de Potencia**

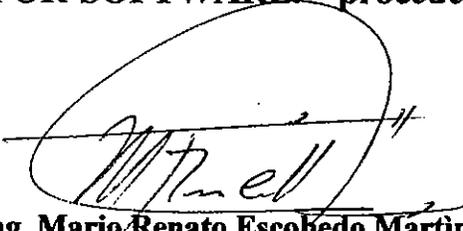
JGBB/sro





REF. EIME 70. 2009.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; David Estuardo Alcántara Arroyave titulado: **MODELO DEL COMPORTAMIENTO DE PRESAS EN CASCADA Y VISUALIZACIÓN POR SOFTWARE.** procede a la autorización del mismo.



Ing. Mario Renato Escobedo Martínez



GUATEMALA, 12 DE NOVIEMBRE 2,009.



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **MODELO DEL COMPORTAMIENTO DE PRESAS EN CASCADA Y VISUALIZACIÓN POR SOFTWARE**, presentado por el estudiante universitario **David Estuardo Alcántara Arroyave**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

A large, handwritten signature in black ink, consisting of a large loop and several vertical strokes.

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos  
DECANO



Guatemala, noviembre de 2009

/gdech

## **ACTO QUE DEDICO A:**

### **Dios**

Ser supremo, omnisciente, omnipresente y creador del universo, que con su amor me ha apoyado y bendecido en todo el transcurrir de mi vida, ha cuidado de mí y de mis seres queridos, a quien dedico el cumplimiento de esta meta en mi vida.

### **Mis padres**

*Germán David y Sandra Elizabeth*

Gracias por traerme al mundo, por sus consejos en tiempos difíciles y por haberme educado centrándome en la obediencia, el respeto y las buenas costumbres, mi agradecimiento eterno por su apoyo para hacer realidad otra de nuestras metas y por darme la oportunidad de pertenecer a esta linda familia.

### **Mis hermanas**

*Sandra Noemí y Marta Elizabeth*

Gracias por sus consejos, apoyo y compañía durante toda nuestra vida.

### **Mi novia**

*Laura Madeleine*

Eres la luz que ilumina mi vida, gracias por tu dedicación y apoyo para cumplir este sueño, por mostrarme la senda del amor y de la ilusión, mi amor eterno a ti.

### **Mis abuelos**

*Samuel Alcántara*

Por sus sabias enseñanzas y apoyo durante toda mi vida, que han servido para desarrollarme como ser humano.

*Francisca Miró (D.E.P)*

Mujer ejemplar que Dios me permitió conocer y querer, sé que desde el cielo me da su bendición, gracias abuelita.

## AGRADECIMIENTOS A:

- *Mi asesor Ing. Jorge Luis Pérez Rivera*, por su amistad, consejo, apoyo y paciencia en la elaboración de este proyecto.
- *Mi revisor Ing. José Guillermo Bedoya Barrios*, por su cooperación y apoyo para el logro de este trabajo.
- *Geoconsa Generación*, en especial al Ing. Luis Felipe García Pinot, mi agradecimiento por su amistad y por el apoyo en el desarrollo personal y laboral de mi vida.
- *Hidroeléctrica El Recreo/Hidrotama*, mi agradecimiento por la facilitación de información para el desarrollo de este proyecto, y por ayudar a desarrollarme profesionalmente, en especial a Virgilio Casado Briz (D.E.P.).
- *Mis cuñados*, Iván, Freddy y José Eduardo por su apoyo y consejos.
- *Mis compañeros de trabajo*, gracias por transmitirme sus conocimientos y por ofrecerme su amistad.
- *Mis amigos en general*, gracias por aceptarme en este grupo tan unido.
- *Mi familia en general*, gracias por su apoyo y consejos durante toda mi vida

# ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES</b>	<b>V</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b>	<b>XI</b>
<b>GLOSARIO</b>	<b>XIII</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>XIX</b>
<b>OBJETIVOS</b>	<b>XXI</b>
<b>HIPÓTESIS</b>	<b>XXIII</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>XXV</b>
<b>1. PLANTAS GENERADORAS DE ELECTRICIDAD</b>	<b>1</b>
1.1 Centrales hidroeléctricas	1
1.1.1 Aspectos generales de las centrales hidroeléctricas	2
1.1.2 Funcionamiento básico de una central hidroeléctrica	4
1.1.3 Aprovechamiento hidráulico	5
1.1.3.1 Obtención de desnivel	5
1.1.3.2 Mediante canal de derivación	6
1.1.3.3 Mediante una presa	6
1.1.3.4 Mediante una combinación de ambos	6
1.1.4 Clasificaciones de las centrales hidroeléctricas	7
1.1.4.1 Según salto de agua	7
1.1.4.2 Según el discurrir del agua	7
1.2 Máquinas hidráulicas	9
1.2.1 Clasificación de las máquinas hidráulicas	10
1.2.2 Turbina hidráulica	11
1.2.2.1 Grado de reacción	11
1.2.2.2 Dirección de flujo	13
1.2.2.3 Número específico de revoluciones	13

1.2.3	Turbinas en centrales hidroeléctricas	14
1.2.4	Turbinas más usadas en Guatemala	16
1.2.4.1	Turbinas Pelton	16
1.2.4.2	Turbinas Francis	24
1.2.4.3	Turbinas Kaplan	31
1.3	Criterios de selección para Turbinas	33
1.3.1	Criterios técnicos para selección de turbinas	33
1.3.2	Centrales de alta presión	34
1.3.3	Centrales de media presión	35
1.3.4	Centrales de baja presión	35
1.4	Ventajas y desventajas de las centrales hidroeléctricas	36
1.5	Hidroeléctricas de la línea de presas en cascada	37
1.5.1	Descripción informática de las centrales en cascada	37
1.5.1.1	Hidroeléctrica Santa María	37
1.5.1.2	Hidroeléctrica Canadá	38
1.5.1.3	Hidroeléctrica Monte Cristo	39
1.5.1.4	Hidroeléctrica El Recreo	40
1.5.2	Ubicación territorial de las centrales	41
1.5.2.1	Hidroeléctrica Santa María	41
1.5.2.2	Hidroeléctrica Canadá	41
1.5.2.3	Hidroeléctrica Monte Cristo	41
1.5.2.4	Hidroeléctrica El Recreo	41
1.5.3	Descripción del tipo de turbina instalada	42
1.5.3.1	Hidroeléctrica Santa María	42
1.5.3.2	Hidroeléctrica Canadá	43
1.5.3.3	Hidroeléctrica Monte Cristo	43
1.5.3.4	Hidroeléctrica El Recreo	43

<b>2. CUENCAS, EMBALSES Y PRESAS</b>	<b>45</b>
2.1 Cuenca hidrográfica	45
2.1.1 Cuenca río Samalá	46
2.2 Embalses	50
2.2.1 Capacidad de un embalse	51
2.3 Presas	52
2.3.1 Requisitos para la investigación geológica y muestreo en el diseño de presas	54
2.3.2 Partes que conforman una presa	54
2.3.3 Tipos de presas	56
2.3.3.1 Por su estructura	56
2.3.3.2 Por sus elementos de construcción	57
2.3.3.3 Por su aplicación	58
2.3.3.4 Por su operación	59
2.4 Modalidad de presas en cascada	60
2.4.1 Presa Hidroeléctrica Santa María	62
2.4.1.1 Embalse Hidroeléctrica Santa María	63
2.4.2 Presa Hidroeléctrica Canadá	64
2.4.2.1 Embalse Hidroeléctrica Canadá	64
2.4.3 Presa Hidroeléctrica Montecristo	65
2.4.3.1 Embalse Hidroeléctrica Montecristo	65
2.4.4 Presa Hidroeléctrica El Recreo	66
2.4.4.1 Embalse Hidroeléctrica El Recreo	67
<b>3. MODELACIÓN DE APROXIMACIÓN OPERATIVA POR MÉTODOS MATEMÁTICOS</b>	<b>69</b>
3.1 Disponibilidad del recurso	69
3.2 Tendencias de la demanda en el Sistema Nacional Interconectado de Guatemala	70

3.3	Políticas de operación y determinación de precios de energía	73
3.3.1	Administrador del Mercado Mayorista	74
3.4	Simulación del comportamiento	81
3.4.1	Época de verano (caudal evidentemente reducido)	82
3.4.2	Época de invierno (caudal incrementado)	95
3.5	Modelo aproximado del comportamiento actual entre las centrales Canadá, Montecristo y El Recreo	109
3.5.1	Definición de volumen aproximado para la presa El Recreo	113
3.5.2	Modelo aproximado para las tendencias del precio Spot en presas en cascada.	117
3.5.3	Análisis de contingencia de suceso no previstos	124
3.5.4	Simulación de costos de los suceso no previstos	126
<b>4.</b>	<b>SIMULACIÓN VISUAL DEL MODELO PRESAS EN CASCADA POR SOFTWARE</b>	<b>129</b>
4.1	Características del software	129
4.2	Funcionamiento del programa	129
4.2.1	Visualización y coordinación del modelo	134
	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>137</b>
	<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>141</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>143</b>

# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1.	Diferentes tipos de aprovechamiento hidráulico	1
2.	Infraestructura de una central hidroeléctrica	4
3.	Elevación de cotas geodésicas o salto hidráulico	6
4.	Central de agua embalsada	8
5.	Elevación central tipo Kaplan	14
6.	Esquemático de una central hidroeléctrica	15
7.	Planta de Turbina Pelton	16
8.	Caracol o distribuidor	17
9.	Tobera	18
10.	Elevación deflector de tobera	19
11.	Disposición del ángulo de choque en el cangilón	20
12.	Diseño de cangilón rodete Pelton acotado	20
13.	Diseño de un rodete Pelton.	21
14.	Elevación de cotas geodésicas	22
15.	Estructura turbina Francis	26
16.	Elevación central tipo Francis	27
17.	Diseño de rodete y distribuidor Francis	28
18.	Proyección del agua en una turbina Francis	28
19.	Distribuidor Fink usado para turbina Francis	30
20.	Disposición palas directrices rodete Kaplan	32
21.	Mapa de ubicación de la central El Recreo.	42
22.	Perfil de cotas de la trayectoria del Samalá en cada central.	44
23.	Trayectoria de la cuenca Samalá, del tipo cuenca abierta	45
24.	Trayectoria de la cuenca Samalá desde su inicio hasta su desembocadura	47
25.	Desarrollo de duración de caudales mínimos río Samalá.	49

26.	Desarrollo de duración de caudales máximos río Samalá.	49
27.	Desarrollo de duración de caudales río Salamá.	50
28.	Trayectoria de una cuenca, con montaje del tipo cascada	61
29.	Presa Hidroeléctrica Santa María	63
30.	Embalse Hidroeléctrica Santa María	64
31.	Embalse Hidroeléctrica Canadá	65
32.	Embalse Hidroeléctrica Monte Cristo	66
33.	Embalse Hidroeléctrica El Recreo	67
34.	Sistema Nacional Interconectado	72
35.	Tendencias de la demanda horaria.	73
36.	Estadísticas del precio por MW de los agentes generadores	75
37.	Tendencias del precio spot vrs. demanda diaria.	77
38.	Comparación potencia demanda vrs. potencia generada	79
39.	Abastecimiento de energía térmico vrs. hidroeléctrico.	81
40.	Comparación de niveles de cargas, para el día 7 de marzo del 2008.	83
41.	Comparación de niveles de cargas, para el día 8 de marzo del 2008.	85
42.	Comparación de niveles de cargas, para el día 9 de marzo del 2008.	87
43.	Comparación de niveles de cargas, para el día 10 de marzo del 2008	89
44.	Comparación de niveles de cargas, para el día 11 de marzo del 2008	91
45.	Comparación de niveles de cargas, para el día 12 de marzo del 2008	93
46.	Comparación de niveles de cargas, para el día 13 de marzo del 2008	95
47.	Comparación de niveles de cargas, para el día 21 de septiembre del 2008.	97
48.	Comparación de niveles de cargas, para el día 22 de septiembre del 2008.	99
49.	Comparación de niveles de cargas, para el día 23 de septiembre del 2008.	101
50.	Comparación de niveles de cargas, para el día 24 de septiembre del 2008.	103
51.	Comparación de niveles de cargas, para el día 25 de septiembre del 2008.	105
52.	Comparación de niveles de cargas, para el día 26 de septiembre del 2008.	107
53.	Comparación de niveles de cargas, para el día 27 de septiembre del 2008	109
54.	Tendencias normales para el día 13 de marzo del 2008.	111

55.	Linealidad en el comportamiento de Canadá y El Recreo	112
56.	Linealidad en el comportamiento entre Montecristo y El Recreo.	113
57.	Muestra la aproximación volumétrica de la cuenca para la presa de El Recreo.	114
58.	Muestra la aproximación volumétrica de la cámara de carga de El Recreo.	114
59.	Tendencias normales para el día 13 de marzo del 2008.	118
60.	Tendencias normales y de la predicción por medio del modelo para un día de verano	120
61.	Tendencias normales para el día 25 de septiembre del 2008	121
62.	Tendencias normales y de la predicción por medio del modelo para un día de invierno	123
63.	Pantalla principal Scada	130
64.	Pantalla principal Scada al ingresar	130
65.	Pantalla preliminar estacional	131
66.	Pantalla para realizar la elección estacional	131
67.	Pantalla de visualización de la cuenca	132
68.	Pantalla de la cuenca presionando el botón precio Spot	133
69.	Despliegue de un gráfico del precio spot a elección del operador	133
70.	Pantalla completa de la visualización de la cuenca	134
71.	Despliegue de el modelo de aproximación	135
72.	Integración de datos en el modelo de aproximación	135
73.	Visualización del resultado del modelo de aproximación	136
74.	Visualización total del modelo	136

## TABLAS

I.	Diferencias entre las turbinas de acción y reacción	12
II.	Clasificación de turbinas, según saltos, diámetro y potencia.	36

III.	Características del generador	38
IV.	Características técnicas de los generadores de central Canadá.	39
V.	Características técnicas de los generadores de central Monte Cristo.	40
VI.	Características técnicas de los generadores de central El Recreo.	40
VII.	Comparación de las diferentes turbinas instaladas en la cuenca Samalá	44
VIII.	Resultados análisis de contenidos	48
IX.	Reporte principales ríos de Guatemala y sus caudales	70
X.	Clasificación de los agentes	71
XI.	Capacidad instalada de centrales eléctricas.	80
XII.	Comparación de nivel de generación para el día 7 de marzo de 2008	82
XII.	Comparación de nivel de generación para el día 8 de marzo de 2008	84
XIV.	Comparación de nivel de generación para el día 9 de marzo de 2008	86
XV.	Comparación de nivel de generación para el día 10 de marzo de 2008	88
XVI.	Comparación de nivel de generación para el día 11 de marzo de 2008	90
XVII.	Comparación de nivel de generación para el día 12 de marzo de 2008	92
XVIII.	Comparación de nivel de generación para el día 13 de marzo de 2008	94
XIX.	Comparación de nivel de generación para el día 21 de septiembre de 2008	96
XX.	Comparación de nivel de generación para el día 22 de septiembre de 2008	98
XXI.	Comparación de nivel de generación para el día 23 de septiembre de 2008	100
XXII.	Comparación de nivel de generación para el día 24 de septiembre de 2008	102
XXIII.	Comparación de nivel de generación para el día 25 de septiembre de 2008	104
XXIV.	Comparación de nivel de generación para el día 26 de septiembre de 2008	106

XXV.	Comparación de nivel de generación para el día 27 de septiembre de 2008	108
XXVI.	Datos de la generación horaria para el 13 de marzo del 2008	110
XXVII.	Factores de planta para las centrales en cascada.	116
XXVIII.	Tendencias normales y de la predicción por medio del modelo, el día 13 de marzo 2008.	119
XXIX.	Tendencias normales y de la predicción por medio del modelo, el día 25 de septiembre 2008.	122
XXX.	Contingencias con alta probabilidad	125
XXXI.	Simulación para contingencia para el día 7 de marzo del 2008	126



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>%</b>	Porcentaje
<b>&lt;</b>	Menor que
<b>=</b>	Igual que
<b>&gt;</b>	Mayor que
<b>0°0'0''</b>	Grados, minutos y segundos
<b>AMM</b>	Administrador del Mercado Mayorista
<b>cte.</b>	Constante
<b>GRP</b>	Glass-reinforced plastic (Material plástico reforzado con fibras finas de vidrio)
<b>H</b>	Altura
<b>Hrs</b>	Horas
<b>Hz</b>	Hercio
<b>Km</b>	Kilometro
<b>km<sup>2</sup></b>	Kilómetros cuadrados
<b>kV</b>	Kilovoltio
<b>M</b>	Metro
<b>m<sup>3</sup></b>	Metros cúbicos
<b>m<sup>3</sup>/s</b>	Metro cúbico por segundo

<b>MHz</b>	Mega Hertz
<b>m.s.n.m.</b>	Metros sobre el nivel del mar
<b>MVA</b>	Mega Voltamperio
<b>MW</b>	Mega Vatio
<b>MWh</b>	Mega vatio hora
<b>PF</b>	Lazo de control Potencia Activa y Frecuencia del sistema
<b>Q</b>	Caudal
<b>QV</b>	Lazo de control Potencia Reactiva y nivel de Voltaje
<b>RPM</b>	Revoluciones por minuto
<b>RTU</b>	Unidad telemétrica remota
<b>sin</b>	Sistema Nacional Interconectado
<b><math>\Delta/Y</math></b>	Conexión Delta/Estrella

## GLOSARIO

<b>Afluentes:</b>	Río o arroyo que desemboca en otro, con independencia de su caudal.
<b>Aforo:</b>	Medición del caudal de una corriente.
<b>Axial:</b>	Referente al eje o relativo a él.
<b>Azolves:</b>	Lodo o suciedad que obstruye un conducto.
<b>Bares:</b>	Unidad de presión de una columna de mercurio de 750.06 mm de altura.
<b>Basalto:</b>	Roca volcánica o efusiva de color oscuro con textura micro cristalina o porfirica, que contiene plagioclasas y piroxenos.
<b>Cangilón:</b>	Cada uno de los recipientes atados a la rueda o turbina, que sirve para dar empuje a la máquina.
<b>Cavitación:</b>	Formación de cavidades. Formación de pequeñas burbujas de aire en el seno de líquidos turbulentos o en materias amorfas u orgánicas sometidos a la intensa acción de las ondas sonoras.
<b>Centrífuga:</b>	Se dice de lo que en un movimiento circular, y en virtud de la inercia, se aleja del centro.
<b>Centrípeta:</b>	Lo que en un movimiento circular tiende e impele hacia el centro.
<b>Ciclópeo:</b>	Gigantesco de gran solidez.

<b>Cinética:</b>	Parte de la mecánica que estudia el movimiento.
<b>Cota:</b>	Altura de un punto sobre un plano que sirve de referencia.
<b>Deflector:</b>	Aparato usado para cambiar la dirección del fluido de empuje en una turbina hidráulica.
<b>Desfiladeros:</b>	Paso estrecho entre montañas, de paredes abruptas, producto de la erosión de las aguas de un río.
<b>Eólica:</b>	Relativo a los vientos, producido o accionado por el viento.
<b>Epóxicos:</b>	Es un polímero termoestable que se endurece cuando se mezcla con un agente catalizador.
<b>Escarpados</b>	Declinación áspera de un terreno.
<b>Escorrentía:</b>	Superficie de escorrentía o, en general, cuenca, se llama el conjunto de extensiones de terreno que vierten sus aguas aun mismo río o a un mismo mar.
<b>Estató:</b>	La parte fija de una máquina rotatoria de corriente monofásica o trifásica.
<b>Excitatriz:</b>	Es un devanado que sirve para inducir el voltaje que servirá para generar el voltaje en el generador.
<b>Geodésica:</b>	Línea sobre una superficie, tal que la distancia entre dos puntos cualesquiera de la superficie situados sobre dicha línea, y medida sobre ella, es mínima.
<b>Geo-Membrana:</b>	Lámina impermeable hecha a partir de resinas plásticas que sirve para eliminar pérdidas en embalse en centrales hidroeléctricas.

- Geotérmica:** Es la obtención de energía por medio del vapor proveniente de reservorios en los subsuelos de la tierra.
- Golpe de Ariete:** En hidroeléctricas, es cuando las toberas se cierran ocasionando, que las partículas del fluido que se han detenido son empujadas por las que vienen inmediatamente detrás y aplastan a las primeras, ocasionando una compresión ligera en el fluido y también provocando una sobrepresión que causará la dilatación en la tubería.
- Hertz:** Unidad de frecuencia que equivale a un ciclo por segundo.
- Hidráulico:** Ciencia y técnica que estudia las aguas naturales, en función de su aprovechamiento. Movimiento provocado por la fuerza del agua.
- Hormigón:** Mezcla de piedras menudas y mortero de cemento y arena, usada en construcción, es muy utilizado por su gran resistencia y adaptabilidad.
- Mampostería:** Construcción hecha con mampuestos desiguales y colocados sin formar hileras regulares.
- Motriz:** Máquina que desarrolla una fuerza mecánica de propulsión.
- Par:** En un motor eléctrico, dícese a la fuerza resultante de la interacción de un par de polos magnéticos, creados por el paso de corriente.
- Pistón:** Pieza cilíndrica generalmente metálica, que realiza un movimiento rectilíneo alternativo en el interior de un cilindro.

<b>Primotor:</b>	Fuerza primaria dentro de una maquina mixta, que ejerce una energía de impulsión para transformar esta energía en otro tipo.
<b>Propela:</b>	Es el medio impulsor en una turbina del tipo Kaplan.
<b>Radial:</b>	Relativo al radio, que parte del centro o punto central o se dirige a ese punto.
<b>Rotor:</b>	Parte móvil en una máquina eléctrica rotatoria.
<b>Rubber Dame:</b>	Por su significado en español, compuerta del tipo inflable fabricada de un compuesto en su mayoría caucho.
<b>Salto Neto:</b>	Diferencia de nivel entre dos puntos, en Centrales Hidroeléctricas, la distancia vertical entre los niveles de agua superior e inferior.
<b>Scada:</b>	Por su significado en español, sistema de control automatizado y adquisición de datos.
<b>Síncrona:</b>	Simultaneo, que se efectúa al unísono o al mismo tiempo.
<b>Spot:</b>	Referido al costo instantáneo por MWh en Guatemala.
<b>Tobera:</b>	Conducto de sección variable que sirve para aumentar la energía cinética de un fluido a costa de su entalpía.
<b>Topología:</b>	Parte de las matemáticas que trata de la continuidad y de otros conceptos más generales originados de ellas.
<b>Transductor:</b>	Dispositivo que permite la correspondencia de una magnitud de entrada u otra de salida, según una relación determinada.

- Trifásico:** Se dice de la corriente eléctrica formada por tres corrientes alternas desfasadas mutuamente en un tercio de período.
- Voltio:** Unidad práctica de la diferencia de potencial eléctrico, denominada así en honor del físico Volta.
- Watt:** Unidad Práctica de potencia eléctrica, denominada así en honor de James Watt.



## **RESUMEN**

Las centrales eléctricas son un conjunto de infraestructura por medio de las cuales se logra el aprovechamiento hidráulico para la generación de energía eléctrica; se les conoce también como centrales de energía renovable, ya que no afectan la vulnerabilidad del medio ambiente pues la generación se da a través de medios limpios, es decir, de medios que no provocan contaminación.

El sistema de generación eléctrica, básicamente descansa sobre tres pilares elementales, la cuenca a utilizar, la topografía del terreno y la infraestructura, que conjugados entre sí permiten el eficiente aprovechamiento hidráulico. Afortunadamente, la topología y la abundante naturaleza del territorio guatemalteco, proveen grandes ventajas en cuanto a la disponibilidad de ríos caudalosos que permiten la ejecución de proyectos hídricos; las diversas maneras de aprovechamiento hidráulico permiten predecir que las centrales hidroeléctricas, se constituirán en el futuro, en una fuente importante para el abastecimiento de energía eléctrica al Sistema Nacional Interconectado, cubriendo la demanda diaria a través de una actividad generadora económica y con un índice contaminante muy reducido.

Dentro de la infraestructura necesaria para un sistema de generación hidroeléctrica se destaca la presa, estructura de diversos materiales, cuya función principal radica en la captación del agua que posteriormente será utilizada como medio motriz que impulsará las turbinas en un proceso de transformación de energía potencial a energía cinética, que luego es transformada a energía mecánica por medio de la turbina y transmitida por el eje al generador derivando, finalmente, en energía eléctrica.

El trabajo de investigación que el lector tiene en sus manos, se enfoca principalmente en el aprovechamiento hidráulico a través de la modalidad de presas en cascada, es decir, varias presas instaladas en la línea de una cuenca con una muy buena cuantía y con características peculiares. El procedimiento inicia con el embalse de una gran cantidad de agua en una presa principal para turbinarla y luego atajarla en una presa de menor tamaño, aprovechando el desfogue de la primera y turbinando su volumen, así consecutivamente hasta el punto mínimo de cota de posible instalación de centrales.

En Guatemala, este sistema aún se encuentra en una etapa de prueba y error, sin embargo dentro de las conclusiones obtenidas durante el proceso de elaboración de este trabajo, se ha podido comprobar que a través de la modalidad de presas en cascada se obtiene la máxima eficiencia al afluente principal que alimenta dichas centrales hidroeléctricas y por lo tanto se obtiene mayor eficiencia en el día de generación, tal y como sucede en el caso de las cuatro centrales en tipo cascada que se alimentan de la cuenca del río Samalá, iniciando en Hidroeléctrica Santa María, atravesando Canadá, Montecristo y finalizando en Hidroeléctrica El Recreo.

## **OBJETIVOS**

### **General**

- Definir la suma importancia que tiene la modalidad de la Presas en Cascada para maximizar la eficiencia en los recursos hídricos, mejorando el aprovechamiento de la energía restante y utilizable en el desfogue de cada central.

### **Específicos:**

1. Proporcionar fundamentos como guía para la implementación por medio aproximados de una ecuación, para definir el comportamiento de presas en línea por medio de base de datos de generación versus cotas de presas.
2. Ver reflejado el mejoramiento en la eficiencia de la central de la última línea de la cascada, usando la aproximación para la toma de decisiones de los operadores de la planta.
3. Facilitar la visualización de la aproximación del comportamiento de las presas por medios gráficos de las cotas y generación de cada planta.
4. Tener un concepto de cantidades cubicas de agua comparadas con la producción de energía transformado en capital.



## **HIPÓTESIS**

Se tiene conocimiento de la importancia en la eficiencia de una central hidroeléctrica y los puntos de relevancia en dicha eficiencia, en la que la cota de altura de agua tiene un papel muy importante. Lo que se tratará de probar en este trabajo de investigación es la funcionalidad en la implementación de un modelo matemático para anticipar cambios en la generación de Hidroeléctrica El Recreo, el cual dependerá de las cotas y generación de las Hidroeléctricas Santa María, Canadá y Monte Cristo; todo ello aportará un gran beneficio porque permitirá un pronóstico relativamente exacto y comparativo para la toma de decisiones en los operadores de manera que sea posible el aprovechamiento al máximo de la modalidad de presas en cascada; al mismo tiempo también permite el análisis económico del abastecimiento del recurso hídrico en la presa y las subdivisiones monetarias en toda la cascada, lo cual proveerá una idea de la importancia en ganancias económicas que resultan de estos proyectos.



## INTRODUCCIÓN

La generación hidráulica juega un papel fundamental en el abastecimiento del sistema eléctrico guatemalteco, es uno de los métodos más económicos, funcionalmente hablando, y sus costos de mantenimiento son relativamente bajos en relación a su producción; la presa es uno de los elementos con mayor importancia en el desarrollo de una hidroeléctrica, existen diversos tipos, sin embargo en este trabajo se dará mayor relevancia al método de aprovechamiento hidráulico en conjunto de presas, desfogues e inyección de afluentes extremos.

La modalidad de presas en cascada, es la coordinación de varias centrales eléctricas para hacer más eficiente el día de generación, especialmente, en el aspecto económico y en la cobertura de la demanda diaria de generación eléctrica. Afortunadamente en Guatemala se cuenta con riqueza de afluentes hídricos y con extensiones cortas de territorio, con grandes diferencias de alturas, las cuales son aprovechadas para la utilización en turbina de generación, como en el caso de la cuenca del río Samalá aprovechada por las presas en cascada que inician en Hidroeléctrica Santa María, Canadá, Montecristo y finaliza en El Recreo.

Desde el punto de vista económico este sistema se utiliza para obtener el máximo beneficio económico, porque lo que principalmente se busca es la generación de acuerdo al precio *spot*, es decir, al precio que se mueve entre la oferta y la demanda y, como en todo mercado lo que se quiere es vender más cuando el precio es más alto, teniendo el mismo costo de producción, es decir, preferir vender más por más tiempo cuando sube el precio

Desde el punto de vista del medio ambiente, este sistema también ofrece la ventaja de que para el aprovechamiento hídrico no se excede en los daños al ecosistema, además

el sistema de presas en cascada obtiene la mayor eficiencia aprovechando, en su mayoría, el salto hidráulico desde el inicio hasta el final de la cuenca.

En el transcurso del presente trabajo, se desarrollan los temas arriba mencionados indicando cuales son las principales características de un sistema de presas en cascada, también se mencionarán las ventajas que tiene y se creará un modelo matemático que permita anticipar cambios en la generación, principalmente basándose en la actividad de Hidroeléctrica El Recreo.

El primer y segundo capítulo se enfoca principalmente, a los elementos teóricos que servirán al lector para la mejor comprensión del tema, se exponen los aspectos generales de las centrales hidroeléctricas y su funcionamiento básico, se explica en qué consiste el aprovechamiento hidráulico y las diversas máquinas que pueden ser utilizadas para dicho fin. También se aporta la información de las cuatro hidroeléctricas que forman parte total de la investigación, describiendo su actividad, la ubicación y el tipo de máquinas hidráulicas en base a las cuales desempeñan su actividad generativa. Se acerca al lector básicamente en los principales conceptos relacionados con la generación hidráulica.

El capítulo tercero es la comprobación de la linealidad entre cada una de las plantas y de esta manera comprobar la dependencia en un sistema de presas en cascada, también se presenta un modelo matemático que simula dicha linealidad y un análisis económico que demuestra la eficiencia del beneficio-costos en la central El Recreo. El cuarto capítulo es la visualización de la linealidad y del análisis beneficio-costos para la central El Recreo, tomando en cuenta condiciones climáticas. Esta visualización se realiza a través de un software tipo Scada, para que el operador pueda predecir el despacho horario de potencia por día.

Por último, como resultado del trabajo de investigación se obtuvieron una serie de conclusiones y recomendaciones que el lector podrá encontrar en la parte final de este documento.

# 1. PLANTAS GENERADORAS DE ELECTRICIDAD

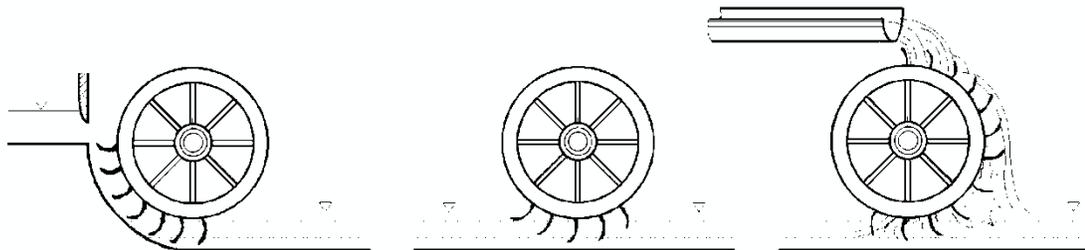
Las centrales eléctricas son instalaciones productoras de energía eléctrica; son infraestructuras donde se conjugan una serie de máquinas motrices y aparatos con el fin de generar energía eléctrica.

Las centrales reciben el nombre genérico de energía primaria y están integradas por: centrales térmicas de carbón, centrales nucleares, centrales hidráulicas o hidroeléctricas, centrales eólicas, centrales geotérmicas, etc.

## 1.1 Centrales hidroeléctricas

Desde los tiempos remotos la humanidad ha desarrollado máquinas para facilitar y beneficiar su vida, un ejemplo claro de ello son las máquinas impulsadas por medios hidráulicos, cuyo objetivo es el aprovechamiento de la fuerza cinética proveniente de la energía potencial que posee el agua y que la convierten en medio impulsor hacia un eje; en la figura 1 se pueden distinguir tres tipos de aprovechamientos hidráulicos y de éste haciendo diferentes trabajos, tal como sucede en los molinos.

Figura 1. **Diferentes tipos de aprovechamiento hidráulico.**



Fuente: [www.oni.escuelas.edu.ar/2001/neuquen/poderdelrio/represashidros.htm](http://www.oni.escuelas.edu.ar/2001/neuquen/poderdelrio/represashidros.htm)

### **1.1.1 Aspectos generales de las centrales hidroeléctricas**

Una central hidroeléctrica, es un conjunto de infraestructuras instaladas con el propósito de generar energía eléctrica por medio del aprovechamiento hidráulico o energía potencial hidráulica; lo más importante en este tipo de centrales es lograr una generación de energía por medios limpios y sin afectar la vulnerabilidad del medio ambiente de manera significativa, por ello se le denomina centrales de energía renovable, siendo ésta el propósito principal de dichas centrales.

Desde un punto de vista científico, se puede decir que la energía hidráulica es la fuente de energía solar más ampliamente utilizada. En este caso el papel del astro es indirecto al actuar sobre el ciclo hidrológico. Dicho ciclo comienza cuando el sol calienta el agua de los mares, ríos y lagos, produciendo su evaporación; a continuación, el agua evaporada es transportada a diferentes puntos de la tierra por el aire caliente, formando las nubes, cayendo en forma de lluvia y nieve a la superficie, debido al enfriamiento de éstas; el agua de la lluvia y la nieve es depositada en los ríos y lagos que luego desembocan en el mar, forman manantiales y alimentan de nuevo ríos y lagos a través de su lecho o saliendo a la superficie por transpiración. A partir de este momento, el ciclo hidrológico puede comenzar de nuevo.

La energía del agua que circula por el cauce de un río se representa en forma de energía cinética y potencial, normalmente la primera es pequeña, por lo que es realmente la segunda la que se utiliza. En la práctica, la energía potencial no se puede aprovechar en su totalidad, ya que parte se disipa por el rozamiento del agua en su recorrido. Por esta razón, cuando se proyecta la construcción de una instalación para aprovechamiento y uso de la energía del agua de un río, en algunas ocasiones, se modifica el recorrido natural con idea de reducir las pérdidas al mínimo posible.

La cantidad de energía que se puede aprovechar de una corriente de agua situada a una determinada elevación, varía en función de la altura disponible y de la cantidad de agua. La conjugación de ambas magnitudes se traduce en la posibilidad de que resulten atractivos, tanto los ríos con grandes desniveles, así como aquellos en los que los desniveles sean pequeños, cuando la cantidad de agua que circula por ellos es alta y por lo tanto su energía disponible también. La energía hidráulica como fuente de energía se utiliza, aunque tiene otros usos, casi exclusivamente para la producción de energía eléctrica, verificándose que la transformación energética se realiza con un rendimiento muy alto, a diferencia de lo que ocurre con otras fuentes de energía.

Sin embargo, los altos niveles de eficiencia no son fáciles de alcanzar, dadas las dificultades que conlleva el diseño de una hidroeléctrica; una de las condiciones más difícil, es encontrar la cuenca para la represa, ya que todos los cauces en esta época están utilizados y aquellos que no, por lo general, tienen problemas de tipo ambiental. Aún así, la limpieza, rentabilidad y poco mantenimiento de este tipo de centrales generadoras de energía, constituyen el futuro y la piedra angular que soportará los sistemas energéticos de países en vías de desarrollo.

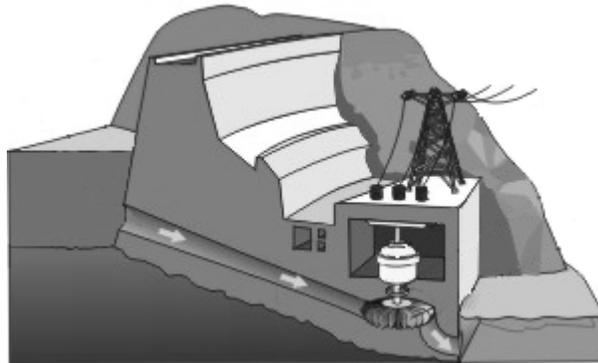
En el caso de Guatemala, a pesar de gozar de riqueza en cuencas para hidroeléctricas, no se cuenta con la disponibilidad económica para ejecutar los proyectos de esta índole; pero ello no debe sobreponerse ante la ventaja ya mencionada, en realidad existen otras maneras de aprovechamiento, tal es el caso del montaje de las denominadas mini centrales hidroeléctricas que ofrecen costos muy reducidos. Estos proyectos tendrán relevancia y tomarán auge en un futuro muy cercano, porque permitirán el abastecimiento del Sistema Nacional Interconectado de energía eléctrica, mejorando significativamente las condiciones económicas y ambientales, así como las necesidades energéticas del país.

### 1.1.2 Funcionamiento básico de una central hidráulica

La central hidroeléctrica, es aquella que se utiliza para la generación de energía eléctrica mediante el aprovechamiento de la energía potencial del agua embalsada en una presa situada a más alto nivel que la central; el agua es llevada por una tubería de descarga a la sala de máquinas de la central donde, mediante turbinas hidráulicas, se produce la generación de energía eléctrica al mover los alternadores.

Este tipo de centrales generadoras convierte energía potencial, centrada en el embalse para luego convertirla en energía cinética, provocando energía mecánica en el eje y este transmitiéndolo al generador, que por último la convertirá en forma de energía eléctrica como lo muestra la figura 2.

Figura 2. **Infraestructura de una central hidroeléctrica.**



Fuente: **Dibujos esquemáticos de centrales hidroeléctricas disponible en:** [www.villademordelavega.com](http://www.villademordelavega.com).

El salto, llamado también potencial hidroeléctrico, es el principio de la generación, este aprovecha la energía potencial gravitatoria del agua y la conduce hasta el punto de generación por medio de tubería de acero o con nuevas tecnologías de bajo costo<sup>1</sup>. El agua pasa por una válvula, si ésta es de gran tamaño debe poseer una instalación extra

---

<sup>1</sup> Por ejemplo fibra de vidrio.

con un bypass (válvula de llenado), que proporciona la igualdad de presión entre la tubería de conducción y la turbina.

La turbina, también llamado primotor, es la fuerza primaria de empuje en un generador, éste se encuentra comprendido entre el concepto de máquinas mixtas, es decir, cuando se hace referencia al acople directo entre dos máquinas, así al hablar de turbina-generador, se comprende la dupla de máquinas que se complementan para generar energía eléctrica; en esta interacción, la turbina da la potencia mecánica al generador y el generador suministra la energía eléctrica.

El generador, es una maquina síncrona de polos salientes que proporciona un potencial eléctrico o voltaje trifásico, que es inducido por un campo magnético giratorio entre el rotor y el estator; este campo giratorio, provocado por una excitatriz, funciona como un imán girando dentro del estator e induce una tensión migratoria, que cambia de polo norte a sur a una frecuencia de 60 Hz<sup>2</sup>; luego de la generación esta tensión o voltaje se transforma a niveles más altos para su fácil transporte, los rangos de transformación van de los 69 a los 230 KV.

### **1.1.3 Aprovechamiento hidráulico**

La eficiencia del aprovechamiento se encuentra fundamentada en los siguientes aspectos importantes.

#### **1.1.3.1 Obtención de desnivel**

Concierno a la altura geodésica del terreno a la que se refiere la figura 3, en la que se desea embalsar agua hasta el punto de entrada a la turbina; también se le conoce como cota de generación o salto hidráulico, y las formas de realizarlo serán descritas a continuación.

---

<sup>2</sup> 60 Hertz es la norma de funcionamiento de la red eléctrica en Guatemala.

### 1.1.3.2 Mediante canal de derivación y tubería forzada

Se instala en la cuenca del río para el aprovechamiento del salto natural, derivando en un canal que llega a lo que se conoce como cámara de carga, la cual se utiliza para nivelar las fluctuaciones de nivel o golpes de ariete de la presa hasta llegar a la boca toma, que es la boca del tubo de conducción de agua. Se usa principalmente para turbinas tipo Pelton.

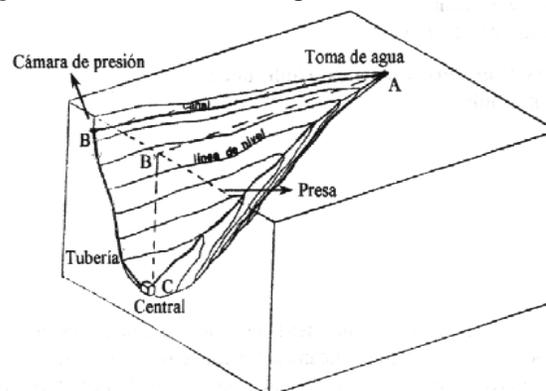
### 1.1.3.3 Mediante una presa

Es utilizada principalmente en plantas generadoras con turbinas de reacción. Consiste en una estructura de hormigón, por ejemplo, que ataja el agua de un río en un valle que no tiene mayor salto hidráulico, es decir, que la cota de energía potencial es de algunos pocos metros, este se acopla directamente con la entrada del distribuidor de absorción de las turbinas o la turbina; estas centrales con este tipo de estructuras se llama centrales a pie de presa con montaje de turbinas del tipo francis y kaplan.

### 1.1.3.4 Mediante una combinación de ambos

Es una mezcla utilizada para generadores de gran tamaño que por lo general son de regulación anual o multianual.

Figura 3. Elevación de cotas geodésicas o salto hidráulico



Fuente: **Manual informativo centrales hidroeléctricas,**  
**José Manuel Arroyo Sánchez.**

#### **1.1.4 Clasificaciones de las centrales hidroeléctricas:**

Estas se clasifican de acuerdo al salto y el discurrir del agua, tal y como se expone a continuación.

##### **1.1.4.1 Según el salto de agua.**

Las centrales pueden ser:

###### Alta presión

Son aquellas con saltos grandes (más de 200 m.), con caudales pequeños aproximadamente de (20 m<sup>3</sup>/s), poseen una tubería de gran longitud y se ubican en zonas de alta montaña.

###### Media presión

Son aquellas con saltos medios (entre 20-200 m.), con caudales medios (200 m<sup>3</sup>/s) y debe contar con embalses grandes.

###### Baja presión

Son aquellas con saltos pequeños (menos de 20 m.) y caudales grandes (más de 300 m<sup>3</sup>/s), territorialmente se ubican en valles amplios de baja montaña.

##### **1.1.4.2 Según el correr del agua.**

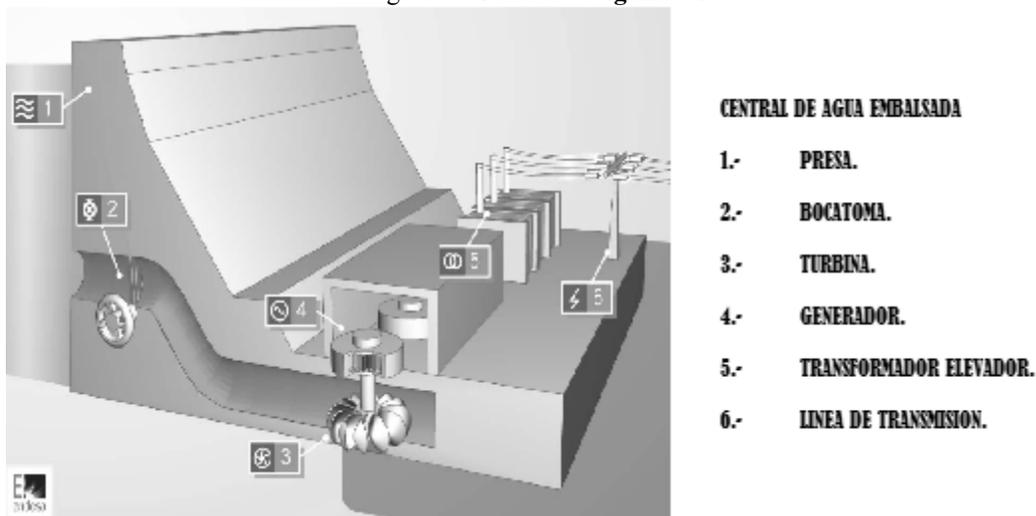
###### Central de agua fluyente

- Cuenta con una muy pequeña presa, de casi filo de agua.
- Alto factor de consumo de volumen de agua por MW generado.
- Dependencia de las condiciones de invierno o verano para su nivel de potencia.

### Central de agua embalsada

- Regulación de potencia dependiendo de la demanda.
- Bajo consumo de volumen de agua por MW generado.
- Posibilidad de piquear a cualquier hora.
- Poseen Presas de gran tamaño.

Figura 4. Central de agua embalsada



Fuente: Dibujos esquemáticos de centrales hidroeléctricas disponible en: [www.villademordelavega.com](http://www.villademordelavega.com).

### Central de bombeo

- Utiliza un embalse normal y también usa su desfogue como embalse a bombear.
- Potencia en horas pico turbinado y en poca demanda como bombeo.
- Factor de utilización relativo, solo central de piqueo
- Arranque muy cortos como toda central de este tipo.

Una de las características más importantes de este tipo de centrales hidroeléctricas, es cuando se requiere proporcionar energía en horas pico, también llamadas hora de máxima demanda, las cuales vacían el embalse en máxima demanda y lo llenan por medio de bombear agua a la presa superior, del agua del desfogue. Se

utilizan con turbinas del tipo reacción las cuales están inundadas, entonces el generador funciona como motor, su energía es proporcionada por generadores en hora de baja demanda, probablemente a primeras horas del día estas generadoras pueden ser hidroeléctricas o térmicas, al bombear el agua el generador pasa a ser el primotor y la máquina pasa a ser una bomba de gran magnitud con lo cual la generadora aumenta su eficiencia consumiendo pocos MW en horas de baja demanda y pudiéndolos inyectar al sistema horas de máxima demanda.

## 1.2 Máquinas hidráulicas:

*Def.* Máquina hidráulica es aquella en el que el fluido que intercambia su energía no varía sensiblemente su densidad en su paso a través de la máquina.<sup>3</sup>

Es una máquina transformadora que absorbe energía de una clase y la devuelve en energía de otra clase pero convertida en un motor eléctrico, absorbe energía eléctrica y la devuelve transformada en energía mecánica.

En general, todo el mundo de las máquinas puede ser dividido en tres tipos: *máquinas de fluidos, herramientas y máquinas eléctricas*; la turbina hidráulica pertenece al grupo de máquinas de fluidos, dentro de este tipo destaca que su primotor es alimentado por la energía proveniente de algún fluido, absorbiendo su energía y convirtiéndola a energía mecánica para múltiples usos, esta transformación se realiza a través de muchas combinaciones de cambios, como el calor en un fluido o la energía potencial; la esencia de estas máquina, como se ha mencionado, es proveer energía mecánica disponible para su uso.

Las Máquinas Hidráulicas por turbina funcionan a través del paso turbulento de un fluido creado por su propia energía cinética, la turbina es la máquina capacitada para absorber este torbellino y utilizar la energía que posee para transformarla en movimiento rotacional en un eje, sin embargo, cuando no se ha definido aun con qué tipo de fluido se

---

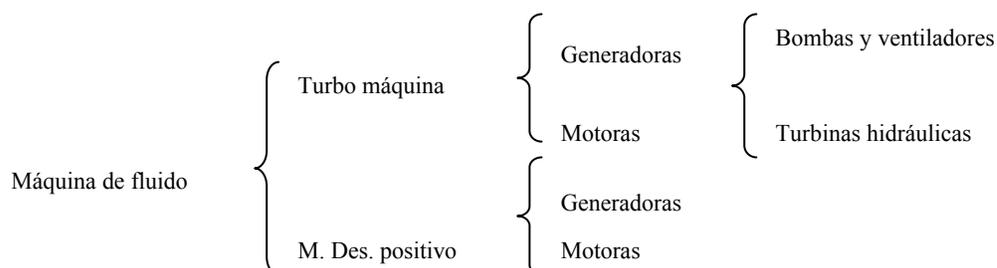
<sup>3</sup> Mataix, Claudia. Mecánica de fluidos y Maquina Hidráulicas. 2da. Edición. México: Harla. 1982. p. 355.

trabaja, es necesario generalizarlo a agua, vapor o gas, lo cual también nos permite concluir que para cada tipo de fluido existe un tipo especial de turbina. Para confirmar dichos argumentos se puede traer a mención los dos tipos de turbinas existentes, las térmicas y las hidráulicas, las primeras son impulsadas a través de vapor o gas de agua, su medio impulsor es la energía potencial en su presión; las segundas son turbinas accionadas a través de agua, su medio impulsor es la presión que posee el agua a través de su energía potencial ligada a su peso, altura y volumen. En el caso del presente trabajo se estudiarán exclusivamente las turbinas hidráulicas por considerarse más congruente con la esencia del tema.

### 1.2.1 Clasificación de las máquinas hidráulicas:

Hay dos grupos clasificadores de máquinas hidráulicas, según su principio fundamental de funcionamiento, pueden ser: *turbo máquinas* y *máquinas de desplazamiento positivo*. Estas a su vez pueden ser *rotativas* y *alternativas* y esto obedece al tipo de rodete que posean, es decir, el elemento que intercambia la energía mecánica en energía de fluido o viceversa, ya sea en movimientos de rotación o alternantes respectivamente.

En las máquinas de desplazamiento positivo, también llamadas volumétricas, el rodete cede energía al fluido, o el fluido a aquel, en forma de presión creada por la variación del volumen, en este caso el valor absoluto de la velocidad del fluido no juega papel esencial, a diferencia del caso de las turbo máquinas, donde la velocidad y dirección son fundamentales en su principio de funcionamiento.



## 1.2.2 Turbina hidráulica

*Def.* Es una turbo máquina motora y por tanto es una máquina que absorbe energía de un fluido y lo entrega como energía mecánica. <sup>4</sup> Las turbinas hidráulicas se clasifican por:

### 1.2.2.1 Grado de reacción

Pueden subdividirse en dos grandes grupos las de acción y las de reacción; el grado de reacción es la máxima energía potencial que se le puede inyectar a un fluido o que éste puede proveer, así en una bomba se distingue su grado de reacción como la altura máxima de presión que puede hacer llegar el fluido; en una turbina es la presión máxima que puede dar la altura del embalse, como observamos claramente en la analogía entre las bombas y las turbinas.

$$\sigma = H_p/H_u$$

Donde:

$\sigma$  es el coeficiente de presión de altura.

$H_p$  es la altura de presión del rodete.

$H_u$  es la altura de Euler siendo siempre positivo.

Si

$H_p < 0$ , el grado de reacción es negativo

$H_p = 0$ , el grado de reacción es 0

$H_p > H_u$ , el grado de reacción es positivo

Las máquinas con un grado de reacción igual a cero se llaman de acción. Si el rodete absorbe la mitad de la energía en forma de presión y la otra en energía dinámica entonces el coeficiente de reacción es igual 1/2.

---

<sup>4</sup> Mataix, Claudio, op. Cit., p 460.

Tabla I. **Diferencias entre las turbinas de acción y reacción**

	Turbinas de Acción	Turbinas de Reacción
	Son de admisión parcial, la presión no varía en los alabes y el rodete no está inundado.	Son de admisión total, la presión en la entrada del rodete es mayor a la atmosférica y la salida inferior, el rodete está inundado.
Tubería Forzada	La altura de presión aumenta proporcionalmente a la altura geodésica, la velocidad permanece constante si la sección de la tubería es constante.	En este tipo de turbinas si no hay tubería forzada, el agua llega como columna libre, la altura de presión permanece constante.
Distribuidor	La altura de presión baja a cero, baja a la presión absoluta, el distribuidor es un convertidor de energía de presión a energía cinética.	La altura de presión disminuye y la altura de velocidad aumenta.
Rodete	La altura de presión permanece constante, todo el rodete se encuentra a presión atmosférica.	La presión disminuye hasta un valor menor que las turbinas de acción hasta caer a un valor de presión relativa negativo.

Fuente: **Datos obtenidos de Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas.**  
**Claudio Mataix**

Las turbinas más nombradas son:

Turbina Francis, de amplio uso en Guatemala, será ampliada a fondo posteriormente.

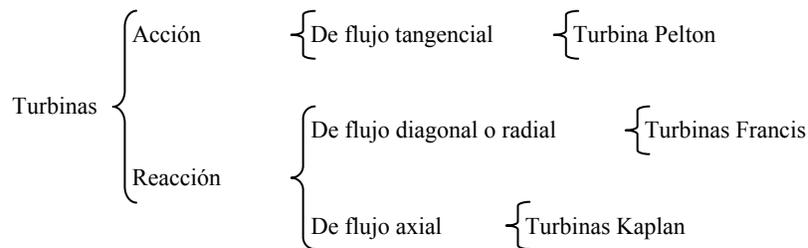
Turbina Kaplan, es un tipo de turbinas que se utilizan muy escasamente en centrales hidroeléctricas guatemaltecas; sin embargo, vale la pena desarrollarla debido a su importancia en los medios hidráulicos. Ésta, al igual que las del tipo Francis, será ampliada posteriormente.

Turbina Fourneyron del año 1833, es una turbina inundada, su rodete está por debajo de la cota de desfogue y es de amplio diámetro por lo que no se construye y su fuerza es radial y centrífuga. Se le menciona por ser otro tipo de turbina utilizada en las centrales hidroeléctricas.

Turbina Heuschel-Jonval, de nula construcción en la actualidad, su fuerza es axial y cuenta con la peculiaridad de la poca accesibilidad de su rodete.

### 1.2.2.2 Dirección del flujo

Se define como la flecha de dirección de la trayectoria que atraviesa el rodete.



### 1.2.2.3 Número específico de revoluciones

Toma en cuenta los saltos hidráulicos con potencias muy variadas y una misma potencia con combinaciones múltiples de caudal (Q) y de saltos netos (H), por lo tanto existe también una clasificación en la forma del rodete para las diferentes condiciones de los saltos, la clasificación que usualmente se toma en consideración es la clasificación numérica en la que se toman todas las turbinas geoméricamente semejantes y se le asigna un número de identificación, lo que permite conocer la cantidad de revoluciones específicas para la clasificación.

$$ns = \frac{n * \left( Pa^{\frac{1}{2}} \right)}{H^{\frac{5}{4}}}$$

Donde:

ns es la velocidad específica en revoluciones por minuto.

n es la velocidad en revoluciones por minuto.

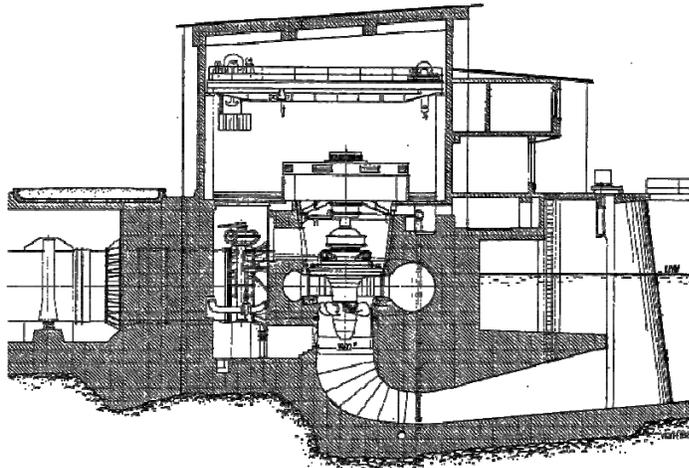
H es la altura neta.

Pa es la potencia en el eje.

### 1.2.3 Turbinas en centrales hidroeléctricas

Su función es inyectar trabajo mecánico y transmitirlo de manera inmediata a la turbina la que, acoplada directamente al generador, se encarga a su vez de convertir la energía cinética rotacional a energía eléctrica, todo ello es consecuencia de la unión rígida entre los ejes de ambas máquinas, turbina-generator, formando un eje único con el que se obtiene sincronismo de giro entre las mismas, es decir, idéntico número de revoluciones durante espacios de tiempo iguales.

Figura 5. Elevación central tipo Kaplan



Fuente: **Manual informativo centrales hidroeléctricas, José Manuel Arroyo Sánchez.**

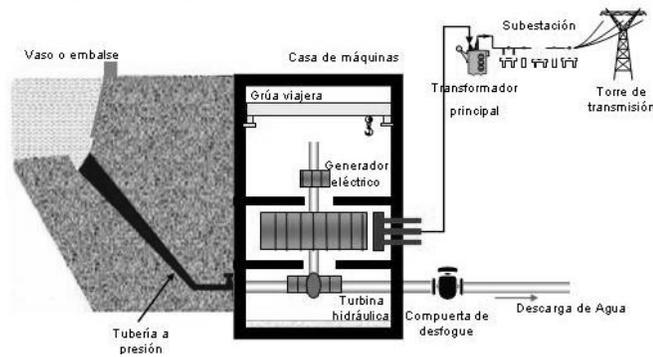
En determinadas máquinas, particularmente en las que proporcionan pequeñas potencias y trabajan con poca altura de salto, se suele disponer de un multiplicador de velocidad, instalado entre ambos ejes, a fin de que las dimensiones de generador sean reducidas.

Se puede decir que la meta de la turbina hidráulica usada para este fin, es transformar energía potencial, pasando por cinética, convirtiéndola en mecánica hasta llegar a ser energía eléctrica por medio del generador. Ahora bien, el proceso de conversión de la energía potencial del agua en electricidad, se realiza a través de la turbina hidráulica, es decir, de una máquina motriz accionada por agua que aprovecha el

salto hidráulico (diferencia de altura) provocando una presión de altura en el agua, la cual, al pasar en el elemento llamado distribuidor o caracol, cambia de altura de presión a energía cinética (energía de velocidad).

El distribuidor, debido al diseño en forma circular, le imprime velocidad al agua regulando y dirigiendo el caudal para hacerlo incidir en los cangilones del rodete con mayor o menor amplitud, esta función se realiza a través de la tobera o pala directriz; al precipitarse el agua en el cangilón, se realiza otro cambio de energía cinética a energía de empuje en cada cangilón del rodete, el cual está montado en un eje acoplado directamente o por medio de reductores al generador, convirtiendo energía mecánica a eléctrica. En el esquemático de la figura 6 se muestra la disposición de cada elemento de una central general.

Figura 6. Esquemático de una central hidroeléctrica



Fuente: Dibujos esquemáticos de centrales hidroeléctricas disponible en: [www.villademordelavega.com](http://www.villademordelavega.com).

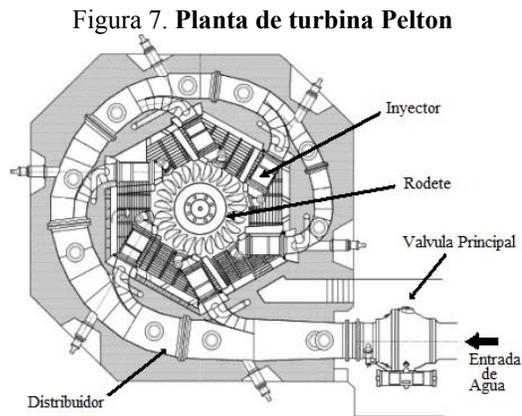
Se puede deducir que el agua es capaz de producir energía eléctrica a través de la conversión de diferentes tipos de energías, desde la potencial hasta la magnética, dentro del generador.

#### 1.2.4 Turbinas más usadas en Guatemala

En orden de importancia.. La más utilizada en Guatemala es la Turbina Pelton, luego la Turbina Francis y por último las Turbinas Kaplan, que aunque son tan eficientes como las anteriores, no han sido muy utilizadas todas ellas detalladas a continuación.

### 1.2.4.1 Turbinas Pelton

Por su funcionamiento, pertenece a la clase de turbinas de acción y por su línea de fuerza tangencial, al radio del rodete. Su estructura general como lo vemos en la figura 7, es un rodete circular con cangilones dispuestos alrededor de la circunferencia; el rodete es impulsado por uno o varios chorros de agua que son generados por inyectores y dirigidos directamente al cangilón, el cual, por su forma, absorbe toda la energía cinética que imprimen los inyectores y el caracol al agua, provocando que este gire. Como en cualquier turbina el eje de ésta se acopla directamente al eje del generador haciendo el trabajo de girar, lo que provocará un campo magnético síncrono que imprimirá par motor al generador lo que se traduce en generación de energía eléctrica alterna.



Fuente: **Manual de operación y mantenimiento para turbina Pelton, hidroeléctrica El Recreo, Andritz.**

A este tipo de turbina, se le conoce también como turbinas de presión, ya que ésta es constante en la zona del rodete, además cuenta con la particularidad de ser de chorro libre.

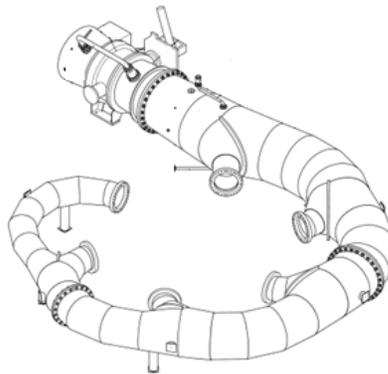
Esta es una máquina de impulsión o admisión parcial porque su rodete tiene contacto con el agua en una porción de su circunferencia, la sección de contacto y tiempo de contacto dependerá del número de inyectores que contenga la turbina.

Dentro de sus características más importantes, se encuentra la sencillez de construcción y el buen rendimiento con amplios márgenes de caudal, lo que permite la colocación de pocas unidades en cada central que posea este tipo de turbinas, es decir, que puede regularse con poco caudal de hasta un 20% de su potencia máxima; otra gran característica de este tipo de turbina es la disposición de montaje en la cual se puede diseñar la turbina con eje horizontal o vertical, esto la hace muy adaptable a cualquier tipo de central.

### Distribuidor de una turbina Pelton

Se encarga de llevar el agua a la entrada de las toberas, en ésta el agua toma la mayor energía, transformándose de potencial a cinética, la función es dirigir los chorros de agua directamente a los cangilones del rodete y luego volver a transformar la energía cinética a fuerza de empuje, haciendo que gire el rodete e imprimiendo en el fuerza rotativa.

Figura 8. **Caracol o Distribuidor**



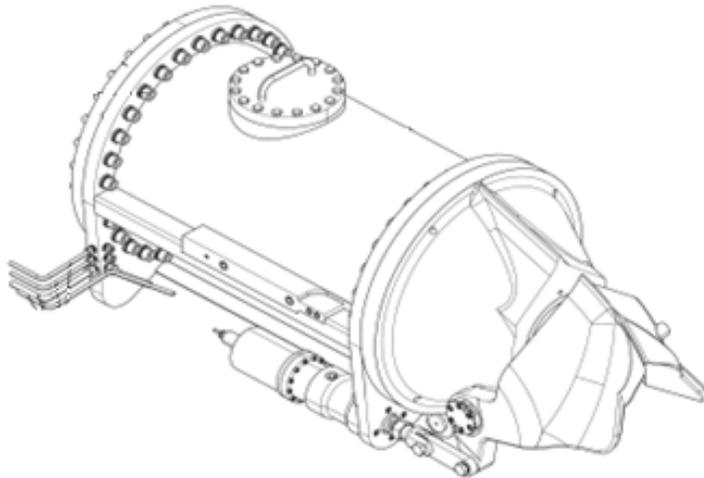
Fuente: **Manual de operación y mantenimiento para turbina Pelton, hidroeléctrica El Recreo, Andritz.**

### Inyector hidráulico

El inyector, figura 9, es una válvula tipo tobera o válvula de aguja, cuyo desplazamiento es longitudinal; es colocado en las boquillas de salida del distribuidor, su función es dirigir directamente los chorros de agua al cangilón, también regula el chorro

cerrándolo o abriéndolo por medio de un pistón hidráulico montado en la aguja de cierre, con ello se logra la regulación a valores deseados del caudal, así como la absorción de las pérdidas de carga por conducción dadas, en la mayoría de casos, por el rozamiento del agua con la superficie de la tubería de conducción.

Figura 9. Tobera



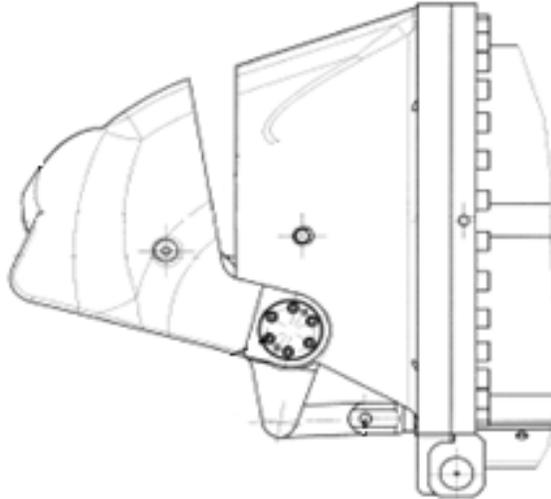
Fuente: **Manual de operación y mantenimiento para turbina Pelton, hidroeléctrica El Recreo, Andritz.**

El funcionamiento del inyector, se da por el desplazamiento de una aguja de regulación en dos límites: el de caudal máximo y el de caudal cero, este movimiento se realiza a través de varios mecanismos, como los servomotores y la fuerza hidráulica, ésta última de mayor utilización. El uso de los diferentes mecanismos depende del diseño de la turbina y del mando de regulación, el inyector es una de las partes más esenciales de la turbina porque regula la potencia del generador, a través de la regulación de aquella.

### El deflector

Se encuentra montado en la tobera, tal y como se muestra en la figura 10, su función radica en ejercer una variación negativa de carga, sirviendo como una barrera ante el chorro de agua para disminuir su influencia de choque.

Figura 10. Elevación deflector de tobera



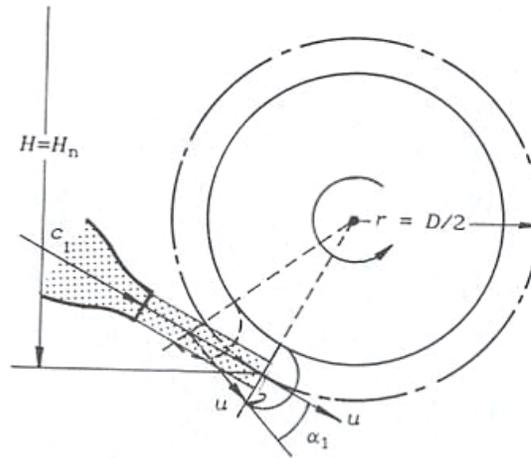
Fuente: **Manual de operación y mantenimiento para turbina Pelton, hidroeléctrica El Recreo, Andritz.**

Cuando disminuye la carga (rechazo de carga), hay que actuar sobre el caudal más rápidamente de lo que interesa a efectos del golpe de ariete. Un cierre rápido puede provocar una desastrosa situación. Para ello cada inyector lleva incorporado un deflector que intercepta el chorro de manera inmediata, parcial o totalmente, cerrando la aguja más lentamente para no crear golpe de ariete y provocar daños colaterales en la tubería, sobre todo si se trata de tuberías de fibra de vidrio.

### El Rodete

Este es la propela, una rueda con cucharas en todo su contorno, a las que se les denomina cangilones o alabes y cuya función es detener el chorro de agua para mejorar su acción de empuje. Es conocido que para un salto hidráulico de mayor altura, el caudal debe ser menor, por lo que el diámetro del chorro también debe ser menor, esto es importante para el diseño de los cangilones, los cuales son directamente proporcionales al diámetro del chorro, por otro lado, la velocidad se encuentra ligada directamente al tamaño y el número de cangilones diseñados.

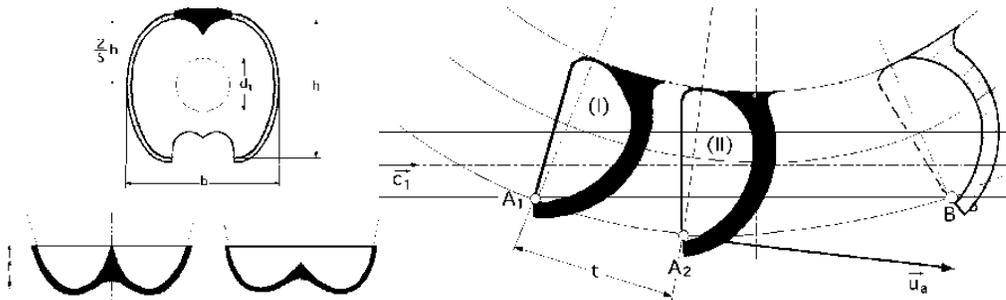
Figura 11. Disposición del ángulo de choque en el cangilón



Fuente: **Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas**  
**Dr. Claudio Mataix, segunda edición.**

El chorro de agua que sale del inyector, golpea el cangilón y este provoca un rebote de agua llamado choque hidráulico elástico, es decir, que existe un buen porcentaje del chorro deficiente, por esta razón la forma del cangilón es hendido, para atajar el agua en forma de cuchara y darle mejor eficiencia al rodete mejorando, al mismo tiempo, el empuje de salto hidráulico; por otro lado, el cangilón cuenta en su parte media longitudinal con una vena bifurcada, que divide el chorro en dos partes para bloquear el empuje axial del chorro al rodete y proteger la mecánica de rodamientos de la turbina, tal y como lo observamos en la figura 12.

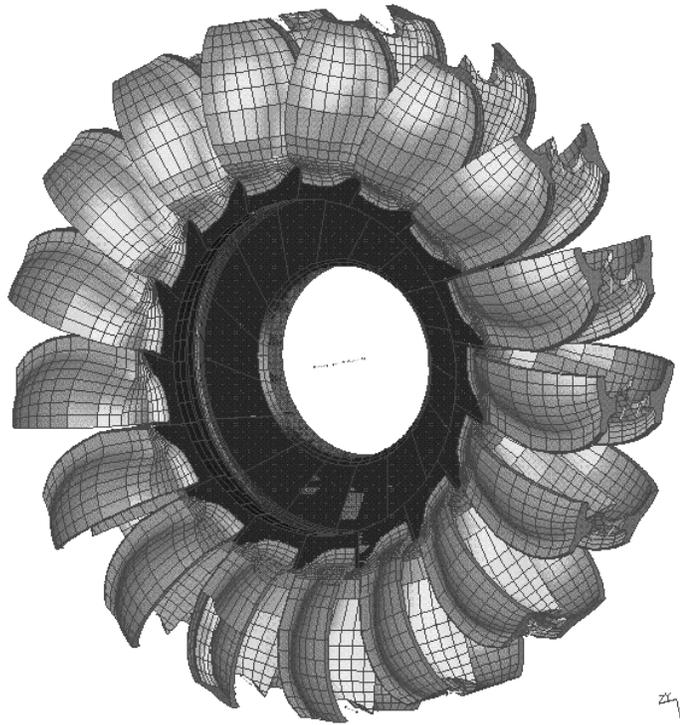
Figura 12. Diseño de cangilón rodete Pelton acotado



Fuente: **Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas**  
**Dr. Claudio Mataix, segunda edición.**

Las dimensiones del cangilón son proporcionales al diámetro del chorro a una escala de 1:2.1 y la anchura es de 1:2.5; esta información es de gran relevancia para el diseño de nuevos rodetes.

Figura 13. **Diseño de un rodete Pelton.**



Fuente: [www.fluidos.eia.edu.co/turbinas/imagen617.gif](http://www.fluidos.eia.edu.co/turbinas/imagen617.gif)

### Triángulo de velocidades de entrada

Si tomamos a la figura 14 como base para el análisis de la velocidad en el rodete.

Entonces:

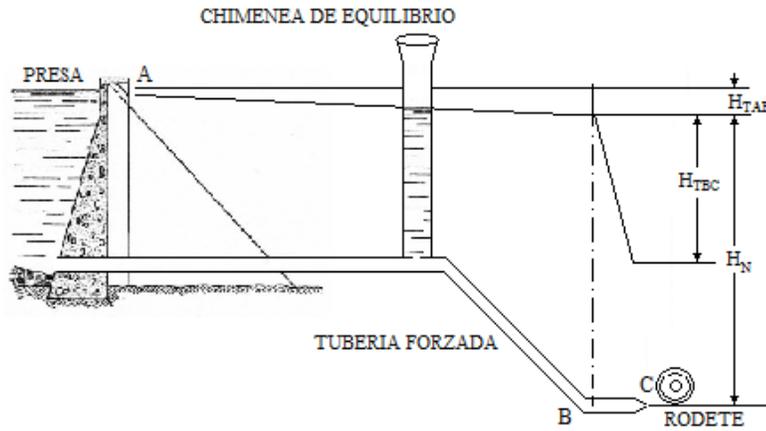
A, es el embalse o presa

C, es el punto de salida del Inyector

C1, como la velocidad absoluta en el rodete y,

V1, como velocidad de salida del inyector.

Figura. 14. Elevación de cotas geodésicas



Fuente: David Alcántara.

Modelo del comportamiento de presas en cascada y visualización por software.

Hacemos un simple análisis de igualación de Energías en el punto de la Presa y en el punto de la cámara del Rodete.

Expresión 1

$$E_A = E_C$$

Expresión 2

$$E = E_{Cinética} + E_{Potencial} + E_{Presión}$$

Entonces de la expresión 2 dedujimos que Energía es

Quedando la expresión 3

$$E = \frac{1}{2}m * v^2 + m * g * H + \frac{P}{\rho}$$

Entonces igualando la expresión 1 con la expresión 3

Y queda que

$$\frac{1}{2}m_A * v_A^2 + m_A * g * H_A + \frac{P_A}{\rho} = \frac{1}{2}m_C * v_C^2 + m_C * g * H_C + \frac{P_C}{\rho}$$

Para fines de simplificación se toma a

$$m_A = m_C = 1$$

$$P_A = P_C = 0$$

Entonces la expresión queda

$$\frac{1}{2}v_A^2 + g * H_A = \frac{1}{2}v_C^2 + g * H_C$$

Y sabiendo que la velocidad en A (presa) es 0

Entonces:

$$g * H_2 = \frac{1}{2}v_C^2 + g * H_1$$

Despejando la velocidad

$$v_1^2 = 2g (H_2 - H_1)$$

$$v_1 = \sqrt{2g (H_2 - H_1)}$$

Haciendo la reducción que :

$$H = (H_2 - H_1)$$

Entonces la velocidad queda:

$$v_1 = \sqrt{2gH}$$

Y sabiendo que el rendimiento de la Tobera es

$$\eta_{tobera} = \frac{H - H_r}{H}$$

Donde:

$H$ , es la altura neta de la cota usada

$H_r$ , es la altura de pérdida por obstrucción de la tobera.

Agregando el factor de eficiencia de la tobera

$$H * \eta_{tobera} = H - H_r$$

Entonces la expresión final queda.

$$v_1 = \sqrt{2g(\eta_{tobera} * H)} = \sqrt{\eta_{tobera}} * \sqrt{2gH}$$

Haciendo la simplificación

$$B = \sqrt{\eta_{tobera}}$$

Nuestra expresión de la velocidad absoluta en el Rodete es

$$C_1 = B\sqrt{2gH}$$

La velocidad es expresada en m/s.

#### **1.2.4.2 Turbinas Francis**

El diseño creado por James Francis (1815-1892), pertenece al grupo de la turbinas de reacción y de flujo mixto. Conocidas también como turbinas de sobrepresión, debido a que la presión en la zona del rodete es variable o de admisión total, pues éste se encuentra sometido a la influencia directa del agua en toda su periferia; su incidencia del agua en el rodete es radial-axial, se le considera como turbina centrípeta por su diseño de rodete, que básicamente es una circunferencia con paletas dispuesta radialmente, con forma alabeada.

La turbina Francis tiene la peculiaridad de diseñarse para un amplio rango de saltos y caudales que van, para hacer mención, de los diez hasta los varios cientos de metros de salto; la alta eficiencia de esta máquina ha provocado un incremento en su uso para la generación eléctrica en el mundo.

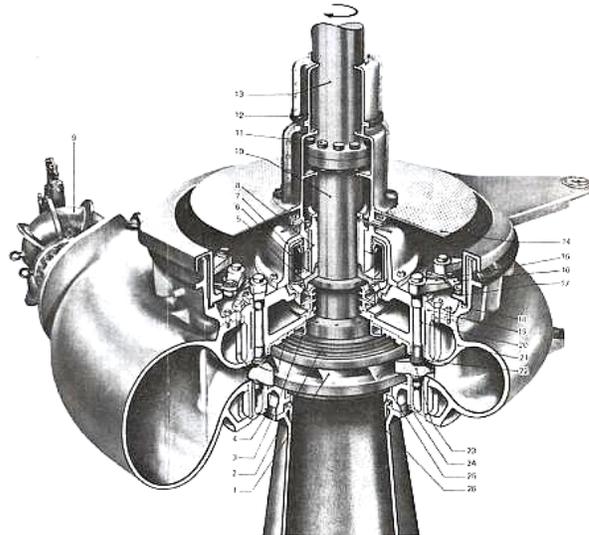
Cabe mencionar que la ubicación de este tipo de turbinas, en su conjunto, primotor distribuidor, cámara espiral, rodete y tubo de aspiración, se encuentra por debajo del nivel de agua en su salida hacia el cauce del río (desfogue o agua turbinada). De acuerdo a lo mencionado, se puede considerar que existe una presión y por lo tanto una columna de agua constante entre el embalse y el desfogue, la transformación de energía potencial del agua en el embalse se cambia a cinética en el distribuidor, muy similar a las turbinas Pelton, debido a los efectos gravitatorios, pero la velocidad en este tipo de turbinas es atenuado por los cambios bruscos de dirección que provoca pérdidas.

Este tipo de turbinas no posee inyectores, sino palas directrices en toda la circunferencia del distribuidor, que proporcionan el control de potencia, aumentando o disminuyendo su caudal en un movimiento directriz; la potencia está ligada al diseño del rodete que es propulsado por una mezcla de salto y caudal, la variable en este tipo de turbinas es el caudal, y se dice que es de presión constante y de admisión total, porque las paletas abren simultáneamente lo cual provoca un contacto en toda la periferia del rodete.

La impulsión del rodete se hace mediante el constante empuje que provoca el peso del agua y volumen en las paletas del rodete. También cabe explicar que posee dos tipos de paletas, las móviles que se encuentran en el caracol del distribuidor y que a su vez poseen pivotes hidráulicos. Por otro lado, las paletas del rodete que son estáticas, y que cuando existe movimiento, a razón de la cantidad de agua y peso de ésta, provocan una succión en el tubo de aspiración que derivará en una depresión en la cámara de desfogue, lo cual succionará el agua en dicha cámara.

El uso de este tipo de turbinas se da principalmente cuando la central hidroeléctrica es del tipo bombeo de almacenamiento hidroeléctrico. La eficiencia de turbinado, si el diseño es correcto, puede ser del 90%.

Figura 15. Estructura turbina Francis



Fuente: **Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas**  
**Dr. Claudio Mataix,, segunda edición.**

El rango más utilizado para este tipo de turbinas va desde los 2 hasta los 200 m<sup>3</sup>/s de volumen, además existen clasificaciones por medio de la velocidad específica del rodete, que depende de la característica del salto.

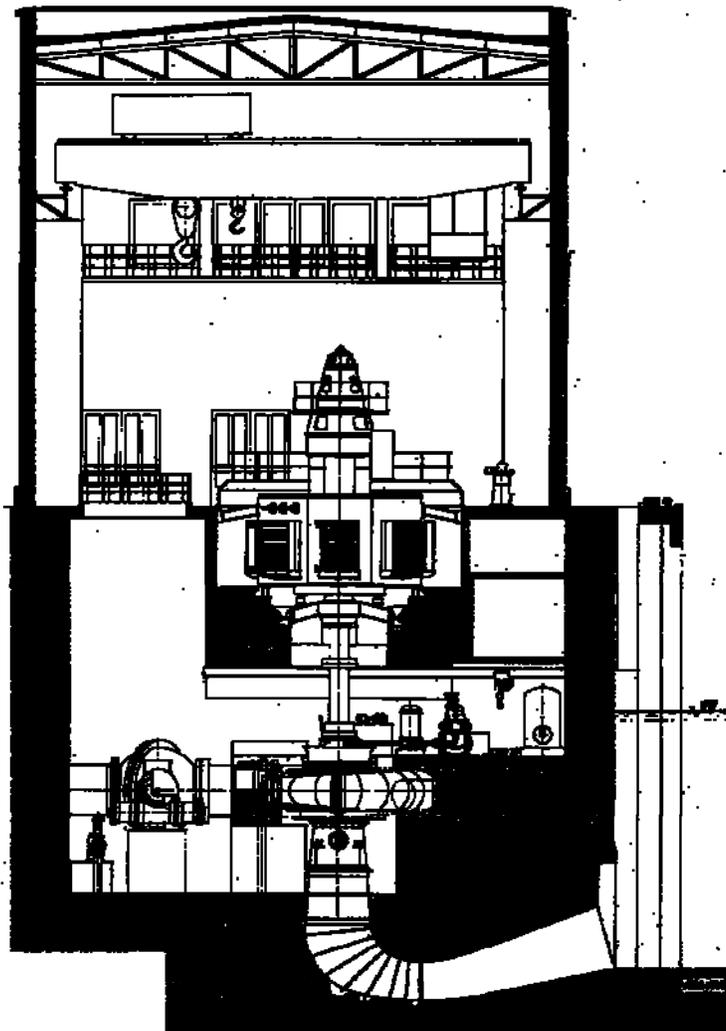
- Turbina Francis lenta. Para saltos de gran altura (alrededor de 200 m. o más)
- Turbina Francis normal. Indicada en saltos de altura media (entre 200 y 20 m.)
- Turbinas Francis rápidas y extra rápidas. Apropriadas a saltos de pequeña altura (inferiores a 20 m.)

Al contrario de las turbinas Pelton, las turbinas Francis deben de ser instaladas en un gran número en una central, porque su eficiencia decae si su caudal no se encuentra dentro del rango del 60% al 100% del valor máximo del caudal de diseño. Al instalar

varias turbinas se reducen a su máximo el caudal a cada máquina, montando maquinas de menor envergadura, para poder dividir el flujo de entrada y tener girando solamente la o las máquinas que, con el caudal de entrada, logre una buena eficiencia manteniéndose dentro de los rangos aceptables de las condiciones de generación.

Al igual que las turbinas Pelton, las turbinas Francis pueden ser instaladas con el eje en posición horizontal o vertical. En la figura 16, se observa una turbina Francis con eje vertical.

Figura 16. Elevación central tipo Francis

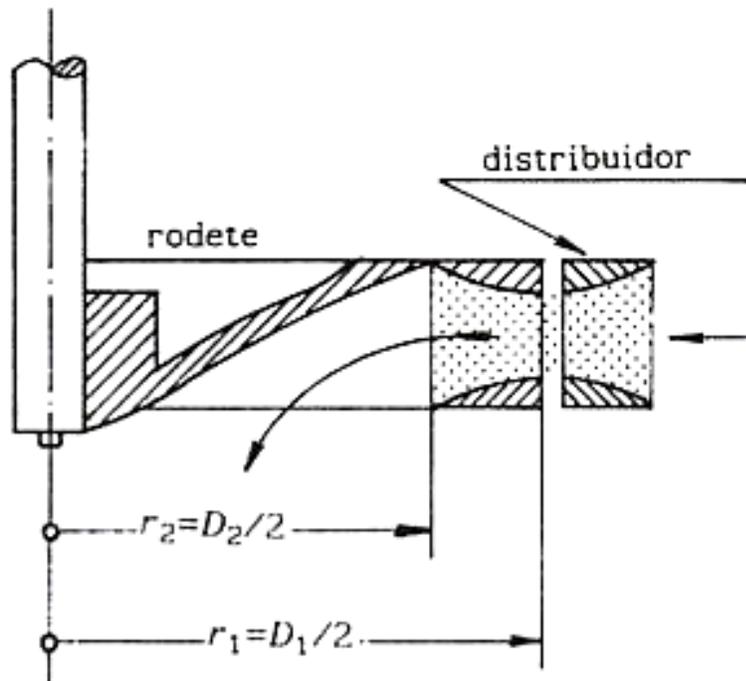


Fuente: Manual informativo centrales hidroeléctricas,  
José Manuel Arroyo Sánchez.

### Cámara espiral.

- Distribuidor, Rodete y el Tubo de aspiración.

Figura 17. Diseño de rodete y distribuidor Francis

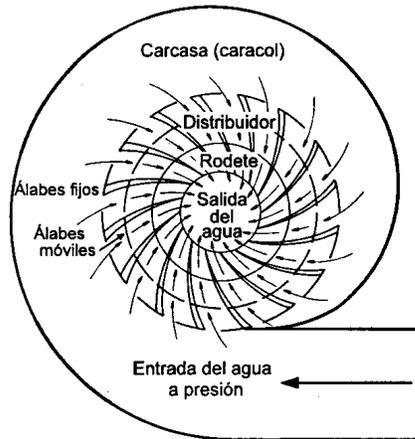


Fuente: [www.caballano.com/francis1.gpg](http://www.caballano.com/francis1.gpg)

### Cámara espiral de una turbina Francis

La cámara espiral en este tipo de turbinas consiste en una serie de secciones de anillos unidos e integrados en una espiral, como se ve en la figura 18, la cual va desde la tubería de agua forzada y termina en su diámetro mínimo, concluyendo en el inicio del caracol; este diámetro se reduce considerablemente para mantener la presión con menos caudal, su labor es conseguir que el agua que circule en él tenga velocidades aparentemente constantes que no formen torbellinos, es decir, pérdidas considerables de carga.

Figura 18. Proyección del agua en una turbina Francis



Fuente: [Fuente:www.caballano.com/francis2.gpg](http://www.caballano.com/francis2.gpg)

La cámara del distribuidor está formada por cuatro anillos, el anillo exterior que encausa el volumen del caudal hacia las palas directrices y el anillo interior que soporta el pivote de las palas directrices; también el anillo de sujeción o directriz que da movimiento a todas las palas simultáneamente, provocando una apertura y cierre equidistante en todo el contorno de la turbina y, por último, el anillo travesía que posee las palas fijas de proyección del caudal llevándolo casi radialmente a las palas del rodete.

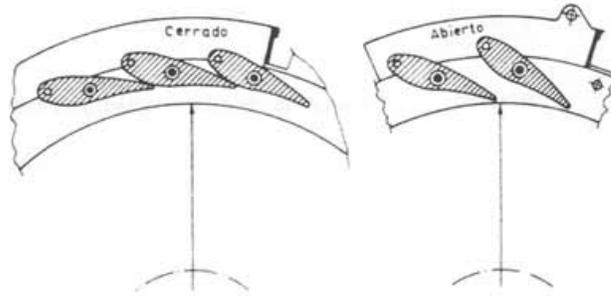
#### Distribuidor de una turbina Francis

El distribuidor lo forma un grupo de palas móviles las cuales harán el trabajo del inyector en las turbinas de acción, sin embargo, poseen una peculiaridad ya que éstas generan la impulsión sobre toda la circunferencia del rodete porque las palas móviles o directrices están ubicadas sobre las mismas cotas o medidas de las palas de la cámara espiral, esto permite que se cree un segundo anillo de palas con la característica de la movilidad entre ellas.

### Palas directrices

Son las paletas con movilidad que hacen el trabajo del inyector de agua, es decir, regular la potencia en la turbina, se conocen como alabes directrices o direccionales, su movilidad es en conjunto o al unísono y pueden moverse radialmente dentro de ciertos límites, girando en su mismo eje, desde la posición de cerrado con el traslape de una con la otra y la posición abierta con una apertura del límite del caudal y quedando a una posición radial y con una convergencia al eje.

Figura 19. **Distribuidor Fink Usado para turbina Francis**



Fuente: **Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas,**  
**Dr. Claudio Mataix.**

### El Rodete

Es la piedra angular de la turbina, es el transductor de la energía mecánica deseada, está unido rígidamente a la parte inferior de la turbina en una perfecta concetricidad con el distribuidor.

Es un núcleo de acero o de materiales amalgamados más resistentes a la cavitación, corrosión o deterioro por golpes, éste tiene un número de palas rígidas equidistantes aproximadamente entre 12 a 21, con una superficie alabeada para mejorar la eficiencia de la turbina, con lo cual se mejorará el empuje ya que hará que el agua desfogue en una dirección que no intervendrá con la impulsión de la siguiente pala; la disposición y longitud de los alabes se deben al diseño del caudal, salto y la velocidad específica.

Experimentalmente, se ha establecido que el número de álabes del rodete debe de ser diferente al de álabes directrices, ya que, en caso contrario, se producirían vibraciones al coincidir en el espacio ambos conjuntos de álabes. El número de álabes del distribuidor suele ser primo, respecto al de álabes del rodete.

### Difusor

También denominado punta de rueda, cono deflector o de dispersión. Consta de un cuerpo metálico, de forma tronco-cónica, colocado en posición invertida, con la base mayor hacia la parte inferior del eje a modo de prolongación de éste, su función es una de las más importantes en el rodete ya que evita el choque entre masas de agua, repercutiendo en la eficiencia del rodete porque tendría, necesariamente, un freno hidráulico por falla de diseño.

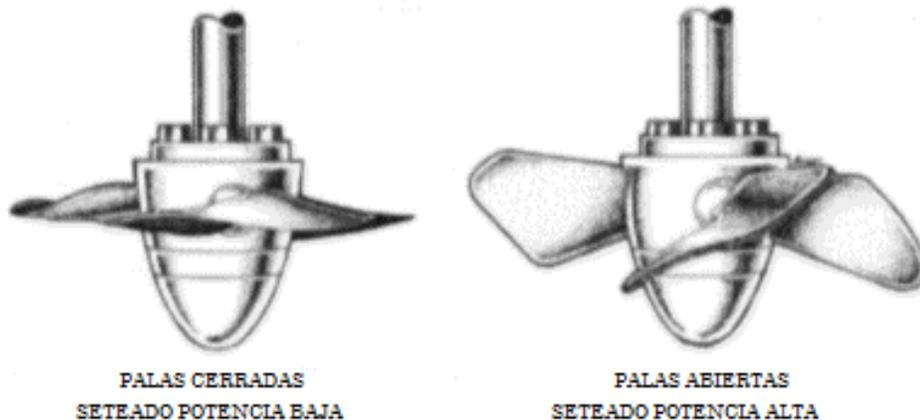
### **1.2.4.3 Turbina Kaplan**

Desarrollada por el austriaco Víctor Kaplan, en el año 1912, es una turbina del tipo hélice y, al igual que la turbina Francis, está dentro del grupo de turbinas de reacción y de admisión total con flujo axial.

Realizando una comparación entre la turbina Francis y este tipo de turbinas, se puede observar que ambas poseen buenos rendimientos, sin embargo, las turbinas Kaplan son menos voluminosas que las Francis, aquellas se emplean para saltos de pequeñas alturas, menores a 50 m, y caudales mayores a  $15 \text{ m}^3/\text{s}$ ; es una turbina rápida que puede llegar a desarrollar altas velocidades específicas, conservando buenos límites de variación de caudal. Por su diseño se montan verticalmente, pero tienen la suficiente versatilidad para poder instalarlas de forma horizontal o inclinada, éste tipo de turbinas son más utilizadas para la generación mareomotriz, por ello solo se hace mención básica de su funcionamiento.

De similar funcionamiento al de una propela de barco, posee los mismos esfuerzos mecánicos; la parte primordial de este tipo de turbinas es el rodete que mantiene la regulación de potencia junto con la compuerta de admisión de agua, la regulación la hace a través de la variación de la inclinación de cada pala del rodete, esta gira para poder ampliar su superficie de contacto con el agua y así aumentar su potencia, o al revés, disminuir la superficie de contacto con el agua y disminuir la potencia porque el ángulo de corte del agua se reduce.

Figura 20. Disposición palas directrices rodete Kaplan.



Fuente: **Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas,**  
**Dr. Claudio Mataix.**

Al ver la imagen anterior queda claro que el paso o corte del agua es axial o paralelo al eje de giro de la turbina; la esencia de las turbinas del tipo hélice es el excelente rendimiento a cargas mayores del 90%, por lo cual su eficiencia decae mucho, sin embargo, esto es compensado por la peculiaridad de que sus álabes o propelas son variables, aumentando el rango de cargas a una excelente regulación, toda la mecanización del rodete es la parte fundamental en este tipo de turbinas.

En aspectos estructurales, las turbinas Kaplan y Francis son muy parecidas entre sí, por ejemplo, ambas poseen una cámara tipo espiral, tubo de aspiración y eje, etc., la piedra angular que rige la diferencia entre ellas es el rodete.

### Rodete de una turbina Kaplan

Como ya se mencionó, el rodete es la parte fundamental de este tipo de turbinas; son semejantes a la hélice de un barco y posee habitualmente un número de palas determinado por la altura del salto de agua. Por diseño se ha observado una repetitividad en saltos pequeños entre 2 y 4 palas y para saltos medianos un número entre 5 y 9. El rodete, para la turbina Kaplan, se asemeja a la función indispensable de las paletas directrices en la turbina Francis y a los inyectores en las turbinas Pelton.

### **1.3 Criterios de selección para turbinas**

La selección de la turbina es parte fundamental en el estudio de pre factibilidad de una central hidroeléctrica, porque el diseño se basa en la topografía del terreno y este, a su vez, determina dicha turbina. En Guatemala existe gran riqueza geodésica, lo que hace factible la instalación de varios tipos de turbinas. Por ello, en este apartado se hace mención sobre los sistemas optativos para elección de cada turbina dependiendo de la ubicación territorial, como se sabe cada turbina es única y se diseña de acuerdo a las necesidades y ubicación de cada planta.

#### **1.3.1 Criterios técnicos para selección de turbinas hidráulicas**

Para la eficiente selección de turbina se debe tomar en cuenta muchos factores de normalización del equipo, los parámetros más importantes en la normalización de las turbinas son:

1. El estudio hidrológico de la cuenca, aforo del caudal y el factor lluvia en el territorio.
2. Levantamientos topográficos, disponibilidad de cota.
3. Recursos en todos los ámbitos, materiales, equipo, y mano de obra.
4. Recursos económicos y estudios financieros a largo plazo.
5. Estudios energéticos, disponibilidad de integración al SNI

## 6. Estudios de Impacto Ambiental y social en el desarrollo del proyecto.

Existen casos como el de las centrales de pequeño tamaño, modalidad que toma auge en Guatemala, para la cual predomina la instalación de la potencia máxima que pueda ejercer la cuenca, es decir, el máximo aforo en el recurso. Ante poco recurso económico, en este tipo de centrales, se instalan equipos con posibilidades de ampliación de potencia para posteriores aprovechamientos.

### 1.3.2 Centrales de alta presión

En centrales de alta presión se pueden montar turbinas de ambas familias de acción y reacción, ambas poseen buena regulación a carga del 90%, pero con la diferencia que la Pelton tiene mejor rango de caudal que la Francis, es decir, que tiene una mejor regulación a baja carga. El empuje de la turbina Pelton, como ya se ha comentado en párrafos anteriores, ese debe a una fuerza tangencial, en cambio la fuerza de la Francis es radial. Ahora bien, la turbina más utilizada en este tipo de topografía territorial es la Pelton, por su sencillez operativa y su buen desempeño a carga bajas, además ofrece la facilidad de no requerir la instalación de varias unidades para hacer eficiente la central, como sucede con centrales tipo Francis.

#### Pelton:

- Más robustas
- Menos peligro de erosión de los álabes
- Reparaciones más sencillas
- Regulación de presión y velocidad más fácil
- Mejores rendimientos a cargas parciales
- Infraestructura más sencilla.

#### Francis:

- Menor peso
- Mayor rendimiento máximo

- Aprovechan mayor desnivel, debido al tubo de aspiración
- Alternador más económico
- Dimensiones en planta de la central más reducidas

### **1.3.3 Centrales de media presión**

Para saltos y caudales medios, en este caso se utilizan turbinas Francis o Kaplan y debe contar con embalses de gran tamaño.

La conveniencia en la utilización de las turbinas Francis se deriva porque su fuerza es radial, movida por caudal, por ello es una central del tipo de Media Presión, necesita una baja altura geodésica para ser movida.

#### Francis:

- Mayor economía en la turbina.
- Menos coste de excavación y cimientos.
- Mejores rendimientos a cargas parciales que las hélices de palas fijas.
- Menor peligro de cavitación.

#### Kaplan:

- Mejores rendimientos a cargas parciales.
- Mejores rendimientos con alturas de salto variables.
- Menos obra de fábrica que las hélices de palas fijas.
- Alternador más barato.

### **1.3.4 Centrales de baja presión**

Son aquellas con saltos pequeños menores y caudales grandes; en estas se montan turbinas Francis y Kaplan.

Se usa solo del tipo de turbina de reacción donde la fuerza motriz es el caudal y en la que su altura geodésica es muy pequeña pero el volumen métrico de agua es grande.

Tabla II. Clasificación de turbinas, según saltos, diámetro y potencia.

Tipo de Turbina	Axiales (Kaplan)	Diagonales (Francis)	Tangencial (Pelton)
Salto Neto, H (m)	2-70	2-500	40-1700
Diámetro Ext. Del Rodete	1.0-10.5	0.35-7.65	0.36-5.2
Potencia en el Eje (MW)	Hasta 250	Hasta 750	Hasta 400

Fuente: Datos obtenidos del libro Turbo máquinas Hidráulicas de Claudio Mataix

#### 1.4 Ventajas y desventajas de las centrales hidroeléctricas

Dentro de las ventajas de las centrales hidroeléctricas son evidentes:

- a) No requieren combustible, sino que usan una forma renovable de energía, constantemente repuesta por la naturaleza de manera gratuita.
- b) Es limpia, pues no contamina ni el aire ni el agua.
- c) A menudo puede combinarse con otros beneficios, como riego, protección contra las inundaciones, suministro de agua, caminos, navegación y aún ornamentación del terreno y turismo.
- d) Los costos de mantenimiento y explotación son bajos.
- e) Las obras de ingeniería necesarias para aprovechar la energía hidráulica tienen una duración considerable.
- f) La turbina hidráulica es una máquina sencilla, eficiente y segura, que puede ponerse en marcha y detenerse con rapidez y requiere poca vigilancia siendo sus costes de mantenimiento, por lo general, reducidos.

**Contra estas ventajas deben señalarse ciertas desventajas:**

- a) Los costos de capital por kilovatio instalado son con frecuencia muy altos.

- b) El emplazamiento, determinado por características naturales, puede estar lejos del centro o centros de consumo y exigir la construcción de un sistema de transmisión de electricidad, lo que significa un aumento de la inversión y en los costos de mantenimiento y pérdida de energía.
- c) La construcción lleva, por lo común, largo tiempo en comparación con la de las centrales termoeléctricas.
- d) La disponibilidad de energía puede fluctuar de estación en estación y de año en año.<sup>5</sup>

## **1.5 Hidroeléctrica de la línea de presas en cascada**

Las centrales del tipo cascada no son tan usuales en Guatemala, pero tendrán gran auge en poco tiempo. El eficiente aprovechamiento hídrico en una central en cascada es elevado ya que se aprovecha al máximo las cotas utilizables de una cuenca, Guatemala cuenta, como ya se ha expresado, con grandes recursos hidráulicos para este tipo de centrales. La cuenca del río Samalá, en Quetzaltenango, posee las características necesarias para el aprovechamiento hídrico en este tipo de centrales en cascada, en el siguiente capítulo se describe a detalle este aspecto, mencionando las cuatro Centrales del tipo Cascada que inician en Santa María, atraviesan Canadá y Monte Cristo y finalizan en El Recreo.

### **1.5.1 Descripción informática de las centrales en cascada.**

En este apartado se describe toda la información referente a las cuatro hidroeléctricas en torno a las que gira la investigación del presente trabajo.

---

<sup>5</sup> Centrales Hidroeléctricas [En línea]. Consultado el 8 de marzo de 2009. Disponible en: <http://thales.cica.es/rd/Recursos/rd99/ed99-0226-01/capitulo3.html>

### 1.5.1.1 Hidroeléctrica Santa María

Está ubicada en el municipio de Zunil, departamento de Quetzaltenango, fue puesta en servicio en el 1927 y, en ese entonces, proveía de energía al Ferrocarril de Los Altos. Se considera como un gran ejemplo de un embalse de regulación diaria, tiene aproximadamente un volumen de 215 500 m<sup>3</sup> de volumen de agua disponibles, su conducción se realiza con tubería de acero al carbón de longitud aproximada de 614 m, cuenta con tres unidades del tipo Francis, la unidad 1 con 2.48 MW y las unidades 2 y 3 con 2.2 MW, turbinando 2.35m<sup>3</sup>/s la unidad 1 y 2 y la tercer unidad con 2.42 m<sup>3</sup>/s.

Tabla III. Características del generador

Generador Síncrono Marca SCHORCH		
Potencia (S)	3 100	kVA
Potencia Real (P)	2 480	kW
Corriente	778	A
Voltaje	2.3 +/- 5%	kV
Factor de Potencia	0.8 *	
Pares de Polos	5	
Frecuencia	60	Hz
Velocidad	720	rpm

\*A su máximo valor de reactiva a absorber o a entregar

Fuente: 1er. Examen de seguridad de las presas del Inde, Soluziona.

### 1.5.1.2 Hidroeléctrica Canadá:

Esta toma su caudal directamente del desfogue y del vertimiento de la central hidroeléctrica Santa María, encausándolo por medio de una presa del tipo membrana inflable que ataja el agua y lo desvía hacia un canal que llega hasta un embalse en el que se encuentra la bocatoma (entrada al tubo de conducción), la tubería llega a una bifurcación para ambas unidades, del tipo Pelton de eje vertical de altura geodésica de 36 bares, con generadores con una capacidad total de 47.4 MW, cada generador tiene su

transformador propio, y con su sincronización en el secundario de cada transformador, para ser conectada en la subestación de la Hidroeléctrica Santa María; La interconexión se realiza a un nivel de voltaje de transmisión de 69 kV, el control se realiza por medios automatizados conectados con sistema de adquisición de datos SCADA desde su sala de control.

Tabla IV. Características técnicas de los generadores de central Canadá.

Generador Síncrono GE HydroInepar		
<b>Potencia (S)</b>	28 300	kVA
<b>Corriente a Plena Carga</b>	1 184	A
<b>Voltaje</b>	13.8	kV
<b>Factor de Potencia</b>	0.85	
<b>Frecuencia</b>	60	Hz
<b>Velocidad</b>	514.3	rpm

Fuente: Inerpar GE, resumen ejecutivo hidroeléctrica Canadá.

### 1.5.1.3 Hidroeléctrica Monte Cristo:

Esta toma su caudal del desfogue de la Hidroeléctrica Canadá, con una capacidad instalada de 12.9 MW y un caudal turbinable de 14 m<sup>3</sup>/s, sus cotas geodésicas son: la máxima de 1019.8 msnm y la mínima de 1015 msnm, su caída total es de 106.66 m.

Cuenta con dos turbinas tipo Francis de eje horizontal, con un generador de 7.66 kVA cada uno con salida de 13.8 kV, elevándola para transmisión a 69kV por medio de un transformador de 16 MVA; posee circuitos de control a distancia SCADA. Es operada desde la sala de mando de su análoga Hidroeléctrica Canadá, la cámara de llenado de Monte Cristo es el desfogue de Canadá con una compuerta tipo vertedero para que Canadá opere sin que lo haga Monte Cristo, el caudal de desfogue de Canadá se conduce a través de una tubería tipo GRP, de fibra de vidrio, con un diámetro de 2600 mm y una longitud de 780 m, este caudal desfoga en un pequeño embalse tipo

regulación de 24 m de anchura y 14m de longitud. Está compuesta con tierra compactada y con geo-textil y geo-membrana impermeable, seguido de un canal de presión compuesto de tubería de Acero al Carbón de 2500 mm de diámetro y longitud de 790m con una disminución a tubería de 2400 mm con longitud de 770 m hasta la casa de máquinas.

Tabla V. Características técnicas de los generadores de central Monte Cristo.

Generador Síncrono		
<b>Potencia (S)</b>	7 660	kVA
<b>Potencia Real (P)</b>	6 500	kW
<b>Voltaje</b>	13.8	kV
<b>Factor de Potencia</b>	0.85	
<b>Frecuencia</b>	60	Hz
<b>Velocidad</b>	600	rpm

Fuente: VA TECH resumen ejecutivo hidroeléctrica Monte Cristo.

#### 1.5.1.4 Hidroeléctrica El Recreo:

Posee un embalse de derivación de pequeño tamaño, que cubre alrededor de 100 m longitudinal, ubicada desde el desfogue de su similar hidroeléctrica Monte Cristo y no más de 8 m de altura. Está constituida por compuertas tipo Pez accionadas hidráulicamente; para la apertura y cierre de las mismas, su conducción se realiza a través de una tubería GRP de fibra de vidrio 2.5m de diámetro y una longitud de 3500m hasta llegar a la casa de máquinas, en la cual están montados dos generadores síncronos de 15 MW, con 13.8 kV de salida como se indica en el cuadro 5, elevándola para transmisión por un banco de transformadores de 10MW, cada uno, con una capacidad de 30 MW en conexión  $\Delta/Y$  a niveles de 69kV, interconectándose a el SNI en la Subestación Brillantes, a la barra de 69kV, accionados con turbinas tipo Pelton.

Tabla VI. Características técnicas de los generadores de central El Recreo.

Generador Síncrono Marca Ideal		
<b>Potencia (S)</b>	17,200	kVA
<b>Potencia Real (P)</b>	14,620	kW
<b>Corriente</b>	720	A
<b>Voltaje</b>	13.8	kV
<b>Factor de Potencia</b>	0.85 *	
<b>Pares de Polos</b>	10	
<b>Frecuencia</b>	60	Hz
<b>Velocidad</b>	360	rpm

\*A su máximo valor de reactiva a absorber o a entregar

Fuente: Hyundai Electric Co. resumen ejecutivo hidroeléctrica El Recreo.

## 1.5.2 Ubicación territorial de las centrales

Las cuatro centrales hidroeléctricas que utilizan la metodología de presas en cascada en Guatemala, aprovechan la cuenca del Río Samalá en el trayecto desde el municipio de Santa María de Jesús, hasta El Palmar, Quetzaltenango.

### 1.5.2.1 Hidroeléctrica Santa María

La hidroeléctrica de Santa María se localiza al sur-oeste del altiplano del país, teniendo como vía de acceso la carretera 9-S, que conduce de Ciudad de Guatemala al municipio de Santa María de Jesús, Quetzaltenango, por la costa sur, en el kilómetro 202 aproximadamente, y se localiza sobre el río Samalá, en la parte baja de la cuenca. El río nace al noreste de la costa del pacífico y al norte de Quetzaltenango, a elevaciones alrededor de 2500 m. y desciende rápidamente a elevaciones de 2100 m.<sup>6</sup>

<sup>6</sup> Catalogo Informativo Hidroeléctrica Santa María, Ubicación Territorial, INDE.

### 1.5.2.2 Hidroeléctrica Canadá

Se encuentra en el Municipio de Zunil, Quetzaltenango, en la finca llamada Canadá, en la carretera de ruta que va de Quetzaltenango a Retalhuleu, en el kilómetro 180. Su ingreso a las instalaciones está a 8 km de la ruta, con la totalidad de la carretera asfaltada.

### 1.5.2.3 Hidroeléctrica Monte Cristo

También está ubicada en el Municipio de Zunil, Quetzaltenango, a unos 4 kilómetros de Hidroeléctrica Canadá.

### 1.5.2.4 Hidroeléctrica El Recreo

Se encuentra en el Municipio de El Palmar, Quetzaltenango, todo el proyecto se desarrolla en la longitud de dos fincas que son El Recreo y Candelaria, ambas fincas cafetaleras, ubicadas a 28 km de Mazatenango, 16 de Retalhuleu y 40 de Quetzaltenango, la ruta de llegada es en la carretera que conduce de Retalhuleu a Quetzaltenango; su elevación, desde la presa hasta el punto más bajo que es el área de la cámara del rodete, son 904 y 710 msnm de cota.

Figura 21. Mapa de ubicación de la central El Recreo.



Fuente: Evaluación de impacto ambiental,  
Manuel Basterreche Asociados, S.A.

### **1.5.3 Descripción del tipo de turbina instalada**

A continuación se describen los tipos de turbina con que cuentan las cuatro hidroeléctricas que aprovechan el sistema de presas en cascada.

#### **1.5.3.1 Hidroeléctrica Santa María**

Tres unidades con turbinas Francis de 6.8 MW de potencia nominal con las tres unidades, con una altura de presión geodésica de 104.5 m y una presión de 10.45 bares, son de eje horizontal con una velocidad de 720 rpm con un caudal turbinable de 2.35 m<sup>3</sup>/s, 2.42 m<sup>3</sup>/s y 2.42 m<sup>3</sup>/s respectivamente.

#### **1.5.3.2 Hidroeléctrica Canadá**

Dos unidades con turbina Pelton, con una capacidad total de 47.4 MW de potencia nominal con ambas máquinas, con una altura geodésica de 365 m y una presión de 36.5 bares, son de eje vertical con una velocidad 360 rpm y con un caudal total de 14.4 m<sup>3</sup>/s en total.

#### **1.5.3.3 Hidroeléctrica Monte Cristo**

Son dos turbinas tipo Francis, con una capacidad total de 12.9 MW de potencia nominal con ambas, con una altura de presión o geodésica de 106.6 m y una presión de 10.66 bares, son de eje horizontal con una velocidad de 600 rpm con un rotor de 13 alabes y un distribuidor de 20 palas directrices, con un factor de caudal de 7 m<sup>3</sup>/s cada una.

#### **1.5.3.4 Hidroeléctrica El Recreo**

Son dos turbinas tipo Pelton con una capacidad total de 29.4 MW de potencia nominal, con una altura de presión o geodésica de 188.7, a una presión de 18.87 bares,

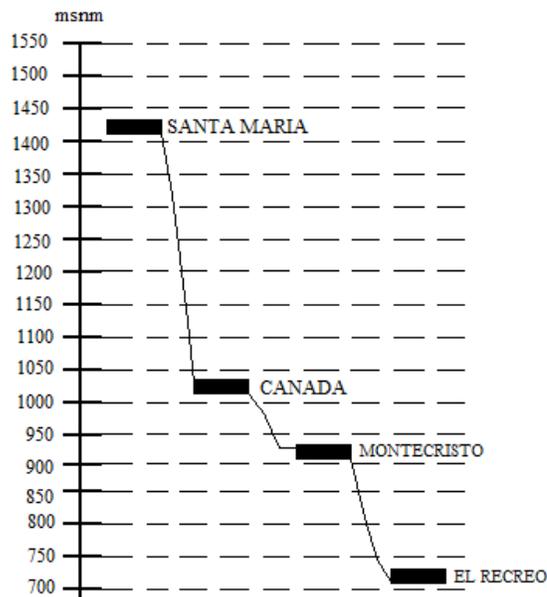
es de eje vertical con una velocidad angular de 360 rpm con 6 inyectores de caudal máximo 8.6 m<sup>3</sup>/s, el rodete de 20 alabes con un diámetro de 1550 mm, una anchura de 530 mm, con acople directo a el generador.

Tabla VII. Comparación de las diferentes turbinas instaladas en la cuenca Samalá

Central	Potencia (MW)	Caudal (Q)	Presión (bar)
Santa María	6.8	7.2 m <sup>3</sup> /s	10.45
Canadá	47.4	14.4 m <sup>3</sup> /s	36.5
Montecristo	12.9	14 m <sup>3</sup> /s	10.66
El Recreo	24.8	16 m <sup>3</sup> /s	18.9

Fuente: Datos obtenidos en resúmenes ejecutivos de cada central.

Figura 22. Perfil de cotas de la trayectoria del Samalá en cada central.



Fuente: Datos obtenidos en resúmenes ejecutivos de cada central.

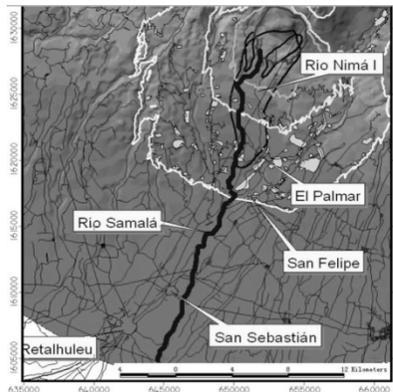
## 2. CUENCAS, EMBALSES Y PRESAS

En este capítulo se abarcarán las características referentes al medio de conducción de energía primaria para centrales del tipo hidroeléctrico.

### 2.1 Cuenca hidrográfica

Es una área superficial de terreno que sirve de drenaje hídrico para escorrentía o acumulaciones hidrológicas; existen dos tipos, las cuencas cerradas, que drenan hídricamente, en un trayecto de regular distancia, por ejemplo una escorrentía en un lago cuya forma de drenaje hídrico es la evaporación y absorción de la tierra; por otro lado, existe la cuenca abierta, que es un canal que lleva escorrentía en un tramo de varios kilómetros y cuya desembocadura es el mar. La cuenca está formada por las partes más bajas de un complejo de montañas y porciones de tierra socavadas formando un cañón que es el canal de la cuantía del río y, en este tipo de cuencas abiertas, los ríos llegan al mar siendo una cuantía muy grande, por los afluentes extras en toda la trayectoria del canal.

Figura 23. Trayectoria de la cuenca Samalá, del tipo cuenca abierta



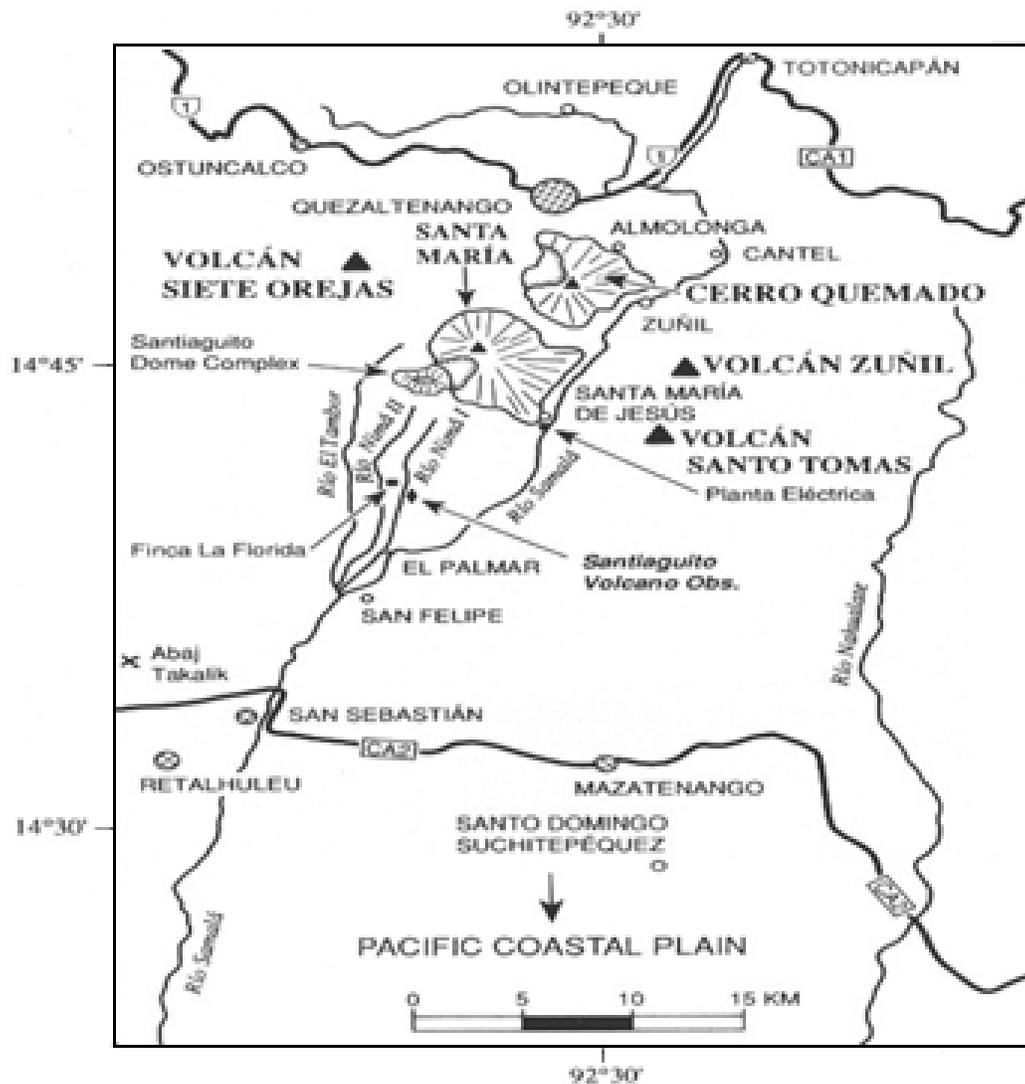
Fuente: Zonificación de amenazas naturales en la cuenca del río Samalá y análisis de vulnerabilidad y riesgo en la población de San Sebastián Retalhuleu. capacity building for natural disaster reduction (CBNDR). Pág. 33.

### 2.1.1 Cuenca Río Samalá

El río Samalá, cuenca sobre la que versa la presente investigación, desemboca en el litoral del Océano Pacífico, con un curso de noreste a suroeste. Inicia en las montañas del altiplano, específicamente en la aldea de Panquix del Municipio de Totonicapán, con una cota geodésica de 3000 msnm; luego cambia a norte, en el caserío Xepatuj; cambia al noreste y por último al norte, en el caserío Nimasac. Al lado sur de la cabecera del departamento recibe varios afluentes, el primero de ellos, del río Chimoral que lo conduce rumbo oeste; atraviesa la finca Molino La Providencia, donde recibe al río Xantún; cruza la ruta Nacional a San Cristóbal, Totonicapán y corre al norte de la misma; después, recibe los afluentes de Jechanep y Paqui y a partir de ahí recibe el nombre de Pasutulté hasta que, a un kilómetro al sur del puente en la cabecera de San Cristóbal, descarga en el río Caquixa, llamado también Samalá, para luego tomar la dirección hacia el sur.

Antes de cruzar Cantel, el río Samalá se encausa en una serie de desfiladeros escarpados con fuertes pendientes que constituyen la parte interesante de esta cuenca, que cuenta con un total de 1510 km<sup>2</sup>. Esta cuenca se divide en dos fases, la primera, llamada fase alta, con aproximadamente con 700 km<sup>2</sup> y forma trapezoidal; la segunda con 810 km<sup>2</sup>, tiene una ubicación geográfica de 14°54'45'' de latitud y 91°26'35'' de longitud. Cuenta con una historia de amplio análisis pues su potencial hídrico ha sido utilizado por más de 75 años, razón por la que posee un alto porcentaje de eficiencia predictiva de operación, y para aseverar la eficiencia hidráulica, tiene instaladas estaciones hidrométricas en Cantel a 2454msnm. Con crecidas milenaria de 123.35 m<sup>3</sup>/s, en el Túnel a 1700 msnm, en Chutinimit a 1550 msnm y en Candelaria a 750 msnm. Se toman como crecidas máximas de 145.56 m<sup>3</sup>/s para crecidas milenarias.

Figura 24. Trayectoria de la cuenca Samalá desde su inicio hasta su desembocadura.



Fuente: Zonificación de amenazas naturales en la cuenca del río Samalá y análisis de vulnerabilidad y riesgo en la población de San Sebastián Retalhuleu. capacity building for natural disaster reduction (CBNDR). Pág. 7

Características de la esorrentía Samalá:

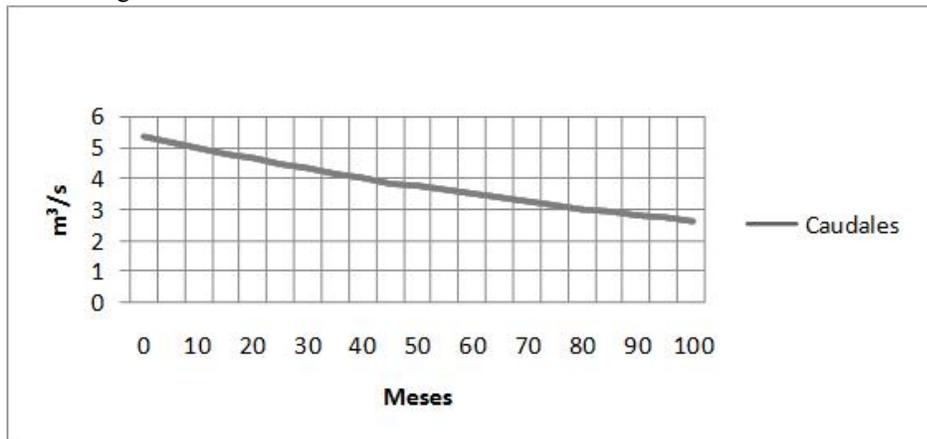
Tabla VIII. **Resultados análisis de contenidos.**

Parámetro	COGUANOR	1	2	3	4
<b>Hora</b>		9:30	10:00	11:00	12:00
<b>Aspecto</b>	Claro	Turbio	Turbio	Turbio	Turbio
<b>Olor</b>	Inodora	Mat. Org	Mat. Org	Mat. Org	Mat. Org
<b>Temperatura</b>	18-34	19.6	20.1	20.2	20.3
<b>Cloro Residual (mg/L)</b>	1	0	0	0	0
<b>Color</b>	5-50	513	526	374	5325
<b>Turbiedad (UTN)</b>	5-25	92	95	68	818
<b>PH (unidad)</b>	6.5-9.2	8.25	8.0	8.21	7.59
<b>Cond. Eléctrica (mho)</b>	50-1500	536	434	382	310
<b>Dureza Total (mg/L )</b>	100-500	136	130	112	786
<b>Sólidos Totales (mg/L)</b>	500-1500	490	399	358	372
<b>Sólidos Disueltos (mg/L)</b>	--	270	218	191	110
<b>Sólidos Suspendidos</b>	30	92	80	46	154
<b>Sodio Na (mg/L)</b>	--	13.2	13.0	13.1	12.6
<b>Potasio K (mg/L)</b>	--	5.4	5.3	5.4	5.0
<b>Silicatos (mg/L)</b>	30	11.4	10.5	10.35	9.87
<b>Sulfuros (mg/L)</b>	--	0.013	0.017	0.015	0.018
<b>Alcalinidad Total</b>	250	90	96	92	380
<b>Alcalinidad Hidróxidos</b>	--	0	0	0	0
<b>Alcalinidad Bicarbonatos</b>	--	90	96	92	380
<b>Coliformes Totales</b>	< 2	1600000	1600000	1600000	1600000
<b>Coliformes Fecales</b>	< 2	9000	5000	5000	16000000

Fuente: **EIA hidroeléctrica Santiaguito, Zunil.**

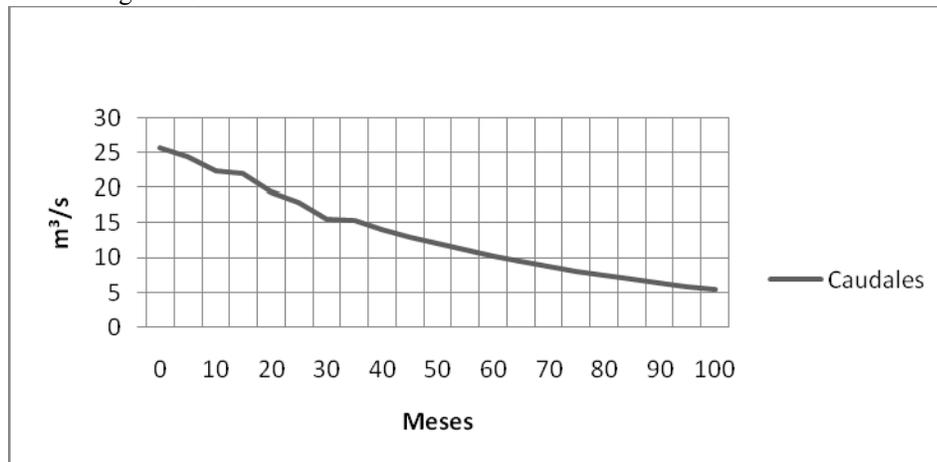
Desarrollo de Tendencias de Caudales Predictivos de la Cuenca, para la deducción del Embalse y la potencia a instalar.

Figura 25. Desarrollo de duración de caudales mínimos río Samalá.



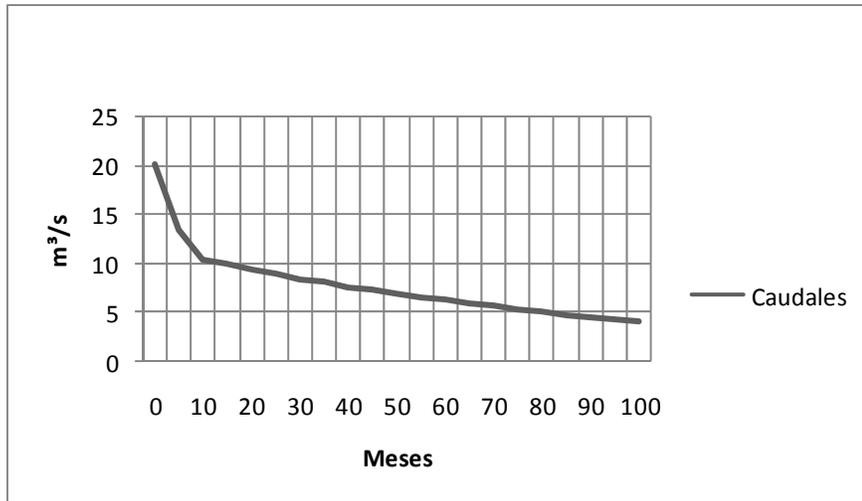
Fuente: Consultora Centroamericana, S. A.

Figura 26. Desarrollo de duración de caudales máximos río Samalá.



Fuente: Consultora Centroamericana, S. A.

Figura 27. Desarrollo de duración de caudales río Salamá.



Fuente: Consultora Centroamericana, S. A.

## 2.2 Embalses

Lo más importante en relación a los embalses, es el Estudio de Impacto Ambiental que contiene la curva de caudal, la extensión a inundar, así como el volumen respecto al incremento de la cota geodésica, todo ello ligado a la topografía del terreno, a los posibles problemas de inundación de terrenos fértiles o de inconvenientes para los pobladores. Es una gran ventaja para la cuenca objeto de estudio, el hecho de que, además de ser una región escabrosa e inhabitable, los estudios químicos realizados al agua establecen que ésta no es apta para el consumo humano.

Nombraremos algunos factores para la selección del embalse.<sup>7</sup>

- Un cañón estrecho donde la relación de ancho del valle en el coronamiento o cresta de la presa y la altura máxima de la presa no exceda en una relación de 4 veces a 1.
- Complejidad de las condiciones de ubicación.

<sup>7</sup> Criterios y Procedimientos para llevar a cabo Investigaciones Geológicas en Presas, Ing. Abdel Vásquez D., Pág. 14

- Tamaño de la obra
- Daños y perjuicios potenciales en caso de falla estructural.
- Finalidad de la estructura
- Las condiciones del subsuelo
- Las condiciones ante estudios de mecánica de suelos y rocas.

### **2.2.1 Capacidad de un embalse**

Es el volumen máximo de almacenaje para una altura específica de la presa y de su aliviadero o cota máxima.

Esta medición del volumen a embalsar se realiza a través de levantamientos topográficos, los cuales nos darán las áreas aproximadas de la curva, desde el fondo hasta la orilla del área a inundar y, multiplicado por la longitud, nos aproximará al volumen capaz de almacenar por la presa.

En una presa se distinguen tres tipos característicos de volúmenes o capacidades, el volumen muerto o capacidad de azolves, que es la capacidad de sedimentación de la presa, esta debe de diseñarse para soportar sedimentación depositada por 50 años; el volumen útil, es la cantidad de agua necesaria para suplir la demanda y las pérdidas de agua determinado por el tipo de presa si es horaria o anual y el volumen total de la presa, que se obtiene de la suma de ambos.

Estos volúmenes se ligan directamente con las alturas características de una presa, la altura de aguas muertas, la altura de aguas normales y la altura de borde libre es decir, la altura de vertimiento. La primera altura o de agua muerta, es el agua estancada que no llega al nivel de la bocatoma, es solo para llenado de la presa; la altura de agua normal es la altura de volumen utilizable de la presa, y la altura de borde libre de altura de vertimiento.

## 2.3 Presas

Las presas se consideran las estructuras más antiguas de ingeniería que el hombre ha creado, datan desde los tiempos pre-históricos y denotan la importancia en el aprovechamiento de energía potencial del agua; con respecto a la importancia hídrica para el aprovechamiento eléctrico, las presas, llamadas también represas, son las encargadas de encausar el agua de un río y embalsarlo con el fin de mover un eje a través de una turbina que, al mismo tiempo, moverá un generador produciendo energía eléctrica alterna. La importancia de un embalse es regular el consumo constante del volumen de agua, para que el aprovechamiento sea significativo. En generación eléctrica esto es de gran relevancia porque conlleva a una estabilidad del sistema eléctrico, la importancia de cada generadora hidroeléctrica se mide en la capacidad de aportar energía en la hora pico, es decir, en la capacidad de mantenerse a máxima carga a horas de alta demanda en el Sistema Nacional Interconectado, donde las horas pico se dan entre las 18:00 a las 22:00 hrs., justo cuando los usuarios regresan a sus hogares, después de realizadas sus jornadas laborales, y conectan múltiples artefactos eléctricos, produciendo un incremento considerable y de larga duración en la demanda eléctrica.

Tener un buen embalse, en una generadora hidroeléctrica, no garantiza un buen suministro de agua, ya que el estudio de caudales en la cuenca de un río se enfoca en la capacidad de energía que sea capaz de aportar en las horas pico, es decir, para cubrir la demanda máxima; en estos casos la mayor parte del día se pasa recuperando nivel, o sea generando a baja carga, porque el embalse o presa se calcula teniendo en cuenta el flujo constante de agua en la cuenca del río y además el consumo de agua posible para horas pico, los caudales máximos de agua de las cuencas se unen para realizar una predicción eficiente de una central hidroeléctrica y en época de invierno sobre pasa el nivel de las horas pico, situándose a una máxima potencia durante un 90% del día.

Existen ocho puntos clave de Operación de una Presa, éstos son:

**Nivel mínimo**, es la menor cota o nivel inferior de la bocatoma, y es el nivel mínimo del embalse.

**Nivel mínimo operable**, es aquel en el que las estructuras dependen de la presa, en algunos casos las turbinas no operan en forma adecuada. En las Centrales Hidroeléctricas, a los sistemas automatizados de protección de equipo se les llaman nivel de disparo, y esto sucede al censar un nivel que puede provocar cavitación y dañar las superficies de contacto con el agua (rodete, agujas o paletas) ya que la tubería no está completamente llena y lleva burbujas de aire en ella.

**Nivel máximo operable**, es el inicio del vertimiento para mantener el nivel de agua estable, sin provocar daños aguas abajo.

**Nivel máximo normal**, en este punto la integridad de la presa es la prioridad, sobre todo cuando se trata de presas de elementos sin anclar porque con este nivel puede dañarse, por erosión o por excesivo esfuerzo, las paredes de la presa; en este nivel puede ocasionarse daños aguas abajo.

**Nivel máximo**, en Guatemala existen pocos casos en los que este nivel es de vital importancia; en él, la seguridad de las comunidades aledañas puede estar en peligro, la ruptura total de la presa podría ser de probabilidades altas porque se exceden los esfuerzos de diseño y el vertedero está a su máximo, para mantener un nivel seguro en la presa es recomendable que el caudal de entrada al embalse sea un poco menor que el del vertedero.

**Volumen muerto**, es el volumen de agua antes de llegar al nivel mínimo de la presa, es decir, volumen de llenado de tubería hasta la cámara de presión de la turbina.

**Volumen útil**, es la cota utilizable, o la diferencia entre la cota superior y la inferior por el área que abarca la superficie del espejo del agua del embalse.

*Caudal firme*, es el caudal o la cuantía de la cuenca, los datos proporcionados por los aforos de investigación de la cuenca.

### **2.3.1 Requisitos para la investigación geológica y muestreo en el diseño de presas.**

Todas estas condiciones varían respecto al uso y condiciones topográficas y geológicas, las siguientes son las básicas para el inicio de un diseño de presas<sup>8</sup>.

- Reconocimiento Geológico,
- Recopilación de Datos, disponibilidad de Cotas, Aforo de la Cuenca,
- El uso de la Presa,
- Fotografías Aéreas,
- Planos Topográficos,
- Estudio del Terreno,
- Levantamiento de Planos
- Exploración del Subsuelo
- Investigación de Aguas Subterráneas.

### **2.3.2 Partes que conforman una presa**

#### *El Vertedero o aliviadero*

Necesario para la evacuación del exceso de carga de agua cuando haya crecidas no programadas, evitando que esta sobrecarga dañe la estructura principal de la presa.

---

<sup>8</sup> Criterios y Procedimientos para llevar a cabo Investigaciones Geológicas en Presas, Ing. Abdel Vásquez D., Pág. 15-27

### Compuerta de fondo

Éste es un vertedero mucho más eficiente porque evacua en el nivel mínimo de la cota utilizable, lo que permite una auto limpieza de sedimentación, evacuando lodos y dejando el agua más sana.

### Altura geodésica

Es el límite topográfico del terreno, esta altura es la energía potencial neta del agua por lo que se dice que entre más alta sea la cota diferencial, mas energía potencial habrá en el embalse y, más cantidad en volumen de agua almacenada.

### La presa compensadora

Esta es una represa adicional que capta o embalsa el caudal de vertimiento, esto es de gran utilidad para el resguardo de la cuenca para no saturarla y provocar daños por inundación.

### Las tuberías de presión

Llevan el agua desde la obra de bocatoma hasta las turbinas, también se las llama conductos forzados.

### Compuertas principales

En la mayoría de los casos, son estructuras de acero revestidas de protectores epóxicos para evitar corrosión, son montadas para bloquear la cuenca en presas derivativas que atajan el agua, se alzan para proporcionar la altura geodésica, del río, en el río Samalá se han instalado de dos tipos que serán mencionados posteriormente.

### 2.3.3 Tipos de presas

Las presas pueden clasificarse de acuerdo a su estructura, por los materiales con los que está constituida y además por su uso; las hay de hormigón y de elementos sin anclar. En las primeras, las más comunes son de gravedad, de bóveda y de contrafuerte; las segundas pueden ser de piedra o de tierra. También existen diseños mixtos en los cuales, por consideraciones del terreno, brindan mejor estabilidad.

El diseño de una presa es un tema muy profundo que concierne al campo civil, por ello solo se nombrarán para poseer un conocimiento somero acerca de cada una; de esta manera será posible enfatizar en el tema central de este trabajo, es decir, en el uso de presas en línea o cascada y las consideraciones para operarlas eficientemente para lograr hidroeléctricas estables y una generación constante.

La elección del tipo de presa también se relaciona a la selección de los materiales a usar, al fácil acceso a ellos, a las consideraciones económicas y de ingeniería necesarias para llevar a cabo el proyecto, sin dejar de tomar en cuenta la topografía del terreno, que constituye el indicador del tipo de estructura a emplear.

#### 2.3.3.1 Por su estructura

Se clasifican en:

*Presas de gravedad*, son de hormigón, de corte transversal triangular, de base ancha con tendencia a estrecharse en la parte superior. Se llaman de gravedad porque su propio peso las hace estables; transmiten el esfuerzo hacia el suelo por medio del diseño triangular tipo rectángulo de la estructura, el tipo de construcción es duradero y de poco mantenimiento, la razón del diseño y el porqué es más ancha en su parte inferior se debe a las presiones que van disminuyendo hasta la parte superior y que necesita menos

soporte porque en ese punto la presión es reducida considerablemente. En la parte superior, la envergadura está ligada a las características geológicas del terreno, es decir, a la resistencia del mismo; el perfil de la estructura de la presa es recto, en algunos o pocos casos, son semi-curvos o de curvas muy suaves.

***Presas de arco o de bóveda***, este es un diseño muy ingenioso, es una presa en la que su convexidad del arco o la corona está del lado del embalse; el peso del volumen del agua se transmite hacia los extremos en donde el soporte es más estable, esta curvatura es lo relevante del diseño porque la convexidad transmite el esfuerzo de compresión hacia los puntos de apoyo en los extremos de la cuenca, los que deben ser muy duros y fuertes; este diseño, utilizado en valles o cañones estrechos, es muy eficiente y de bajo costo aunque de gran complejidad para el constructor por las formas poco usuales del diseño.

***Presas de contrafuerte***, son muy simples, están diseñadas con una pared que ataja el agua; de sección pequeña pero reforzada por columnas o contrafuertes de forma triangular parecidas a las presas de gravedad; sin embargo, aquí las columnas son soportes de peso del agua; el espaciamiento entre columnas o contrafuertes se da en función de las proporciones de la pared y, para ampliar la separación, puede ser del tipo arco o bóveda. Los contrafuertes son los encargados de dar soporte y, además, de transmitir el peso del volumen de agua al suelo, este tipo de presa tiene la característica de reducir el volumen de hormigón a utilizar pero no por ello economiza el diseño. Es muy utilizada en terrenos con poca estabilidad.

### **2.3.3.2 Por sus elementos de construcción**

***Elementos sin anclar*** este tipo de presa es la más común para contener agua ya que utiliza materiales naturales, es decir, sin transformación alguna, como las piedras y tierra. La construcción de este tipo de presas depende de la accesibilidad y

disponibilidad de dichos elementos en el área a construir, el problema más importante de diseño en este tipo de presas es la poca estabilidad que proporcionan este tipo de materiales ya que, por la facilidad de deterioro, su anchura debe ser de cuatro a siete veces la envergadura de la presa. Generalmente, son constituidas de un relleno compactado de tierra que es la que aporta la resistencia al empuje que provoca el peso del volumen del agua, el costo es bastante equiparable a costos de hormigón, reducidos en un poco porcentaje. Para reducir los problemas de erosión y de absorción de la tierra las presas son reforzadas, en este aspecto, por elementos impermeables como la arcilla y, ahora con las nuevas tecnologías, el geo-textil y la geo-membrana, los que evitan y mejoran la eficiencia de este tipo de presas y procuran la infiltración del terreno.

La distinción entre presas de tierra o de piedra, es función solo de la cantidad de cada elemento que posea la presa, siendo los incluyentes las piedras, gravas, arenas, limos y arcillas, cuando existe más del 50% de piedra se denomina presas de escollera, y de tierra cuando su granulométrica es más pequeña. Cabe agregar que son de alto riesgo cuando el nivel del agua supera los vertederos lo que conlleva al desmorono y el total colapso de la presa.

***Presas de hormigón***, son de gran durabilidad y de poco mantenimiento, pero vale acotar que conllevan un gran costo de construcción, en la actualidad es utilizado solo en algunos países. Aquí, en Guatemala, se observan algunas como en el caso de Santa María; este tipo de presas posee una gran estabilidad, los materiales más usados son el ladrillo y, antiguamente, el concreto y la mampostería.

### **2.3.3.3 Por su aplicación**

***Presa filtrante o de retención***, son aquellas cuya función principal es retener desde sólidos finos hasta gravas, e incluso las piedras de gran tamaño transportadas por grandes crecidas en aéreas montañosas.

*Presas de control de avenidas*, su función principal es laminar crecidas para que no provoque daños en estructuras aguas abajo, diezmando de gran manera la inercia del peso del volumen de agua de crecidas instantáneas por lluvias de la cuenca, solo son utilizadas para protección.

*Presas de derivación*, su fin único es obstaculizar el paso del agua mas no atajarla para acumulación, es de pequeña envergadura y posee un desvío hacia una cámara de carga por medio de un canal de derivación, el cauce es obstruido y enviado a la cámara de carga con un pequeño desnivel para desarenado, cabe agregar que la inercia del fluido hace que se estanque en la presa y no sea conducido por el canal hacia la cámara de carga, en ésta se encuentra situada la bocatoma de la tubería de presión.

*Presas acumulativas*, en este tipo de presas el fin primordial es la elevación de altura de volumen de agua, por ello este tipo de presas se construyen en una cota determinada considerablemente alta, un desnivel grande de aguas arriba y aguas abajo, por lo que la cota de volumen de agua está casi a la máxima cota de presas, para la maximización de la disponibilidad de volumen, es necesario instalar la boca toma en la parte media de la presa. Posee vertederos y además una compuerta de fondo para botar sedimento acumulado cuando el caudal del río lo requiere.

#### **2.3.3.4 Por su operación**

Estas pueden ser de ciclo diario, mensual, anual o hasta plurianual, hay casos extremos que son de ciclo diario, en ellos se acumulan el agua durante veinte horas del día, para poder generar por cuatro horas, por lo general en las horas pico que son las que mejor se cotizan en el mercado, por su operación en Guatemala son las más usuales.

*Presas a filo de agua*, usan el volumen de agua necesario para cubrir las necesidades de la central en cualquier momento, es un diseño de amplio análisis que

permite mantener el volumen de agua requerido. Es usada para pequeñas centrales, no posee almacenamiento alguno.

***Presas de regulación diaria***, es un embalse de tamaño regular, las centrales con este tipo de presas se llaman “de piqueo”, regulan su volumen total del embalse para tener reservas que permitan completar la generación y mantenerla estable a las horas más requeridas por el Sistema Nacional Interconectado (aproximadamente de 18:00 a 22:00 hrs diariamente). Este tipo de presas recuperan nivel en la madrugada, cuando el Sistema Nacional Interconectado no requiere mucha potencia, entonces se consume menos volumen de agua para poder recuperar la cota máxima.

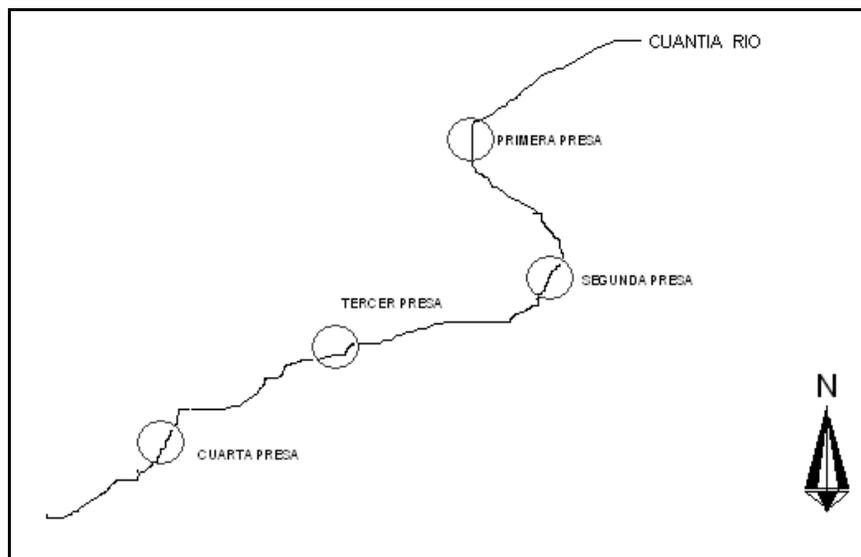
***Presas de regulación anual***, estas poseen una extensión territorial mucho mayor, son capaces de almacenar volumen de agua para todo el año, poseen la peculiaridad de abastecerse en época de lluvia, durante la cual embalsan el máximo de agua posible y regulan el consumo para el abastecimiento durante épocas de escases, así cubren la demanda básica y horas pico, un ejemplo de este tipo de presas en Guatemala es la del proyecto Chixoy, que abastece de volumen de agua a la Hidroeléctrica del mismo nombre, esta regula todo el año para proveer de energía eléctrica estable al Sistema Nacional Interconectado.

## **2.4 Modalidad de presas en cascadas**

Presas en cascada, son varias presas instaladas en la línea de una cuenca con una muy buena cuantía y con características muy peculiares. El procedimiento inicia al embalsar una gran cantidad de agua en una presa principal y turbinarla, luego se ataja en una presa de menor tamaño aprovechando el desfogue de la primera y turbinando su volumen, así consecutivamente hasta el punto mínimo de cota de posible instalación de centrales. El estudio de presas en cascada está en una etapa de prueba y error, basándose únicamente en el estudio de la historia de la cuenca y dejando a un lado la operatividad

de las centrales con este tipo de construcción; basarse en la cuenca de río es basarse en el caudal medio manejable en el punto de diseño de la nueva hidroeléctrica; en el mundo poco se oye de hidroeléctricas en cascada, en Latinoamérica, específicamente en Argentina, el Río Bermejo es un ejemplo claro de un embalse en cascada. Lo más importante en la relación de hidroeléctricas, es la operación de dichas presas y el tipo de presas a instalar. Por ejemplo, las presas instaladas en el río Samalá, que es el punto central de la investigación, posee cuatro embalses de diferente tipo; analizaremos cada uno y el porqué del sitio de instalación.

Figura 28. Trayectoria de una cuenca, con cuatro centrales con montaje del tipo cascada



Fuente: **David Alcántara**  
**Modelo de comportamiento de presas en cascada y visualización por software**

Con respecto al uso de presas en cascada se debe hacer referencia a la importancia hídrica de la cuenca, el río Samalá posee muchas virtudes, por lo que está en la mira de muchos inversionistas. Las ventajas observadas son, en primer lugar, la pendiente pronunciada en su trayecto, que es traducida en altura geodésica, inicio del diseño eficiente en una turbina y la elección del tipo; otra característica de la cuenca es la forma de cañón que es aprovechada para el vaso del embalse en aspectos operativos de una línea de presas; si nos referimos a las presas de la cuenca del río Samalá, la presa

principal que inicia la línea es la presa de Santa María, que posee el volumen principal de piqueo, un embalse diario que ataja la cuantía del río y lo deriva hacia su desarenador y lo turbinan; el desfogue es aprovechado por Hidroeléctrica Canadá, usando una presa derivadora del tipo rubber dame, atajándolo en su embalse, luego turbinándolo, la característica principal es la disminución del tamaño del vaso del embalse; el desfogue es directamente atajado por Hidroeléctrica Monte Cristo, la cual embalsa y turbinan. La Hidroeléctrica El Recreo poseen una presa con dos compuertas abatibles de acero con cubierta epóxica para evitar daños corrosivos, esta es una presa derivadora especial, porque no solo encausa el agua hacia el canal, también alza la cota geodésica del nivel mínimo de cota a nivel máximo operativo, la cuantía se deriva por el canal hacia la bocatoma y se turbinan concluyendo el aprovechamiento hídrico de la cuenca Samalá, hasta la fecha.

#### **2.4.1 Presa Hidroeléctrica Santa María**

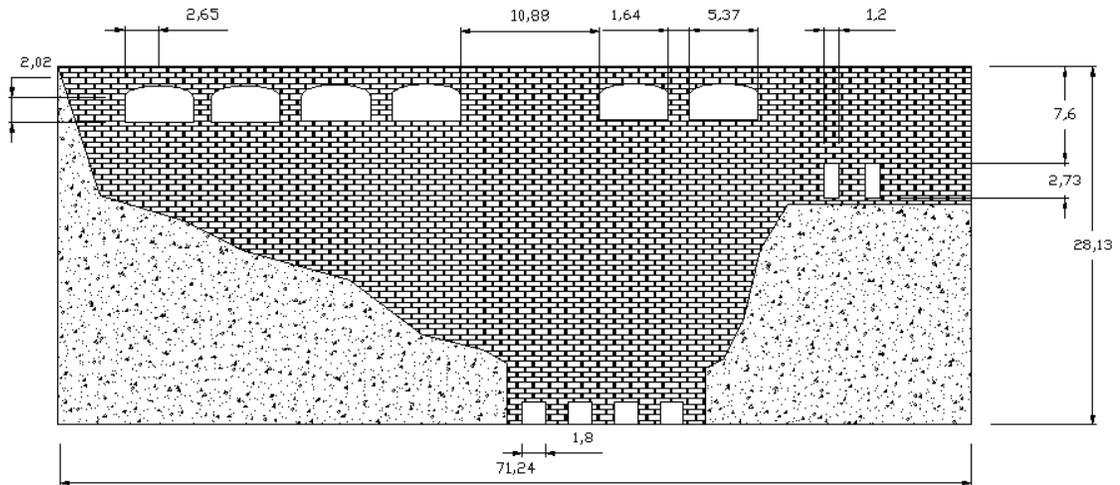
Estructura de concreto ciclópeo, cubierta en sus caras exteriores con fachada de mampostería de basalto. Fue construida en el año de 1926 teniendo una figura curva, diseñada como una estructura de gravedad, retiene un volumen de embalse de aproximadamente 265,000.00 m<sup>9</sup>.

Datos:	Regulación diaria
Tipo:	Gravedad, concreto
Altura:	28.13 m.
Longitud de la corona:	71.24 m.
Nivel del puente:	1542.00 m.s.n.m.
Nivel de la cresta del vertedero:	1535.30 m.s.n.m

---

<sup>9</sup> Catalogo Informativo Hidroeléctrica Santa María, Ubicación Territorial, INDE.

Figura 29. Presa Hidroeléctrica Santa María



Fuente: David Alcántara  
**Modelo de comportamiento de presas en cascada y visualización por software**

#### 2.4.1.1 Embalse hidroeléctrica Santa María

Es un vaso sedimentador, que remueve los sedimentos provenientes del río Samalá y es limpiado todos los años cuando da inicio la estación lluviosa, en el mes de mayo, llevando todos los sedimentos aguas abajo.

Embalse de regulación horario

Volumen total	259,600 m <sup>3</sup> .
Volumen útil	215,500 m <sup>3</sup> .
Volumen útil mínimo	130,000 m <sup>3</sup> .
Nivel máximo normal	1,535.30 m. s. n. m.
Nivel mínimo	1,529.00 m. s. n. m.
Área en Superficie	22,640.00 m <sup>2</sup> .

Figura 30. Embalse hidroeléctrica Santa María



Fuente: [www.googleearth.com](http://www.googleearth.com), tele atlas 2009 Digital Globe

## 2.4.2 Presa Hidroeléctrica Canadá

Estructura de concreto, su compuerta inflable de membrana de caucho, es una presa derivadora hacia un canal el cual transporta el flujo hacia el embalse

Datos:	Regulación horaria
Tipo:	Rubber Dame
Altura:	3.0 m.s.n.m.

### 2.4.2.1 Embalse Hidroeléctrica Canadá

Es un vaso sedimentador, de concreto recubierto de una geo-membrana la cual impide la filtración y pérdida de volumen de agua, evacúa el sedimento por medio de dos dragas para evitar la absorción de éste de las turbinas.

### Embalse de regulación horario

Volumen total	290,000	m <sup>3</sup> .
Volumen útil	184,000	m <sup>3</sup> .
Nivel máximo de Operación	1417.50	m. s. n. m.
Nivel mínimo de Operación	1409	m. s. n. m.

Figura 31. Embalse Hidroeléctrica Canadá



Fuente: [www.googleearth.com](http://www.googleearth.com), tele atlas 2009 Digital Globe

### 2.4.3 Presa Hidroeléctrica Montecristo

Estructura de concreto, su compuerta tipo vagón de acero, es una presa derivadora hacia un canal que transporta el flujo hacia el embalse desde el desfogue de la central hidroeléctrica Canadá.

#### 2.4.3.1 Embalse Hidroeléctrica Montecristo

Es un vaso sedimentador, de concreto recubierto de una geo-membrana la cual impide la filtración y pérdida del volumen de agua, está instalada directamente en el desfogue de la central Canadá.

### Embalse de regulación horario ligadas a desfogue

Volumen total	16, 500	m <sup>3</sup> .
Nivel Máximo de Operación	1019.80	m.s.n.m.
Nivel normal de Operación	1017.30	m. s. n. m.
Nivel mínimo de Operación	1015.00	m. s. n. m.

Figura 32. Embalse hidroeléctrica Monte Cristo



Fuente: [www.googleearth.com](http://www.googleearth.com), tele atlas 2009 Digital Globe

#### 2.4.4 Presa Hidroeléctrica El Recreo

Estructura con bases de concreto, sus compuertas abatibles de acero con recubrimientos epóxicos accionadas por medios hidráulicos, es una presa derivadora hacia un canal que transporta el flujo hacia la cámara de carga/bocatoma desde el desfogue de la central hidroeléctrica Monte Cristo y con un aporte adicional de afluentes de las escorrentías. La presa es la encargada de atajar la cuantía y en este caso de incrementar en poco la curva geodésica por medio de un pequeño embalse, luego el agua es derivada 90° hacia un canal derivador que filtra desechos de mediano hasta gran tamaño a través de una reja (sistema de evacuación con limpia rejas accionados hidráulicamente) que elimina y lleva el agua a la cámara de carga en donde es absorbida por la tubería de conducción.

Datos:

Tipo:	Compuerta abatible	
Altura:	12.00	m.
Longitud de cada compuerta:	8.50	m.
Nivel del puente:	905.00	m.s.n.m.
Nivel de la cresta del vertedero:	903.37	m.s.n.m.

#### 2.4.4.1 Embalse Hidroeléctrica El Recreo

Está formado por la cuenca del río, inundándola; el diseño es una combinación, como se ha hecho mención en párrafos anteriores, de presa/embalse, la cuenca inundada sirve para amortiguar decaimientos en la cuantía del río, la altura llega hasta una cota geodésica segura para la central aguas arriba para cuidar la cota de ahogamiento del rodete por seguridad se maniobra a 0.30 m de la cota de diseño ahogamiento del rodete Hidroeléctrica Monte Cristo.

Embalse de regulación horario semi dependiente de desfogue

Nivel máximo normal	903.35	m. s. n. m.
Nivel mínimo	900.85	m. s. n. m.

Figura 33. Embalse Hidroeléctrica El Recreo



Fuente: [www.googleearth.com](http://www.googleearth.com), tele atlas 2009 Digital Globe



### **3. MODELACIÓN DE APROXIMACIÓN OPERATIVA POR MÉTODOS MATEMÁTICOS**

Este capítulo desarrolla un apoyo matemático para los operadores en las centrales del tipo hidroeléctrico y de línea en cascada, cuyo fin es facilitar la predicción del despacho de carga.

#### **3.1 Disponibilidad del recurso**

El agua es el combustible de las centrales hidroeléctricas, por lo que su disponibilidad es fundamental en los estudios eléctricos y constituye un verdadero reto lograr una utilización práctica, consciente e inteligente de dicho recurso para lograr su maximización. Cada planta hidroeléctrica debe optimizar su fuente de energía, a través del consumo ordenado y sistemático para obtener un aprovechamiento eficiente.

El recurso hídrico es una fuente de energía, capaz de brindar el accionamiento a centrales para la generación eléctrica, y su característica renovable le permite ser usado para otras aplicaciones como riego y usos domésticos.

La topología y la abundante naturaleza del territorio nacional, proveen grandes ventajas en cuanto a la disponibilidad de ríos caudalosos que permiten la ejecución de proyectos hídricos, lo cual demuestra que Guatemala tiene un alto potencial para sustentar, en un gran porcentaje, la demanda diaria a través de una actividad generadora más económica y con un índice contaminante extremadamente reducido, es decir, para ser una fuente sostenible de generación verde de energía eléctrica, lo cual equilibraría, al mismo tiempo, las variaciones del mercado eléctrico, a causa de la inestabilidad en el costo de los combustibles fósiles, de los cuales dependen, por el uso que hacen de ellos, las generadoras a base de diesel y bunker que sirven de apoyo para cubrir la demanda. En la siguiente tabla se muestra el aprovechamiento actual de los principales ríos del país.

Tabla IX. **Reporte principales ríos de Guatemala y sus caudales**

Nombre del Río	Longitud río (Km.)	Caudal Medio en punto de control (m <sup>3</sup> /s)
<b>Cabuz</b>	60.80	21.3
<b>Naranjo</b>	104.55	20.7
<b>Ocosito</b>	106.80	30.2
<b>Samalá</b>	145.00	8.7
<b>Icán</b>	52.80	34.0
<b>Nahualate</b>	130.30	60.8
<b>Madre Vieja</b>	125.50	8.0
<b>Coyolate</b>	154.95	15.6
<b>María Linda</b>	70.10	13.1
<b>Los Esclavos</b>	144.80	15.8
<b>Paz</b>	133.80	23.2
<b>Grande de Zacapa</b>	86.55	28.5
<b>Motagua</b>	486.55	208.7
<b>Polochic</b>	193.65	69.3
<b>Cahabón</b>	195.95	164.2
<b>Selegua</b>	101.75	38.0
<b>Salinas **</b>	112.70	551.0
<b>La Pasión</b>	353.90	322.8
<b>San Pedro</b>	186.25	52.9

Fuente: [www.insivumeh.gob.gt/hidrologia/ríos](http://www.insivumeh.gob.gt/hidrologia/ríos).

Como se puede identificar, según los datos arriba mencionados, el río Samalá tiene una utilización más eficiente en comparación con las otras cuencas hidrográficas; posee una actividad muy buena y al ser aprovechada por cuatro hidroeléctricas, la convierte en la única cuenca en el país en la que funciona el sistema de presas en cascada.

### **3.2 Tendencias de la demanda en el Sistema Nacional Interconectado de Guatemala**

La tendencia de la demanda de potencia en Guatemala, está trazada por el factor de consumo, este agrupado en Distribuidores, Grandes usuarios y Comercializadores.

Así, por ejemplo, los usuarios al llegar del trabajo encienden el interruptor en la puerta de entrada de sus casas y como por arte de magia se iluminan sus hogares, en ese momento se define un pico o nivel máximo de consumo, en el que la mayoría de las personas tienen funcionando muchos de sus aparatos eléctricos; ¿cómo sucede eso? Los

usuarios se encuentran conectados a través de una red de cable de baja tensión de 220/110 voltios, suministrados por medio de un transformador que provee el servicio, el transformador, a su vez, está conectado a una red de distribución de media tensión de alrededor de 13.8 kV., la cual también se conecta a otro transformador de gran tamaño, que reduce los niveles de tensión de 69, 138 o 230 kV hasta niveles de distribución 13.8 kV., todo este cambio de niveles de tensión y redes está a cargo de los distribuidores, es decir, de las empresas a las que los usuarios contratan y pagan para que les provean el servicio de energía eléctrica de sus hogares; los distribuidores, entonces, son aquellos que compran al SNI extensos bloques de generación para poder distribuir y revender el servicio.

Los grandes usuarios, son empresas con demandas altas<sup>10</sup>, en una clasificación por detalle de consumo y demandas instantáneas, estos se encuentran conectados directamente a líneas de transmisión de alta tensión, ellos poseen sus propias subestaciones reductoras de nivel de tensión.

Tabla X. **Clasificación de los agentes**

<b>Comercializadores</b>	<b>Comprar o vender bloques de energía asociada a una potencia firme de al menos 2 MW.</b>
<b>Generadores</b>	Centrales con capacidad mayor a 5MW.
<b>Distribuidores</b>	Capacidad de más de 15,000 usuarios.
<b>Grandes Usuarios</b>	Demanda máxima de al menos 100 KW.

Fuente: **Datos obtenidos del reglamento de la Ley General de Electricidad, Artículo 39.**

Los Comercializadores, son entes cuya actividad consiste en comprar y vender bloques de energía eléctrica con carácter de intermediario, por lo que no se toman en cuenta en la participación de generación, transporte, distribución y consumo;<sup>11</sup> su función radica en cubrir los dos grandes grupos de consumidores, pues como intermediarios entre el consumidor y los generadores están encargados de proveer el medio para la compraventa de energía. Ahora bien, los comercializadores les compran energía a las centrales eléctricas, Guatemala posee gran variedad de generadoras, como

<sup>10</sup> Por ejemplo Hornos de Arco en Fundidoras de Acero.

<sup>11</sup> Legislación Guatemalteca. Decreto 93-96, Ley general de Electricidad. Artículo 5.

las centrales térmicas, geotérmicas, hidroeléctricas y las centrales de biomasa, que son las encargados de abastecer y cubrir la demanda del sector eléctrico nacional.

Figura 34. Sistema Nacional Interconectado.

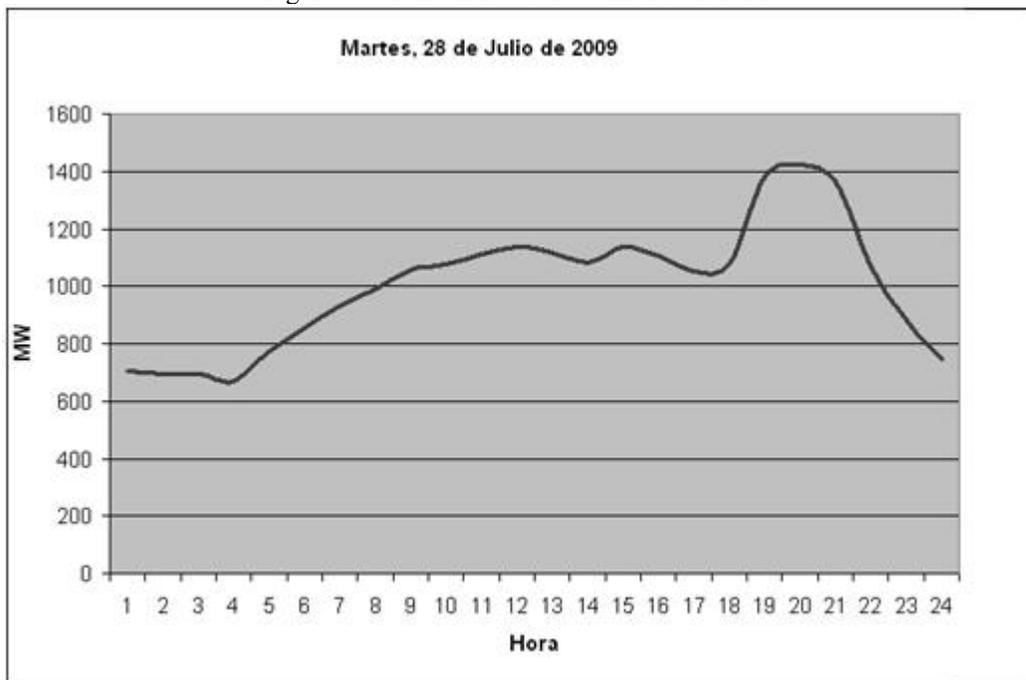


Fuente: **Presentación seguridad energética, diversificación de las matrices energéticas, CNEE de Guatemala, Pág. 15.**

El Sistema Nacional Interconectado con su tejido cableado de alto voltaje, como se observa en la figura 30, sirve de vía para la transmisión del flujo de potencia, en las que se conectan subestaciones transformadoras de bifurcación y de acople, éstas últimas con la función de conectar todo tipo de Centrales Generadoras al SNI, que es un complejo sistema que posee muchas exigencias, tal como la estabilidad en la frecuencia, los niveles de voltajes en cada barra o nodo de acople y los rangos de potencia no solo activa, sino también reactiva, y en sus dos casos capacitiva e inductiva, cubriendo los

lazos de control QV<sup>12</sup> y PF<sup>13</sup>, todo esto ligado a un sistema de Políticas Económicas, que rigen el costo instantáneo de la energía con la demanda del sistema.

Figura 35. Tendencias de la demanda horaria.



Fuente: Demanda diaria, disponible en [www.amm.org.gt](http://www.amm.org.gt)

### 3.3 Políticas de operación y determinación de precios de energía

Ante el incremento de la demanda de energía eléctrica en Guatemala y con los antecedentes de que el gobierno no cuenta con los recursos necesarios para la modernización del sistema, se crea la Ley General de Electricidad, Decreto 93-96 del Congreso de la República, que pretende descentralizar y desmonopolizar los Sistemas Eléctricos del país, también propone crear un órgano técnico ante el Ministerio de Energía y Minas, llamado Comisión Nacional de Energía Eléctrica, cuyas funciones

<sup>12</sup> Lazo de Control basado en Potencia Reactiva y Voltaje.

<sup>13</sup> Lazo de Control basado en Potencia Activa y Frecuencia.

radican en cumplir y hacer cumplir dicha normativa legal; de igual manera le compete la imposición de sanciones en los casos de infracción y la definición de tarifas de transmisión y distribución, también debe definir los métodos del cálculo, la emisión de Normas Técnicas relacionadas al ramo eléctrico, y la supervisar la operación del Mercado Mayorista.

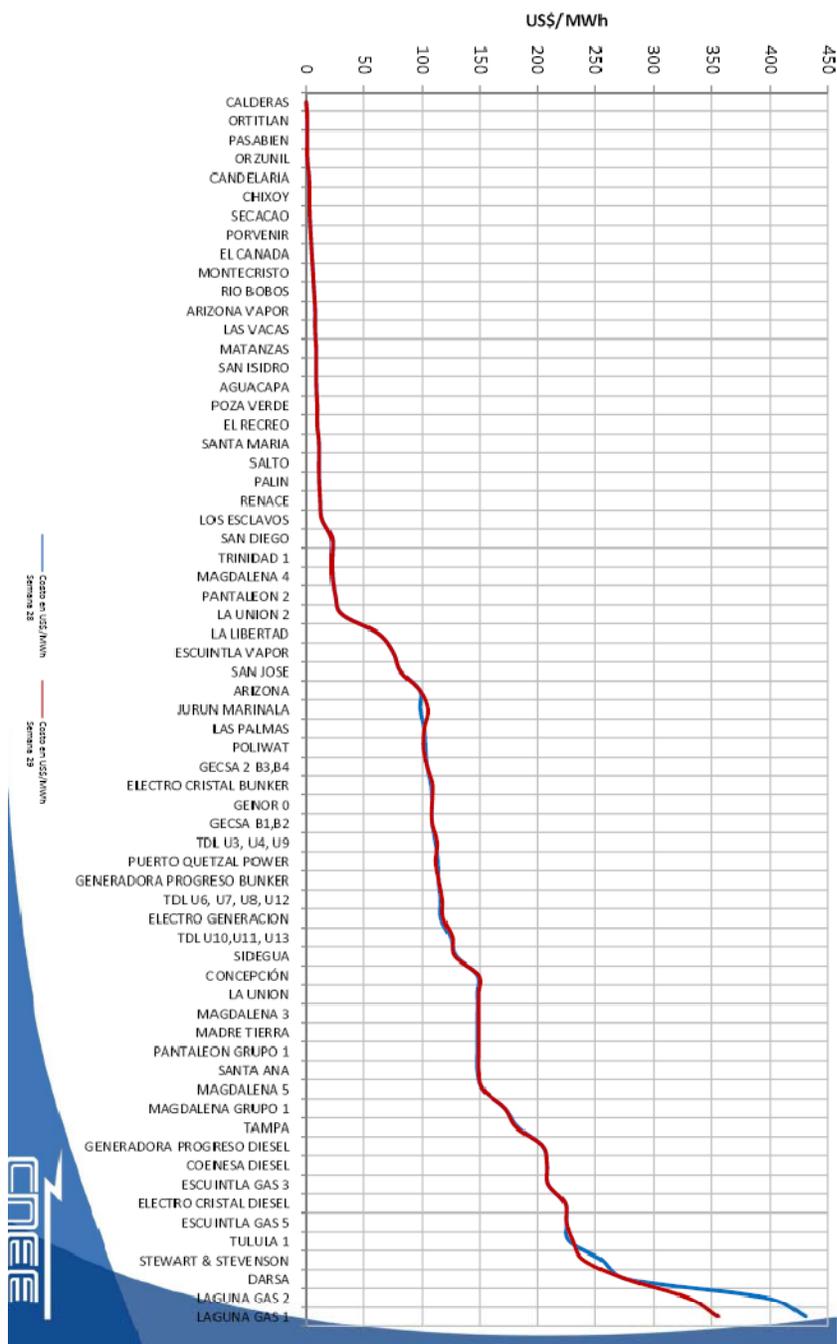
### **3.3.1 Administrador del Mercado Mayorista**

Es el órgano, de carácter privado y sin fines de lucro, encargado de operar el mercado mayorista, sus funciones deben basarse en:

- La coordinación de la operación de centrales generadoras, interconexiones internacionales y las líneas de transporte al mínimo costo.
- El establecimiento de precios de mercado de corto plazo para las transferencias de potencia y energía entre generadores, comercializadores, grandes usuarios y distribuidores.
- La garantía de la seguridad y el abastecimiento de energía eléctrica.

El Administrador de Mercado Mayorista posee su propio reglamento que usará para la coordinación del Sistema Eléctrico Nacional, en la compra y venta de potencia eléctrica, energía eléctrica y servicios de transporte de energía.

Figura 36. Estadísticas del precio por MW de los agentes generadores

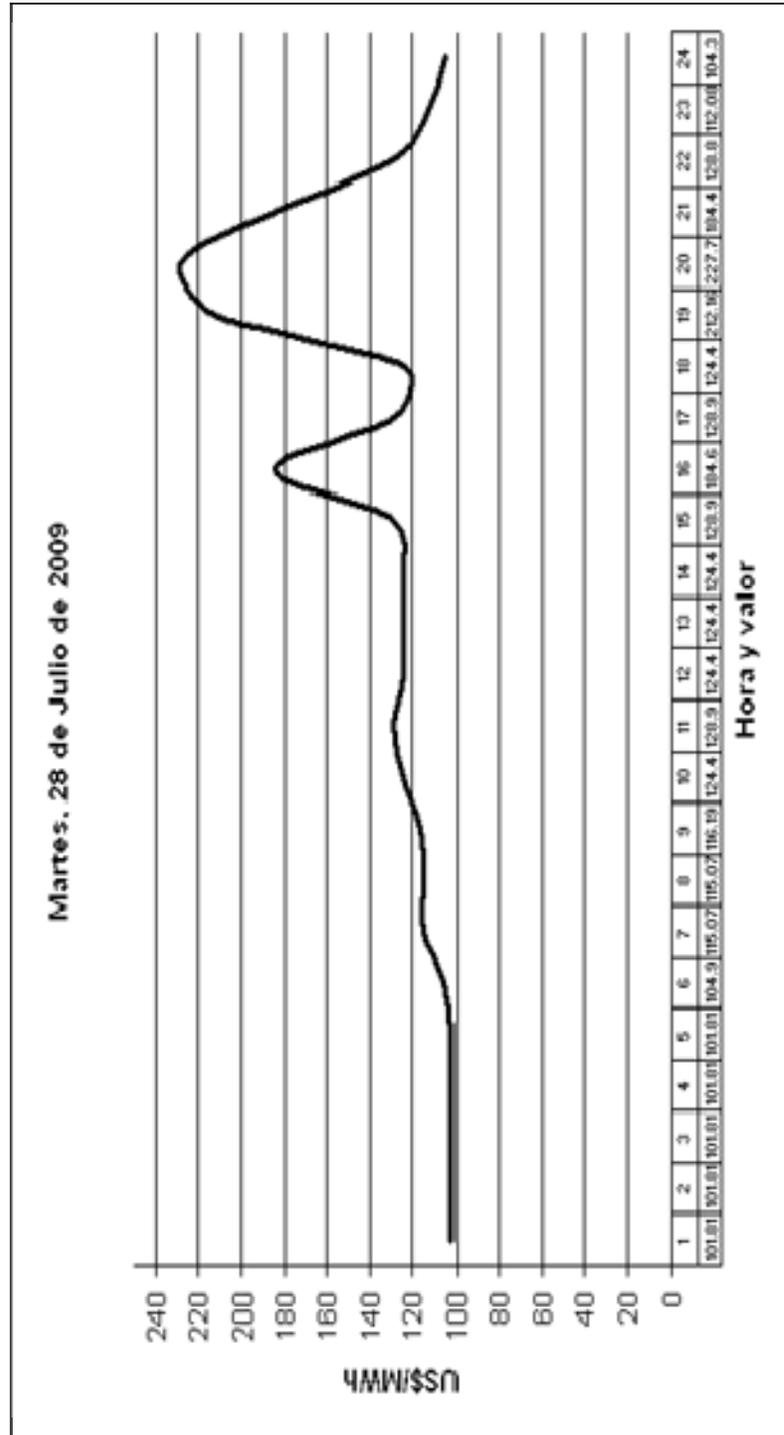


Fuente: [www.cnee.gov.gt/estadisticas-mercado](http://www.cnee.gov.gt/estadisticas-mercado)

Una de sus funciones más interesantes es el establecimiento de precios de la energía en Guatemala, la metodología usada es la de un mercado *spot* o mercado de oportunidad, con precios modificables de forma horaria, que dependen de la demanda instantánea a requerir y de los agentes que integren el abastecimiento de energía.

El Administrador del Mercado Mayorista, posee el listado de los Agentes Generadores con sus precios por unidad de generación, el orden de aquel, como se muestra en la gráfica anterior, va desde la generación más económica, derivadas de las Hidroeléctricas, hasta los costos más caros de MWh, de las generadoras a base de combustibles fósiles; por ello entre más alta es la demanda diaria, mas alto es el costo de la unidad de energía, porque se tasa, para el abastecimiento de la demanda de ese momento, de acuerdo al valor del generador más caro que integre el lazo. Lo que se muestra en la siguiente gráfica es la hora en la que el precio *Spot* es más alto, se puede apreciar que coincide con la hora pico, es decir, el momento en el que el Sistema demanda un aumento de Energía.

Figura 37. Tendencias del precio Sport vrs. Demanda diaria.



Fuente: Precio Spot Diario, disponible en [www.amm.org.gt](http://www.amm.org.gt)

El Administrador del Mercado Mayorista, cuenta con instalaciones de coordinación para realizar el despacho, este se hace en tiempo real a través de datos telemétricos por medio de RTU<sup>14</sup>, instalados no solo en Centrales Generadora, sino también en las Subestaciones de los Grandes Usuarios.

Las RTU, reflejan el comportamiento dentro del sistema del generador o usuario, proporcionando datos como la potencia generada o consumida, estado de disyuntores, fallas en el sistema, entre otros. La coordinación del despacho posee datos históricos que respaldan la proyección, además de reportes horarios de cada generador o consumidor, para así realizar un despacho eficiente.

El despacho, maneja una serie de variables, que se deben coordinar, la más tangible es la potencia, que viene dada por una simple ecuación.

$$\sum_{i=0}^n (Eg_i) = \sum_{j=0}^m (Ec_j + Ep)$$

Donde:

$Eg_i$ , es Energía Generada por  $n$  número de Agentes integrando el lazo.

$Ec_j$ , es Energía Consumida por  $m$  número de Grandes Usuarios.

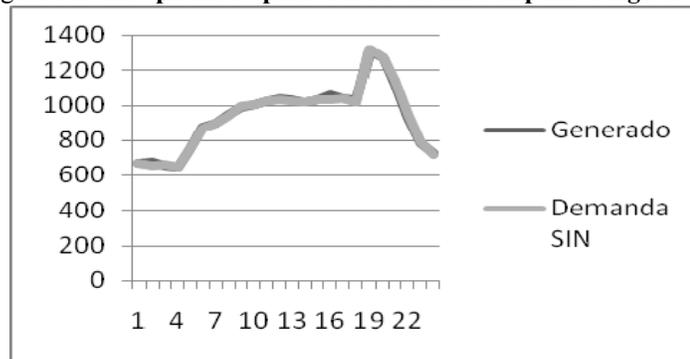
$Ep$ , es Energía consumida por las pérdidas en el Sistema.

---

<sup>14</sup> Por sus siglas en Ingles (Remote Telemetric Unit).

Según lo que muestra esta ecuación, el despacho debe predecir el aumento o reducción de demandas para poder incrementar o reducir el nivel de potencia, lo realiza a través de la inclusión o exclusión de agentes generadores para estabilizar la carga del Sistema, tal y como se observa en la siguiente gráfica, que muestra la igualdad entre la potencia demandada y la potencia generada, existe una pequeña diferencia entre ambas, esta es la potencia absorbida por las pérdidas del sistema.

Figura 38. Comparación potencia demanda vrs. potencia generada



Fuente: Datos obtenidos de PostDespacho AMM, 15 de Octubre 2008

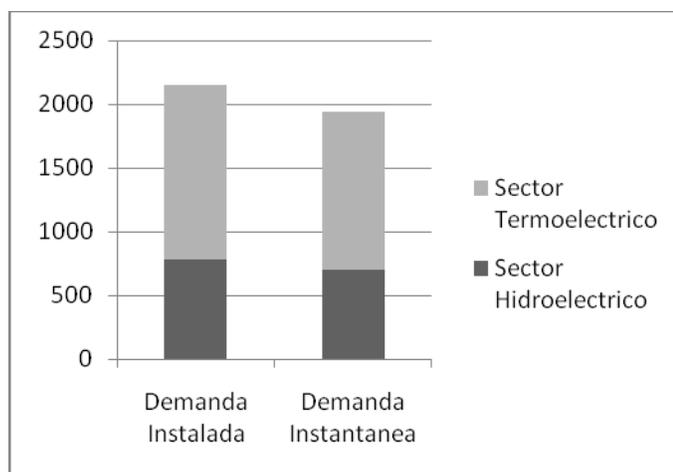
La demanda diaria del país está cubierta en su mayor parte por centrales del tipo termoeléctricas, debido a que no existe un aprovechamiento eficiente de la totalidad de las cuencas amigables para el montaje de centrales del tipo hidroeléctrico, como lo muestra la tabla siguiente.

Tabla XI. Capacidad instalada de centrales eléctricas.

<b>Sistema Eléctrico Nacional</b>	<b>2,153.8</b>	<b>1,938.7</b>
<b>Hidroeléctricas</b>	<b>775.6</b>	<b>703.38</b>
Chixoy	300.0	271.80
Aguacapa	90.0	80.00
Jurún Marinalá	75.0	60.00
Renace	68.1	66.34
El Canadá	48.1	47.40
Las vacas	45.7	39.00
Secacao	16.5	16.30
Los esclavos	15.0	14.00
Montecristo	13.5	13.50
Pasabién	12.8	12.30
Matanzas	12.0	11.67
Poza verde	12.5	10.15
Río bobos	10.0	10.00
Santa maría	6.0	3.00
Palín 2	5.8	4.94
Candelaria	4.6	4.52
San Isidro	3.9	3.90
El capulín	3.5	3.20
El porvenir	2.3	2.00
El salto	2.0	2.00
Cerro vivo	1.5	1.20
Chichaic	0.6	0.46
San jerónimo	0.3	0.20
El recreo	26.0	25.51
<b>Termoeléctricas</b>	<b>1378.2</b>	<b>1,235.32</b>
<b>Turbinas de vapor</b>	<b>140.5</b>	<b>132.86</b>
<b>Turbinas de gas</b>	<b>215.9</b>	<b>144.17</b>
<b>Motores de combustión interna</b>	<b>671.4</b>	<b>646.16</b>
<b>Ingenios azucareros</b>	<b>306.5</b>	<b>276.10</b>
<b>Geotérmica</b>	<b>44.0</b>	<b>36.02</b>

Fuente: Datos disponibles en <http://www.amm.org.gt/>

Figura 39. **Abastecimiento de energía térmico vs. hidroeléctrico**



Fuente: **Datos obtenidos Post Despacho, AMM 15 de octubre 2008**

Se observa, según los datos previstos, que existe necesidad de obtener mayor eficiencia en el aprovechamiento hídrico en Guatemala, de esta manera se lograría que el Mercado Eléctrico tenga una reducción en sus costo y además se recibiría el beneficio de disminución de contaminación del Ambiente; para ello es necesario realizar un análisis detallado de los ríos para identificar la oportunidad de desarrollar centrales hidroeléctricas en sus cuencas o la instalación de presas en cascada.

### 3.4 Simulación del comportamiento

Después de un análisis profundo del comportamiento y de la linealidad del sistema de presas en cascadas integrados en la cuenca Samalá, se puede realizar una predicción más cercana en la operación de la potencia, específicamente la generada por Hidroeléctrica El Recreo, se tomó en cuenta que los comportamientos del caudal durante el año tienen cambios considerables, puntualmente en dos épocas marcadas por las estaciones de invierno y verano, por ello se crearán dos tipos de predicción denominadas predicciones estacionales. Las siguientes tablas muestran el comportamiento horario de cada central y de fondo el comportamiento horario del precio Spot, esto demostrará la tendencia de carga y de demanda para una semana de verano y para una semana de invierno.

### 3.4.1 Época de Verano (caudal evidentemente reducido)

La tendencia del caudal en época de verano es reducida considerablemente, el comportamiento es el siguiente.

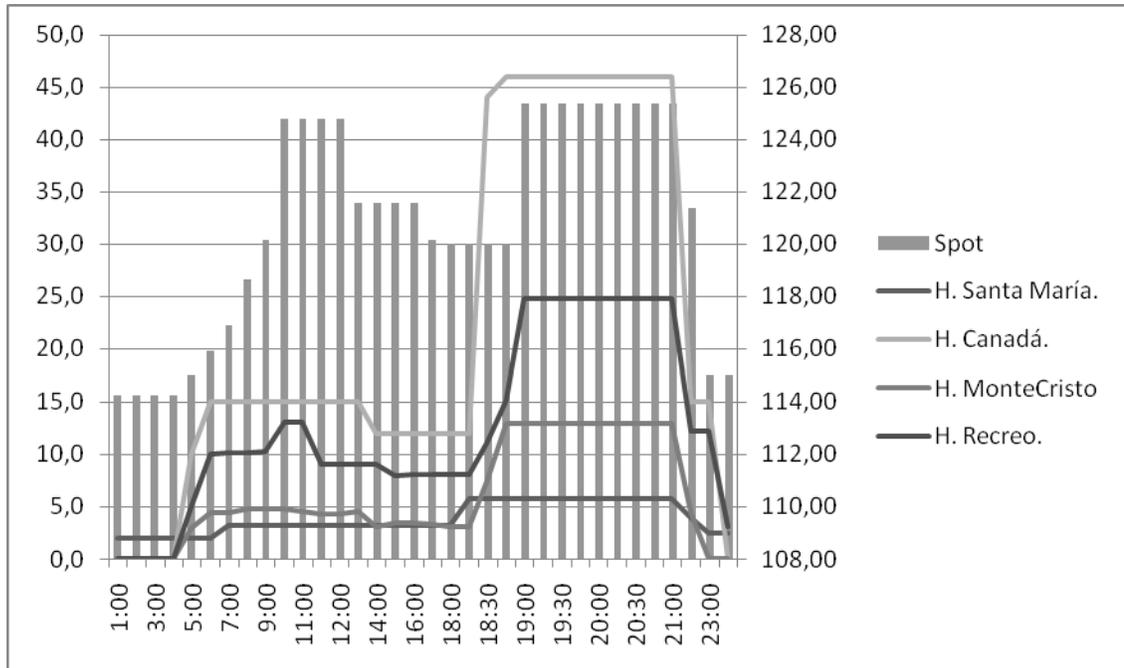
Tabla XII. Comparación de nivel de generación para el día 7 de marzo de 2008

Horas	H. Santa María.	H. Canadá.	H. Monte Cristo	H. Recreo.	Spot
1:00	2,0	0,0	0,0	0,0	114,26
2:00	2,0	0,0	0,0	0,0	114,26
3:00	2,0	0,0	0,0	0,0	114,26
4:00	2,0	0,0	0,0	0,0	114,26
5:00	2,0	10,0	3,0	5,0	115,02
6:00	2,0	15,0	4,4	10,0	115,92
7:00	3,2	15,0	4,4	10,1	116,86
8:00	3,2	15,0	4,8	10,1	118,66
9:00	3,2	15,0	4,8	10,3	120,16
10:00	3,2	15,0	4,8	13,1	124,78
11:00	3,2	15,0	4,5	13,1	124,78
11:30	3,2	15,0	4,3	9,1	124,78
12:00	3,2	15,0	4,3	9,1	124,78
13:00	3,2	15,0	4,5	9,1	121,54
14:00	3,2	12,0	3,1	9,1	121,54
15:00	3,2	12,0	3,4	8,0	121,54
16:00	3,2	12,0	3,4	8,1	121,54
17:00	3,2	12,0	3,3	8,1	120,16
18:00	3,2	12,0	3,1	8,1	119,99
18:15	5,8	12,0	3,1	8,1	119,99
18:30	5,8	44,0	7,5	11,1	119,99
18:45	5,8	46,0	13,0	15,1	119,99
19:00	5,8	46,0	13,0	24,8	125,34
19:15	5,8	46,0	13,0	24,8	125,34
19:30	5,8	46,0	13,0	24,8	125,34
19:45	5,8	46,0	13,0	24,8	125,34
20:00	5,8	46,0	13,0	24,8	125,34
20:15	5,8	46,0	13,0	24,8	125,34
20:30	5,8	46,0	13,0	24,8	125,34
20:45	5,8	46,0	13,0	24,8	125,34
21:00	5,8	46,0	13,0	24,8	125,34
22:00	4	15,0	4,4	12,2	121,36
23:00	2,5	15,0	0,0	12,2	115,02
24:00.	2,5	0,0	0,0	3,1	115,02

Fuente: Datos obtenidos Post Despacho,

[http://www.amm.org.gt/pdfs/2008/posdespacho/mar/INFP20080307\\_10.pdf](http://www.amm.org.gt/pdfs/2008/posdespacho/mar/INFP20080307_10.pdf)

Figura 40. Comparación de niveles de cargas, para el día 7 de marzo del 2008.



Fuente: Datos obtenidos Post Despacho

El gráfico anterior, perteneciente a la tabla 11, muestra una alta eficiencia en el despacho de potencia en las tres centrales, siguiendo muy de cerca el alza del precio Spot de la energía, el modelo a desarrollar tendrá una tendencia muy acorde a este día de generación en la cuenca Samalá.

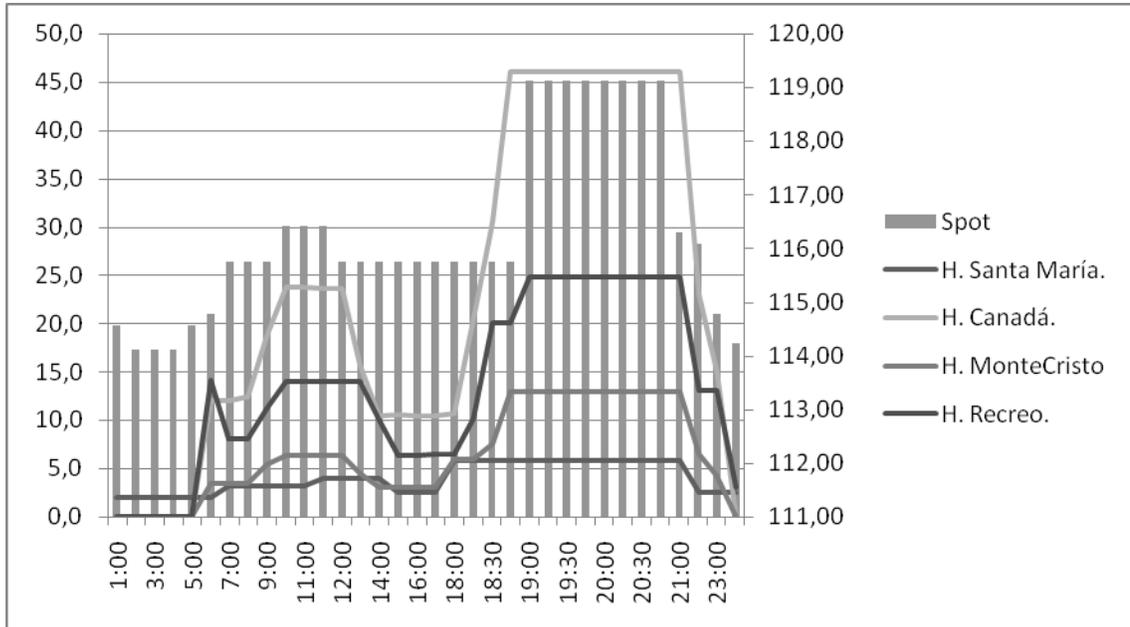
Tabla XIII. Comparación de nivel de generación para el día 8 de marzo de 2008

Horas	H. Santa María.	H. Canadá.	H. Monte Cristo	H. Recreo.	Spot
1:00	2,0	0,0	0,0	0,0	114,56
2:00	2,0	0,0	0,0	0,0	114,11
3:00	2,0	0,0	0,0	0,0	114,11
4:00	2,0	0,0	0,0	0,0	114,11
5:00	2,0	0,0	0,0	0,0	114,56
6:00	2,0	12,0	3,4	14,1	114,78
7:00	3,2	12,0	3,4	8,1	115,75
8:00	3,2	12,4	3,4	8,1	115,75
9:00	3,2	18,7	5,4	11,2	115,75
10:00	3,2	23,7	6,4	14,0	116,40
11:00	3,2	23,7	6,4	14,0	116,40
11:30	4,0	23,6	6,4	14,0	116,40
12:00	4,0	23,6	6,4	14,0	115,75
13:00	4,0	15,7	4,5	14,0	115,75
14:00	4,0	10,4	3,0	10,0	115,75
15:00	2,5	10,5	3,0	6,3	115,75
16:00	2,5	10,4	3,0	6,3	115,75
17:00	2,5	10,4	3,0	6,4	115,75
18:00	5,8	10,7	6,0	6,4	115,75
18:15	5,8	20,4	6,0	10,1	115,75
18:30	5,8	30,5	7,6	20,1	115,75
18:45	5,8	46,0	13,0	20,1	115,75
19:00	5,8	46,0	13,0	24,8	119,13
19:15	5,8	46,0	13,0	24,8	119,13
19:30	5,8	46,0	13,0	24,8	119,13
19:45	5,8	46,0	13,0	24,8	119,13
20:00	5,8	46,0	13,0	24,8	119,13
20:15	5,8	46,0	13,0	24,8	119,13
20:30	5,8	46,0	13,0	24,8	119,13
20:45	5,8	46,0	13,0	24,8	119,13
21:00	5,8	46,0	13,0	24,8	116,30
22:00	2,5	23,0	6,5	13,1	116,09
23:00	2,5	15,0	4,2	13,1	114,78
24:00.	2,5	0,0	0,0	3,1	114,23

Fuente: Datos obtenidos Post Despacho,

[http://www.amm.org.gt/pdfs/2008/posdespacho/mar/INFP20080307\\_10.pdf](http://www.amm.org.gt/pdfs/2008/posdespacho/mar/INFP20080307_10.pdf)

Figura 41. Comparación de niveles de cargas, para el día 8 de marzo del 2008.



Fuente: Datos obtenidos Post Despacho

Este despacho está dentro de los márgenes aceptables, ya que también sigue de cerca el alza, solo en la central El Recreo, se observa un pico anormal a la tendencia de las demás centrales, el desarrollo del modelo disminuirá este tipo de pico en la generación y la hará más estable.

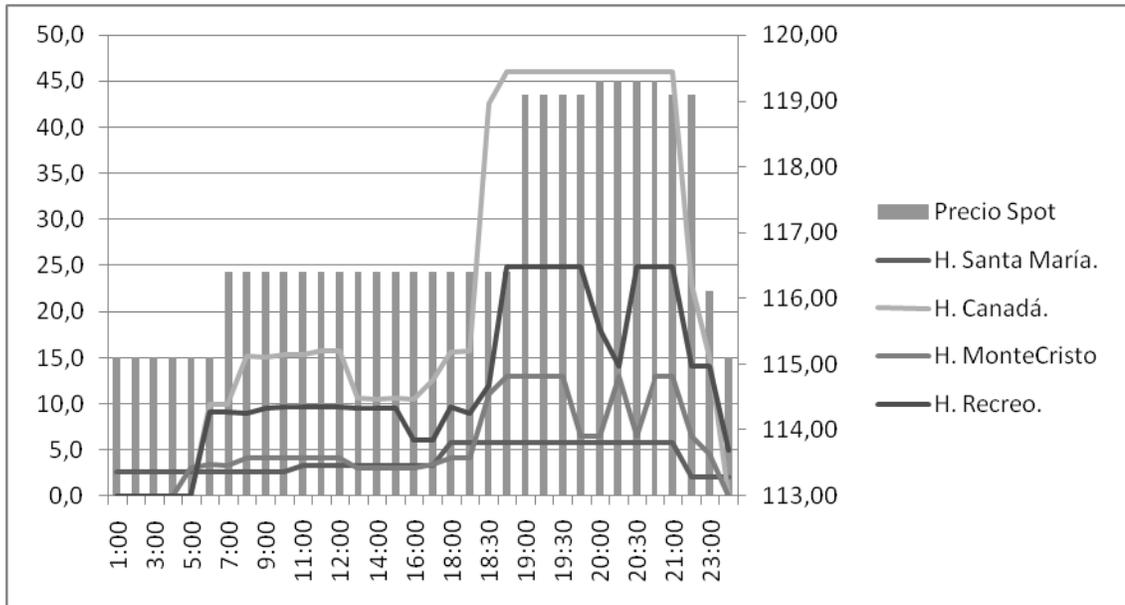
Tabla XIV. Comparación de nivel de generación para el día 9 de marzo de 2008

Horas	H. Santa María.	H. Canadá.	H. Monte Cristo	H. Recreo.	Precio Spot
1:00	2,5	0,0	0,0	0,0	115,10
2:00	2,5	0,0	0,0	0,0	115,10
3:00	2,5	0,0	0,0	0,0	115,10
4:00	2,5	0,0	0,0	0,0	115,10
5:00	2,5	0,0	3,0	0,0	115,10
6:00	2,5	10,0	3,4	9,1	115,10
7:00	2,5	10,0	3,3	9,1	116,41
8:00	2,5	15,2	4,2	9,0	116,41
9:00	2,5	15,1	4,2	9,5	116,41
10:00	2,5	15,3	4,2	9,6	116,41
11:00	3,2	15,4	4,2	9,6	116,41
11:30	3,2	15,7	4,2	9,6	116,41
12:00	3,2	15,7	4,2	9,6	116,41
13:00	3,2	10,6	3,0	9,5	116,41
14:00	3,2	10,5	3,0	9,5	116,41
15:00	3,2	10,6	3,0	9,5	116,41
16:00	3,2	10,5	3,0	6,0	116,41
17:00	3,2	12,6	3,4	6,1	116,41
18:00	5,8	15,6	4,2	9,6	116,41
18:15	5,8	15,7	4,2	9,0	116,41
18:30	5,8	42,6	11,0	12,0	116,41
18:45	5,8	46,0	13,0	24,8	116,41
19:00	5,8	46,0	13,0	24,8	119,10
19:15	5,8	46,0	13,0	24,8	119,10
19:30	5,8	46,0	13,0	24,8	119,10
19:45	5,8	46,0	6,5	24,8	119,10
20:00	5,8	46,0	6,5	18,0	119,31
20:15	5,8	46,0	13,0	14,0	119,31
20:30	5,8	46,0	6,5	24,8	119,31
20:45	5,8	46,0	13,0	24,8	119,31
21:00	5,8	46,0	13,0	24,8	119,10
22:00	2,0	23,0	6,5	14,0	119,10
23:00	2,0	15,0	4,5	14,0	116,12
24:00.	2,0	0,0	0,0	5,0	115,10

Fuente: Datos obtenidos Post Despacho,

[http://www.amm.org.gt/pdfs/2008/posdespacho/mar/INFP20080307\\_10.pdf](http://www.amm.org.gt/pdfs/2008/posdespacho/mar/INFP20080307_10.pdf)

Figura 42. Comparación de niveles de cargas, para el día 9 de marzo del 2008.



Fuente: Datos obtenidos Post Despacho

En la generación de este día se observa una tendencia muy inestable, y demuestra la dependencia de las centrales en el área baja de la cuenca, con relación a la central Canadá; se observa que la central El Recreo tuvo una recuperación de nivel a la hora de máxima alza en el precio Spot.

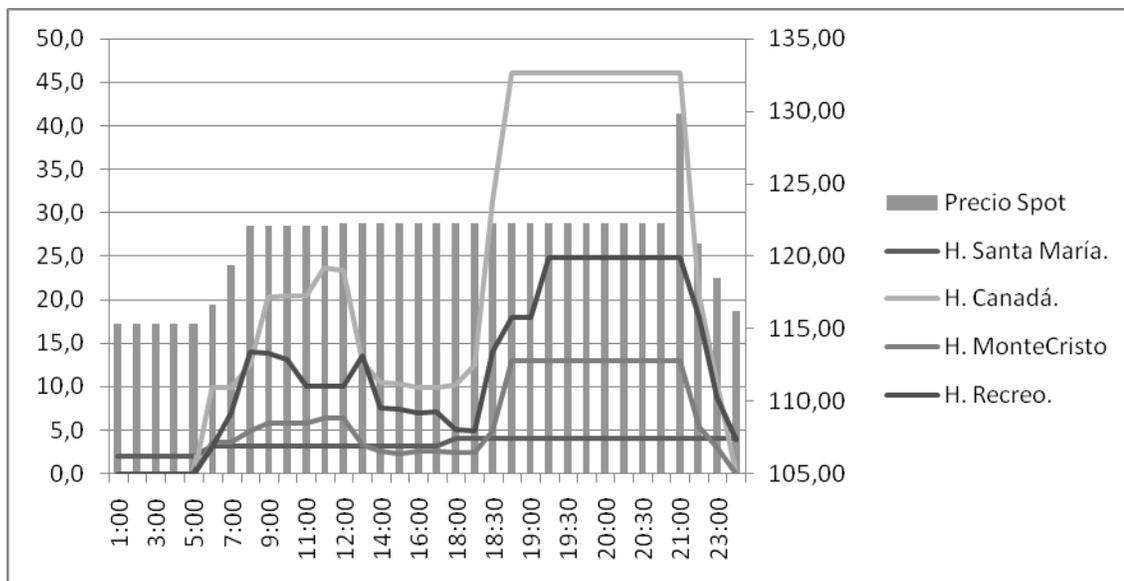
Tabla XV. Comparación de nivel de generación para el día 10 de marzo de 2008

Horas	H. Santa María.	H. Canadá.	H. Monte Cristo	H. Recreo.	Precio Spot
1:00	2,0	0,0	0,0	0,0	115,32
2:00	2,0	0,0	0,0	0,0	115,32
3:00	2,0	0,0	0,0	0,0	115,32
4:00	2,0	0,0	0,0	0,0	115,32
5:00	2,0	0,0	0,0	0,0	115,32
6:00	3,2	10,0	3,6	3,0	116,65
7:00	3,2	10,0	3,7	7,0	119,36
8:00	3,2	12,6	5,0	14,0	122,08
9:00	3,2	20,3	5,8	13,9	122,08
10:00	3,2	20,5	5,8	13,1	122,08
11:00	3,2	20,5	5,9	10,1	122,08
11:30	3,2	23,6	6,5	10,1	122,08
12:00	3,2	23,4	6,5	10,1	122,26
13:00	3,2	12,8	3,3	13,6	122,26
14:00	3,2	10,5	2,6	7,6	122,26
15:00	3,2	10,4	2,4	7,5	122,26
16:00	3,2	10,0	2,6	7,0	122,26
17:00	3,2	10,0	2,6	7,2	122,26
18:00	4,0	10,2	2,5	5,1	122,26
18:15	4,0	12,6	2,5	5,0	122,26
18:30	4,0	31,4	5,0	14,0	122,26
18:45	4,0	46,0	13,0	18,0	122,26
19:00	4,0	46,0	13,0	18,0	122,26
19:15	4,0	46,0	13,0	24,8	122,26
19:30	4,0	46,0	13,0	24,8	122,26
19:45	4,0	46,0	13,0	24,8	122,26
20:00	4,0	46,0	13,0	24,8	122,26
20:15	4,0	46,0	13,0	24,8	122,26
20:30	4,0	46,0	13,0	24,8	122,26
20:45	4,0	46,0	13,0	24,8	122,26
21:00	4,0	46,0	13,0	24,8	129,86
22:00	4,0	20,4	5,4	18,0	120,92
23:00	4,0	10,3	3,0	8,7	118,54
24:00.	4,0	0,0	0,0	4,0	116,24

Fuente: Datos obtenidos Post Despacho,

[http://www.amm.org.gt/pdfs/2008/posdespacho/mar/INFP20080307\\_10.pdf](http://www.amm.org.gt/pdfs/2008/posdespacho/mar/INFP20080307_10.pdf)

Figura 43. Comparación de niveles de cargas, para el día 10 de marzo del 2008.



Fuente: Datos obtenidos Post Despacho

La generación en este día tiene un comportamiento extraño para ser un lunes, demuestra la estabilidad en el precio Spot cotizado, esto permite comprobar lo riguroso en el contrato para la Central Canadá, que por lo que se puede ver, necesita completar su carga a la hora de máxima demanda, en este día es muy difícil aplanar la curva, el modelo evidenciará este comportamiento.

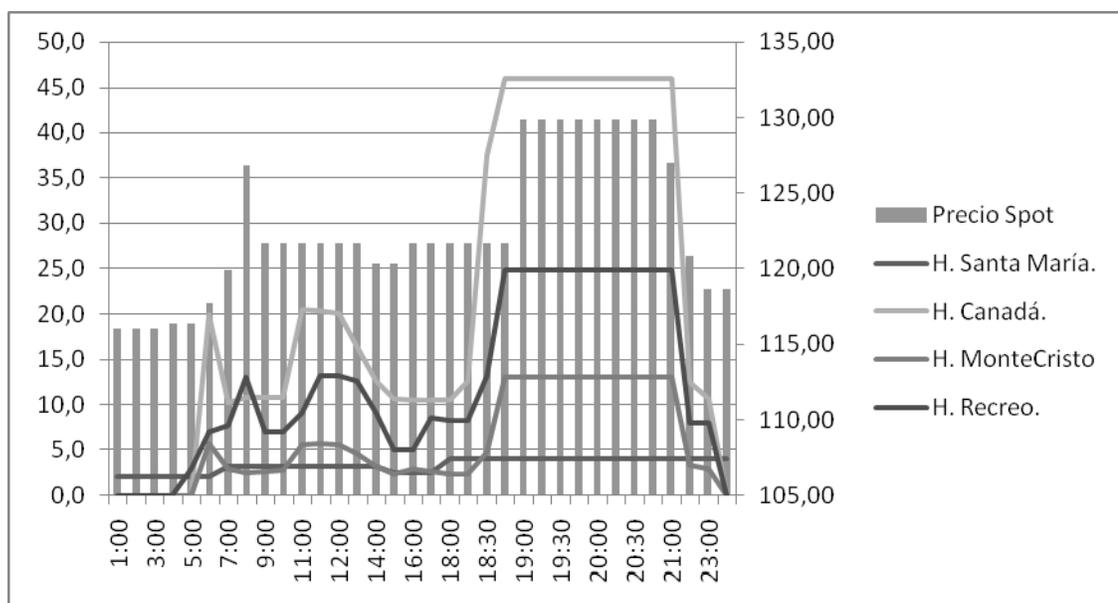
Tabla XVI. Comparación de nivel de generación para el día 11 de marzo de 2008

Horas	H. Santa María.	H. Canadá.	H. Monte Cristo	H. Recreo.	Precio Spot
1:00	2,0	0,0	0,0	0,0	116,01
2:00	2,0	0,0	0,0	0,0	116,01
3:00	2,0	0,0	0,0	0,0	116,01
4:00	2,0	0,0	0,0	0,0	116,38
5:00	2,0	0,0	0,0	3,0	116,38
6:00	2,0	20,0	5,7	7,0	117,75
7:00	3,2	10,3	3,0	7,7	119,89
8:00	3,2	10,8	2,5	13,1	126,81
9:00	3,2	10,9	2,7	7,0	121,71
10:00	3,2	10,8	2,8	7,0	121,71
11:00	3,2	20,5	5,6	9,1	121,71
11:30	3,2	20,4	5,7	13,2	121,71
12:00	3,2	20,1	5,6	13,2	121,71
13:00	3,2	16,4	4,6	12,6	121,71
14:00	3,2	12,6	3,2	9,1	120,35
15:00	2,5	10,7	2,4	5,0	120,35
16:00	2,5	10,6	2,9	5,1	121,71
17:00	2,5	10,5	2,7	8,6	121,71
18:00	4,0	10,5	2,4	8,2	121,71
18:15	4,0	12,6	2,4	8,2	121,71
18:30	4,0	37,6	4,7	13,2	121,71
18:45	4,0	46,0	13,0	24,8	121,71
19:00	4,0	46,0	13,0	24,8	129,86
19:15	4,0	46,0	13,0	24,8	129,86
19:30	4,0	46,0	13,0	24,8	129,86
19:45	4,0	46,0	13,0	24,8	129,86
20:00	4,0	46,0	13,0	24,8	129,86
20:15	4,0	46,0	13,0	24,8	129,86
20:30	4,0	46,0	13,0	24,8	129,86
20:45	4,0	46,0	13,0	24,8	129,86
21:00	4,0	46,0	13,0	24,8	127,01
22:00	4,0	12,5	3,4	8,0	120,87
23:00	4,0	10,7	3,0	8,0	118,68
24:00.	4,0	0,0	0,0	0,0	118,68

Fuente: Datos obtenidos Post Despacho,

[http://www.amm.org.gt/pdfs/2008/posdespacho/mar/INFP20080307\\_10.pdf](http://www.amm.org.gt/pdfs/2008/posdespacho/mar/INFP20080307_10.pdf)

Figura 44. Comparación de niveles de cargas, para el día 11 de marzo del 2008.



Fuente: Datos obtenidos Post Despacho

Este es un excelente día para poder demostrar la eficiencia del modelo como se aprecia, el comportamiento traza un alza en el costo Spot al iniciar la hora pico, aunque en este día se pudo aplanar la curva de 5:00 hasta las 16:00 hrs.

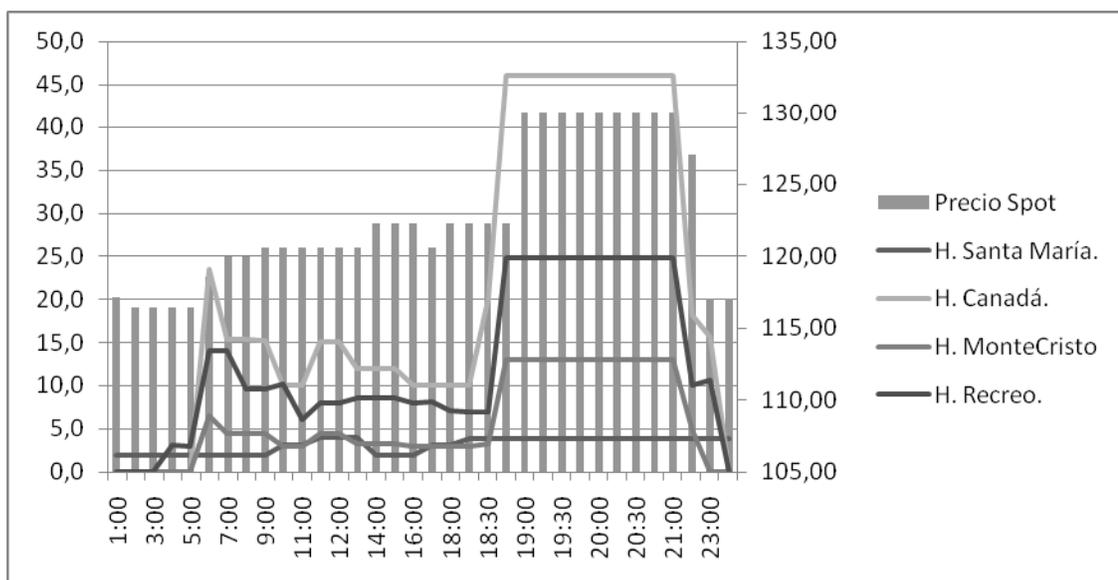
Tabla XVII. Comparación de nivel de generación para el día 12 de marzo de 2008

Horas	H. Santa María.	H. Canadá.	H. Monte Cristo	H. Recreo.	Precio Spot
1:00	2,0	0,0	0,0	0,0	117,15
2:00	2,0	0,0	0,0	0,0	116,38
3:00	2,0	0,0	0,0	0,0	116,38
4:00	2,0	0,0	0,0	3,1	116,38
5:00	2,0	0,0	0,0	3,0	116,38
6:00	2,0	23,5	6,5	14,0	118,57
7:00	2,0	15,4	4,5	14,0	119,96
8:00	2,0	15,4	4,5	9,6	119,96
9:00	2,0	15,2	4,5	9,6	120,56
10:00	3,2	10,0	2,9	10,2	120,56
11:00	3,2	10,0	2,9	6,0	120,56
11:30	4,0	15,0	4,5	8,0	120,56
12:00	4,0	15,0	4,5	8,0	120,56
13:00	4,0	12,0	3,3	8,6	120,56
14:00	2,0	12,0	3,3	8,6	122,23
15:00	2,0	12,0	3,3	8,6	122,23
16:00	2,0	10,0	2,9	8,0	122,23
17:00	3,2	10,0	2,9	8,1	120,56
18:00	3,2	10,0	2,9	7,1	122,23
18:15	3,9	10,0	2,9	7,0	122,23
18:30	3,9	20,0	3,3	7,0	122,23
18:45	3,9	46,0	13,0	24,8	122,23
19:00	3,9	46,0	13,0	24,8	129,95
19:15	3,9	46,0	13,0	24,8	129,95
19:30	3,9	46,0	13,0	24,8	129,95
19:45	3,9	46,0	13,0	24,8	129,95
20:00	3,9	46,0	13,0	24,8	129,95
20:15	3,9	46,0	13,0	24,8	129,95
20:30	3,9	46,0	13,0	24,8	129,95
20:45	3,9	46,0	13,0	24,8	129,95
21:00	3,9	46,0	13,0	24,8	129,95
22:00	3,9	18,2	4,9	10,1	127,06
23:00	3,9	15,6	0,0	10,7	117,03
24:00.	3,9	0,0	0,0	0,0	117,03

Fuente: Datos obtenidos Post Despacho,

[http://www.amm.org.gt/pdfs/2008/posdespacho/mar/INFP20080307\\_10.pdf](http://www.amm.org.gt/pdfs/2008/posdespacho/mar/INFP20080307_10.pdf)

Figura 45. Comparación de niveles de cargas, para el día 12 de marzo del 2008.



Fuente: **Datos obtenidos Post Despacho**

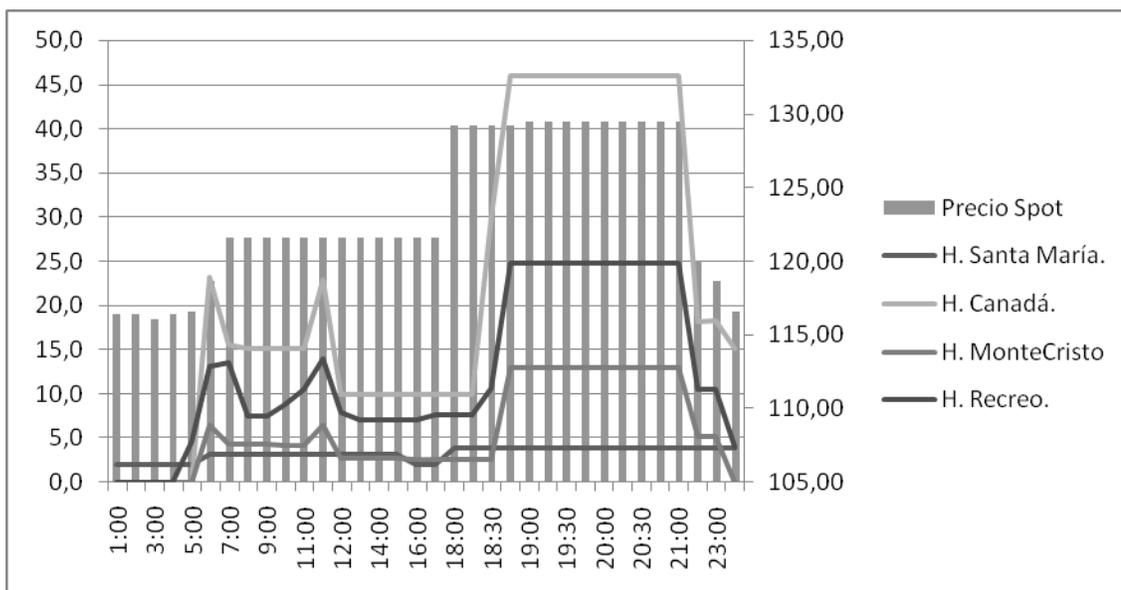
El gráfico anterior destaca otra gran ventaja en la programación del despacho y muestra la regularidad que posee el SNI, para los días entre semana que se hará el análisis posterior.

Tabla XVIII. Comparación de Nivel de Generación para el día 13 de marzo de 2008

Horas	H. Santa María.	H. Canadá.	H. Monte Cristo	H. Recreo.	Precio Spot
1:00	2,0	0,0	0,0	0,0	116,43
2:00	2,0	0,0	0,0	0,0	116,43
3:00	2,0	0,0	0,0	0,0	116,06
4:00	2,0	0,0	0,0	0,0	116,43
5:00	2,0	0,0	0,0	4,6	116,56
6:00	3,2	23,2	6,5	13,1	118,62
7:00	3,2	15,6	4,3	13,5	121,59
8:00	3,2	15,2	4,3	7,5	121,59
9:00	3,2	15,2	4,3	7,5	121,59
10:00	3,2	15,2	4,2	8,8	121,59
11:00	3,2	15,2	4,2	10,5	121,59
11:30	3,2	23,0	6,5	14,0	121,59
12:00	3,2	10,0	2,7	8,0	121,59
13:00	3,2	10,0	2,7	7,0	121,59
14:00	3,2	10,0	2,7	7,0	121,59
15:00	3,2	10,0	2,7	7,0	121,59
16:00	2,0	10,0	2,6	7,0	121,59
17:00	2,0	10,0	2,6	7,6	121,59
18:00	3,9	10,0	2,6	7,6	129,23
18:15	3,9	10,0	2,6	7,6	129,23
18:30	3,9	30,0	2,6	10,7	129,23
18:45	3,9	46,0	13,0	24,8	129,23
19:00	3,9	46,0	13,0	24,8	129,47
19:15	3,9	46,0	13,0	24,8	129,47
19:30	3,9	46,0	13,0	24,8	129,47
19:45	3,9	46,0	13,0	24,8	129,47
20:00	3,9	46,0	13,0	24,8	129,47
20:15	3,9	46,0	13,0	24,8	129,47
20:30	3,9	46,0	13,0	24,8	129,47
20:45	3,9	46,0	13,0	24,8	129,47
21:00	3,9	46,0	13,0	24,8	129,47
22:00	3,9	18,2	5,2	10,5	120,08
23:00	3,9	18,3	5,2	10,5	118,62
24:00.	3,9	15,2	0,0	4,0	116,56

Fuente: Datos obtenidos Post Despacho,  
[http://www.amm.org.gt/pdfs/2008/posdespacho/mar/INFP20080307\\_10.pdf](http://www.amm.org.gt/pdfs/2008/posdespacho/mar/INFP20080307_10.pdf)

Figura 46. Comparación de niveles de cargas, para el día 13 de marzo del 2008.



Fuente: **Datos Obtenidos Post Despacho**

En el gráfico anterior se afirma lo observado en el gráfico 14, en el que se observa la estabilidad del despacho para días de labores normales tal y como se da en este jueves, aquí se muestra dos picos inusuales que se trataran de erradicar y aplanar para mejorar la eficiencia, se observa también que las centrales incrementaron carga casi una hora después que el valor Spot, por lo que se refleja en poca venta de energía cuando el costo es alto.

### 3.4.2 Época de Invierno (Caudal Incrementado)

La tendencia del caudal en épocas invernales son incrementadas considerablemente, el comportamiento es el siguiente.

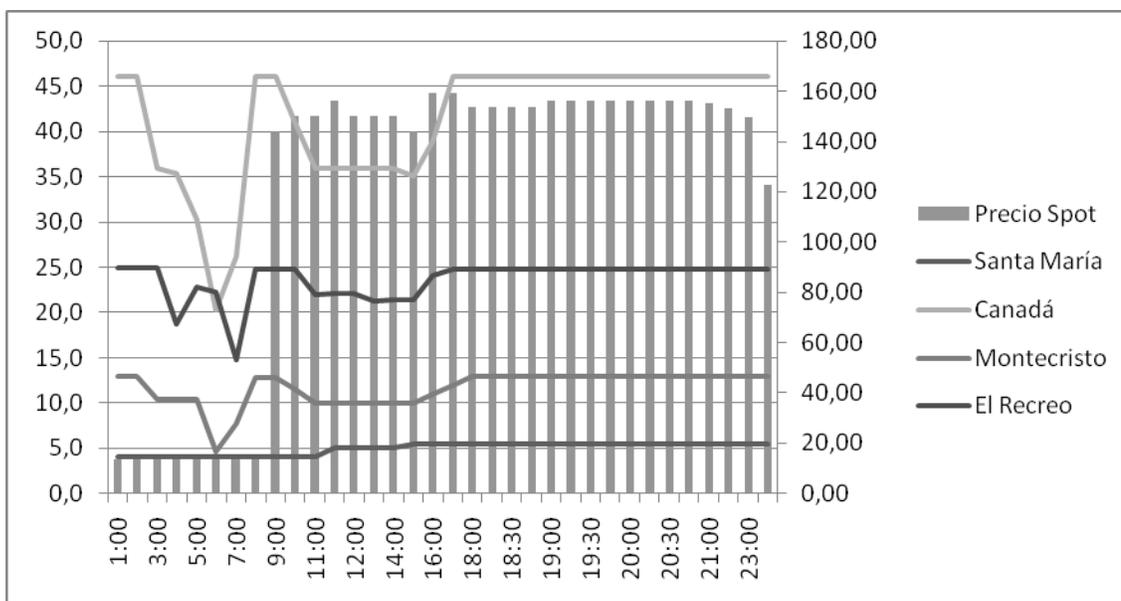
Tabla XIX. Comparación de nivel de generación para el día 21 de septiembre de 2008

Horas	Santa María	Canadá	Montecristo	El Recreo	Precio Spot
1:00	4,0	46,0	13,0	24,9	13,81
2:00	4,0	46,0	13,0	24,9	13,81
3:00	4,0	35,9	10,4	24,9	13,81
4:00	4,0	35,3	10,4	18,7	13,81
5:00	4,0	30,2	10,4	22,8	13,81
6:00	4,0	20,2	4,6	22,3	13,81
7:00	4,0	26,1	7,8	14,8	13,79
8:00	4,0	46,0	12,8	24,8	13,79
9:00	4,0	46,0	12,8	24,8	143,89
10:00	4,0	40,9	11,6	24,8	150,05
11:00	4,0	35,9	10,0	22,0	150,05
11:30	5,0	35,8	10,0	22,1	156,12
12:00	5,0	35,8	10,0	22,1	150,05
13:00	5,0	35,8	10,0	21,2	150,05
14:00	5,0	35,9	10,0	21,4	150,05
15:00	5,5	35,0	10,0	21,4	143,89
16:00	5,5	38,8	11,0	24,0	159,00
17:00	5,5	46,0	12,0	24,8	159,00
18:00	5,5	46,0	13,0	24,8	153,80
18:15	5,5	46,0	13,0	24,8	153,80
18:30	5,5	46,0	13,0	24,8	153,80
18:45	5,5	46,0	13,0	24,8	153,80
19:00	5,5	46,0	13,0	24,8	156,12
19:15	5,5	46,0	13,0	24,8	156,12
19:30	5,5	46,0	13,0	24,8	156,12
19:45	5,5	46,0	13,0	24,8	156,12
20:00	5,5	46,0	13,0	24,8	156,12
20:15	5,5	46,0	13,0	24,8	156,12
20:30	5,5	46,0	13,0	24,8	156,12
20:45	5,5	46,0	13,0	24,8	156,12
21:00	5,5	46,0	13,0	24,8	154,99
22:00	5,5	46,0	13,0	24,8	153,22
23:00	5,5	46,0	13,0	24,8	149,58
0:00	5,5	46,0	13,0	24,8	122,85

Fuente: Datos obtenidos Post Despacho,

[http://www.amm.org.gt/pdfs/2008/posdespacho/sep/INFP20080921\\_01.html](http://www.amm.org.gt/pdfs/2008/posdespacho/sep/INFP20080921_01.html)

Figura 47. Comparación de niveles de cargas, para el día 21 de septiembre del 2008.



Fuente: Datos obtenidos Post Despacho.

Este día muestra una generación típica para esta estación, el único problema es la regulación a la hora de 11:30 hasta las 15:00 hrs., se ve que a esta hora las centrales embalsaron, por lo que, a esta determinada hora en la que las centrales deben reducir en una menor cantidad para aumentar la eficiencia económica.

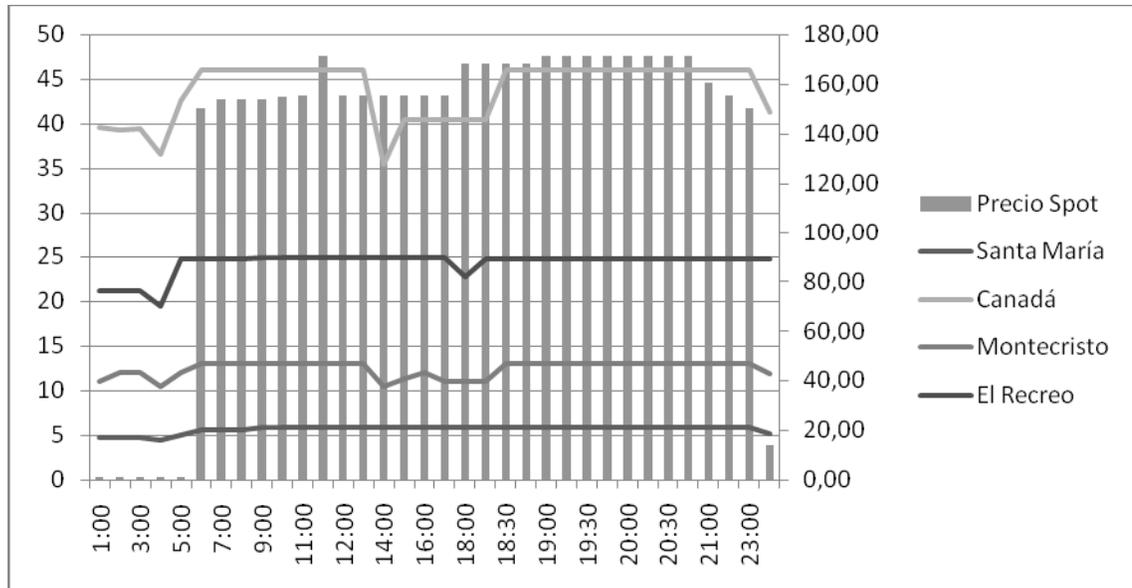
Tabla XX. Comparación de nivel de generación para el día 22 de septiembre de 2008

Horas	Santa María	Canadá	Montecristo	El Recreo	Precio Spot
1:00	4,7	39,5	11,0	21,1	0,95
2:00	4,7	39,2	12,0	21,1	0,95
3:00	4,7	39,4	12,0	21,2	0,95
4:00	4,4	36,6	10,5	19,4	0,95
5:00	4,9	42,5	12,0	24,8	0,95
6:00	5,5	46,0	13,0	24,8	149,93
7:00	5,5	46,0	13,0	24,8	153,90
8:00	5,5	46,0	13,0	24,8	153,90
9:00	5,8	46,0	13,0	24,9	153,90
10:00	5,8	46,0	13,0	24,9	154,62
11:00	5,8	46,0	13,0	24,9	155,23
11:30	5,8	46,0	13,0	24,9	171,13
12:00	5,8	46,0	13,0	24,9	155,23
13:00	5,8	46,0	13,0	24,9	155,23
14:00	5,8	35,4	10,5	24,9	155,23
15:00	5,8	40,4	11,4	24,9	155,23
16:00	5,8	40,4	12,0	24,9	155,23
17:00	5,8	40,4	11,0	24,9	155,23
18:00	5,8	40,4	11,0	22,8	168,24
18:15	5,8	40,4	11,0	24,8	168,24
18:30	5,8	46,0	13,0	24,8	168,24
18:45	5,8	46,0	13,0	24,8	168,24
19:00	5,8	46,0	13,0	24,8	171,13
19:15	5,8	46,0	13,0	24,8	171,13
19:30	5,8	46,0	13,0	24,8	171,13
19:45	5,8	46,0	13,0	24,8	171,13
20:00	5,8	46,0	13,0	24,8	171,13
20:15	5,8	46,0	13,0	24,8	171,13
20:30	5,8	46,0	13,0	24,8	171,13
20:45	5,8	46,0	13,0	24,8	171,13
21:00	5,8	46,0	13,0	24,8	160,35
22:00	5,8	46,0	13,0	24,8	155,54
23:00	5,8	46,0	13,0	24,8	149,93
0:00	5,1	41,3	11,9	24,8	13,66

Fuente: Datos Obtenidos Post Despacho,

[http://www.amm.org.gt/pdfs/2008/posdespacho/sep/INFP20080921\\_01.html](http://www.amm.org.gt/pdfs/2008/posdespacho/sep/INFP20080921_01.html)

Figura 48. Comparación de niveles de cargas, para el día 22 de septiembre del 2008.



Fuente: Datos obtenidos Post despacho.

Esta tendencia es típica de un caudal abundante, las centrales entregan una máxima carga en casi todo el día, se observan algunas deficiencias, por ejemplo un embalse en la hora de máxima alza en el precio Spot.

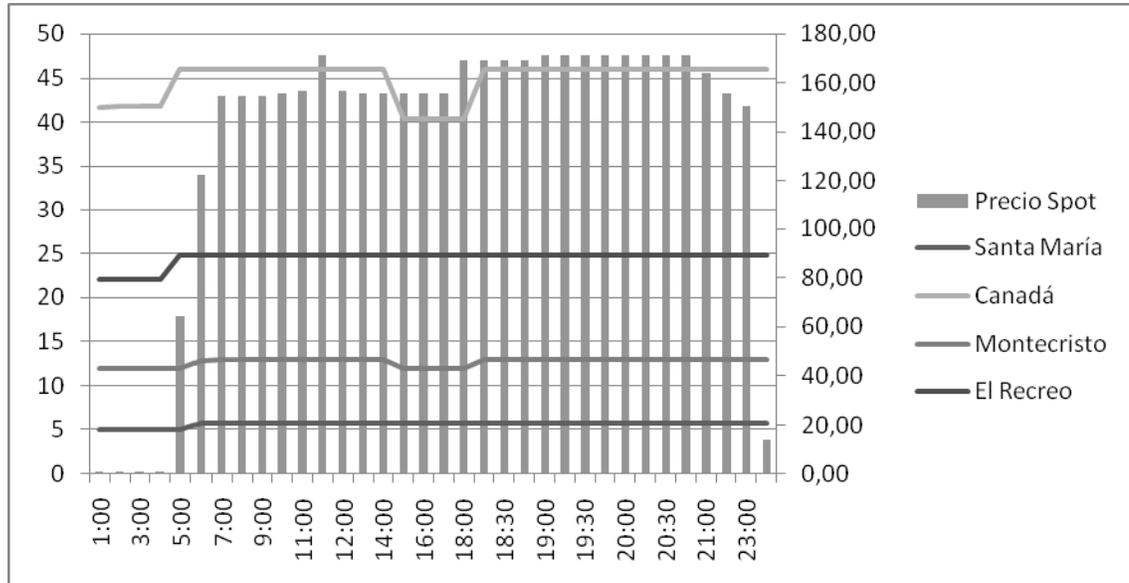
Tabla XXI. Comparación de nivel de generación para el día 23 de septiembre de 2008

Horas	Santa María	Canadá	Montecristo	El Recreo	Precio Spot
1:00	5,1	41,7	12,0	22,0	0,96
2:00	5,1	41,9	12,0	22,0	0,96
3:00	5,1	41,8	12,0	22,0	0,96
4:00	5,1	41,8	12,0	22,0	0,96
5:00	5,1	46,0	12,0	24,8	64,08
6:00	5,8	46,0	12,8	24,8	122,65
7:00	5,8	46,0	13,0	24,8	154,40
8:00	5,8	46,0	13,0	24,8	154,40
9:00	5,8	46,0	13,0	24,8	154,40
10:00	5,8	46,0	13,0	24,8	155,51
11:00	5,8	46,0	13,0	24,8	156,75
11:30	5,8	46,0	13,0	24,8	170,92
12:00	5,8	46,0	13,0	24,8	156,75
13:00	5,8	46,0	13,0	24,8	155,51
14:00	5,8	46,0	13,0	24,8	155,51
15:00	5,8	40,4	12,0	24,8	155,51
16:00	5,8	40,4	12,0	24,8	155,51
17:00	5,8	40,4	12,0	24,8	155,51
18:00	5,8	40,4	12,0	24,8	169,16
18:15	5,8	46,0	13,0	24,8	169,16
18:30	5,8	46,0	13,0	24,8	169,16
18:45	5,8	46,0	13,0	24,8	169,16
19:00	5,8	46,0	13,0	24,8	170,92
19:15	5,8	46,0	13,0	24,8	170,92
19:30	5,8	46,0	13,0	24,8	170,92
19:45	5,8	46,0	13,0	24,8	170,92
20:00	5,8	46,0	13,0	24,8	170,92
20:15	5,8	46,0	13,0	24,8	170,92
20:30	5,8	46,0	13,0	24,8	170,92
20:45	5,8	46,0	13,0	24,8	170,92
21:00	5,8	46,0	13,0	24,8	163,71
22:00	5,8	46,0	13,0	24,8	155,59
23:00	5,8	46,0	13,0	24,8	150,28
0:00	5,8	46,0	13,0	24,8	13,84

Fuente: Datos obtenidos Post Despacho,

[http://www.amm.org.gt/pdfs/2008/posdespacho/sep/INFP20080921\\_01.html](http://www.amm.org.gt/pdfs/2008/posdespacho/sep/INFP20080921_01.html)

Figura 49. Comparación de niveles de cargas, para el día 23 de septiembre del 2008.



Fuente: **Datos obtenidos Post Despacho.**

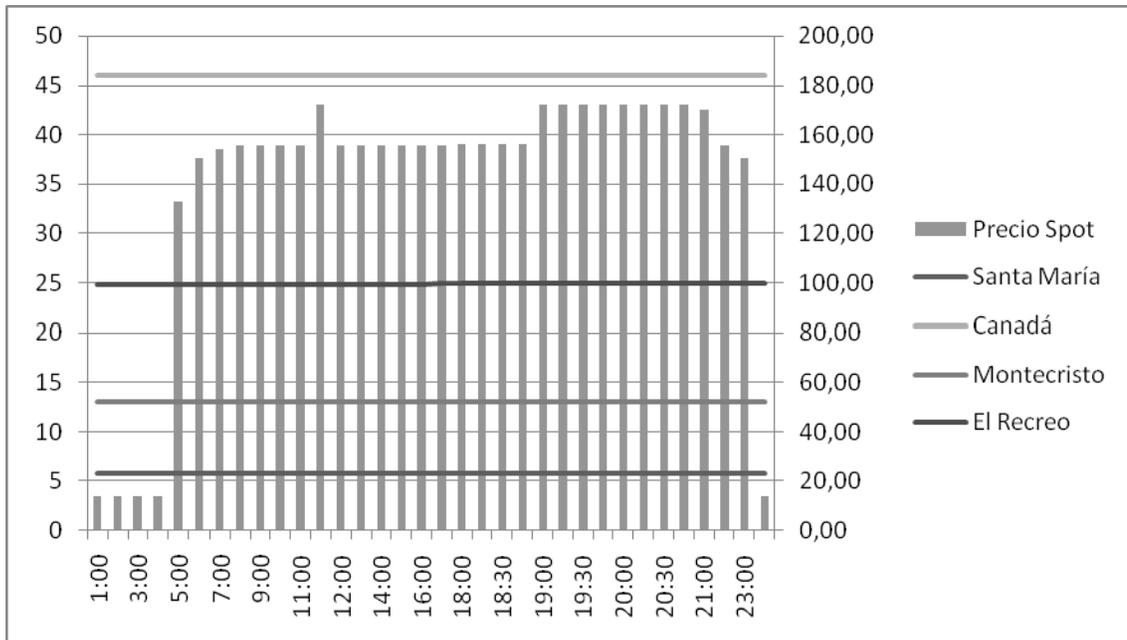
Se observa la misma tendencia para una temporada invernal bastante abundante, existe una carga bastante estable y se puede apreciar que Canadá tuvo que realizar un embalse junto con Montecristo de las 15:00 hasta las 18:00 hrs.; El Recreo, por su parte, se mantuvo a máxima carga, lo que muestra la existencia de un aumento en los caudales extra en el trayecto de la presa, suficiente como para mantener la carga constante durante todo el día; en este día el modelo puede no ser necesario porque el despacho parece ser eficiente.

Tabla XXII. Comparación de nivel de generación para el día 24 de septiembre de 2008

Horas	Santa María	Canadá	Montecristo	El Recreo	Precio Spot
1:00	5,8	46,0	13,0	24,8	13,85
2:00	5,8	46,0	13,0	24,8	13,85
3:00	5,8	46,0	13,0	24,8	13,85
4:00	5,8	46,0	13,0	24,8	13,85
5:00	5,8	46,0	13,0	24,8	132,84
6:00	5,8	46,0	13,0	24,8	150,21
7:00	5,8	46,0	13,0	24,8	154,19
8:00	5,8	46,0	13,0	24,8	155,31
9:00	5,8	46,0	13,0	24,8	155,31
10:00	5,8	46,0	13,0	24,8	155,31
11:00	5,8	46,0	13,0	24,8	155,31
11:30	5,8	46,0	13,0	24,8	172,08
12:00	5,8	46,0	13,0	24,8	155,31
13:00	5,8	46,0	13,0	24,8	155,31
14:00	5,8	46,0	13,0	24,8	155,31
15:00	5,8	46,0	13,0	24,8	155,31
16:00	5,8	46,0	13,0	24,8	155,31
17:00	5,8	46,0	13,0	24,9	155,31
18:00	5,8	46,0	13,0	24,9	155,96
18:15	5,8	46,0	13,0	24,9	155,96
18:30	5,8	46,0	13,0	24,9	155,96
18:45	5,8	46,0	13,0	24,9	155,96
19:00	5,8	46,0	13,0	24,9	172,08
19:15	5,8	46,0	13,0	24,9	172,08
19:30	5,8	46,0	13,0	24,9	172,08
19:45	5,8	46,0	13,0	24,9	172,08
20:00	5,8	46,0	13,0	24,9	172,08
20:15	5,8	46,0	13,0	24,9	172,08
20:30	5,8	46,0	13,0	24,9	172,08
20:45	5,8	46,0	13,0	24,9	172,08
21:00	5,8	46,0	13,0	24,9	169,88
22:00	5,8	46,0	13,0	24,9	155,36
23:00	5,8	46,0	13,0	24,9	150,21
0:00	5,8	46,0	13,0	24,9	13,85

Fuente: Datos obtenidos Post Despacho,  
[http://www.amm.org.gt/pdfs/2008/posdespacho/sep/INFP20080921\\_01.html](http://www.amm.org.gt/pdfs/2008/posdespacho/sep/INFP20080921_01.html)

Figura 50. Comparación de niveles de cargas, para el día 24 de septiembre del 2008.



Fuente: Datos obtenidos Post Despacho.

Día con un factor de planta al 100%, las centrales generando a carga máxima, con lo que el modelo puede no ser necesario porque las características del caudal son suficientes para mantener la potencia casi al mismo valor y no se debe embalsar agua.

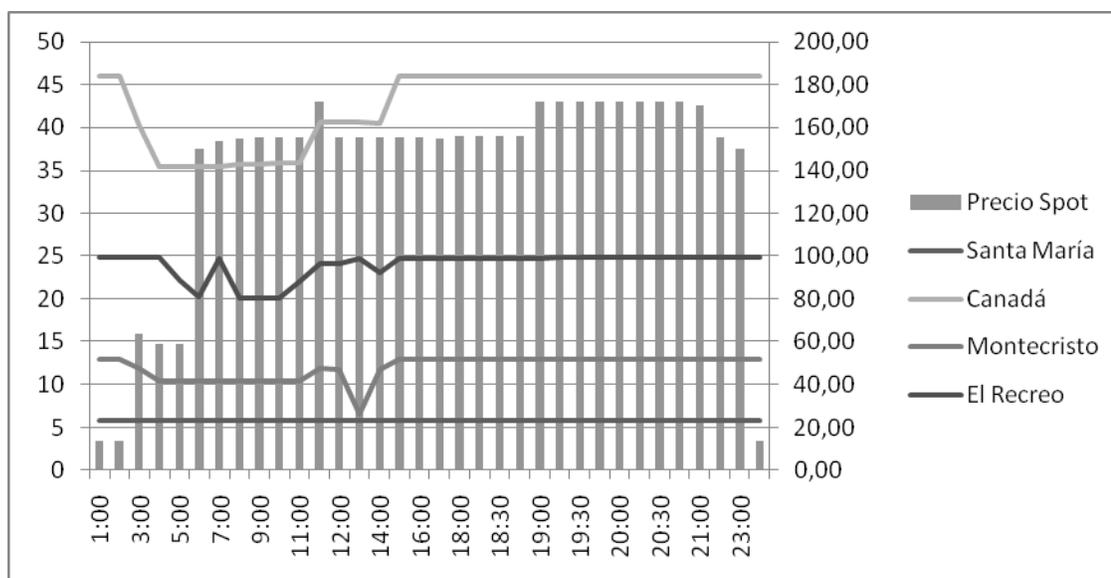
Tabla XXIII. Comparación de nivel de generación para el día 25 de septiembre de 2008

Horas	Santa María	Canadá	Montecristo	El Recreo	Precio Spot
1:00	5,8	46	13	24,9	13,83
2:00	5,8	46	13	24,9	13,83
3:00	5,8	40,4	12	24,9	63,92
4:00	5,8	35,4	10,5	24,9	58,89
5:00	5,8	35,4	10,5	22,2	58,89
6:00	5,8	35,4	10,5	20,2	149,90
7:00	5,8	35,4	10,5	24,8	153,85
8:00	5,8	35,7	10,5	20,1	154,52
9:00	5,8	35,7	10,5	20,1	155,15
10:00	5,8	35,8	10,5	20,1	155,15
11:00	5,8	35,9	10,5	22,1	155,15
11:30	5,8	40,7	12	24,1	172,14
12:00	5,8	40,7	11,8	24,1	155,15
13:00	5,8	40,6	6,6	24,8	155,15
14:00	5,8	40,5	11,8	23,1	155,15
15:00	5,8	46,0	13,0	24,8	155,15
16:00	5,8	46,0	13,0	24,8	155,15
17:00	5,8	46,0	13,0	24,8	154,52
18:00	5,8	46,0	13,0	24,8	155,75
18:15	5,8	46,0	13,0	24,8	155,75
18:30	5,8	46,0	13,0	24,8	155,75
18:45	5,8	46,0	13,0	24,8	155,75
19:00	5,8	46,0	13,0	24,8	172,14
19:15	5,8	46,0	13,0	24,9	172,14
19:30	5,8	46,0	13,0	24,9	172,14
19:45	5,8	46,0	13,0	24,9	172,14
20:00	5,8	46,0	13,0	24,9	172,14
20:15	5,8	46,0	13,0	24,9	172,14
20:30	5,8	46,0	13,0	24,9	172,14
20:45	5,8	46,0	13,0	24,9	172,14
21:00	5,8	46,0	13,0	24,9	170,34
22:00	5,8	46,0	13,0	24,9	155,42
23:00	5,8	46,0	13,0	24,9	149,90
0:00	5,8	46,0	13,0	24,9	13,83

Fuente: Datos obtenidos Post Despacho,

[http://www.amm.org.gt/pdfs/2008/posdespacho/sep/INFP20080921\\_01.html](http://www.amm.org.gt/pdfs/2008/posdespacho/sep/INFP20080921_01.html)

Figura 51. Comparación de niveles de cargas, para el día 25 de septiembre del 2008.



Fuente: Datos obtenidos Post Despacho

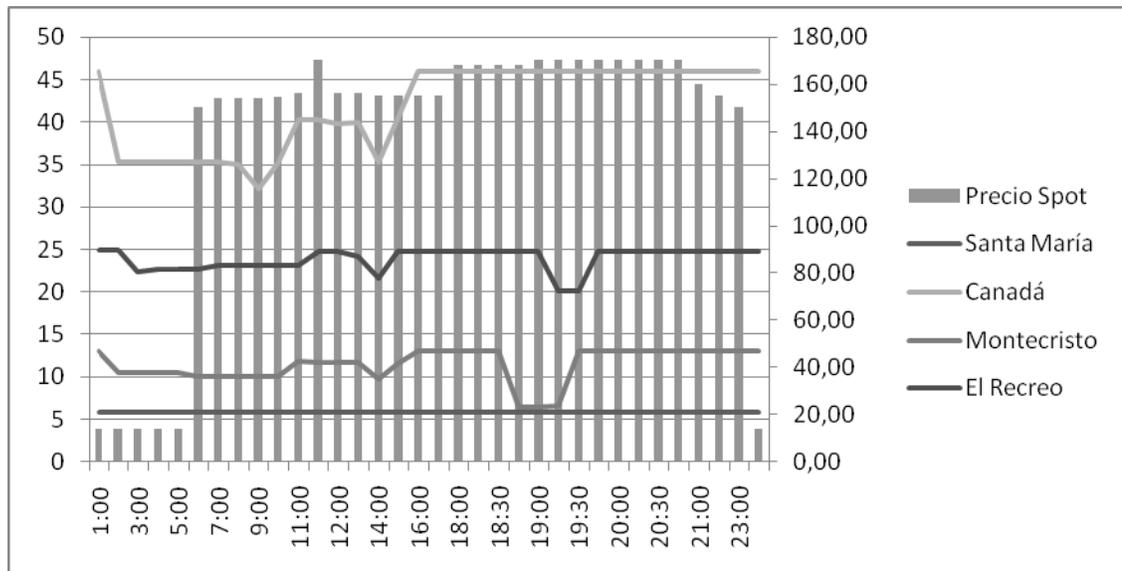
Este día es muy bueno para la aplicación del modelo porque existe una variación en el precio Spot y además el caudal no es tan abundante, se observa que de 3:00 hasta las 10:30 hrs. se registró una actividad de embalse reduciendo en gran porcentaje la generación, por lo que hace necesario de aplanar la gráfica para realizar una generación más constante.

Tabla XXIV. Comparación de nivel de generación para el día 26 de septiembre de 2008

Horas	Santa María	Canadá	Montecristo	El Recreo	Precio Spot
1:00	5,8	46,0	13,0	24,9	13,84
2:00	5,8	35,4	10,5	24,9	13,84
3:00	5,8	35,4	10,5	22,3	13,84
4:00	5,8	35,4	10,5	22,7	13,84
5:00	5,8	35,4	10,5	22,7	13,84
6:00	5,8	35,4	10,0	22,7	150,49
7:00	5,8	35,4	10,0	23,1	154,13
8:00	5,8	35,0	10,0	23,1	154,13
9:00	5,8	32,2	10,0	23,1	154,13
10:00	5,8	35,2	10,0	23,1	154,69
11:00	5,8	40,3	11,8	23,1	155,98
11:30	5,8	40,3	11,7	24,8	170,11
12:00	5,8	39,9	11,7	24,8	155,98
13:00	5,8	40,0	11,7	24,1	155,98
14:00	5,8	35,3	9,8	21,6	155,23
15:00	5,8	40,4	11,5	24,8	155,23
16:00	5,8	46,0	13,0	24,8	155,23
17:00	5,8	46,0	13,0	24,8	155,23
18:00	5,8	46,0	13,0	24,8	168,33
18:15	5,8	46,0	13,0	24,8	168,33
18:30	5,8	46,0	13,0	24,8	168,33
18:45	5,8	46,0	6,5	24,8	168,33
19:00	5,8	46,0	6,5	24,8	170,11
19:15	5,8	46,0	6,6	20,1	170,11
19:30	5,8	46,0	13,0	20,1	170,11
19:45	5,8	46,0	13,0	24,8	170,11
20:00	5,8	46,0	13,0	24,8	170,11
20:15	5,8	46,0	13,0	24,8	170,11
20:30	5,8	46,0	13,0	24,8	170,11
20:45	5,8	46,0	13,0	24,8	170,11
21:00	5,8	46,0	13,0	24,8	160,15
22:00	5,8	46,0	13,0	24,8	155,34
23:00	5,8	46,0	13,0	24,8	150,49
0:00	5,8	46,0	13,0	24,8	13,84

Fuente: Datos obtenidos Post Despacho,  
[http://www.amm.org.gt/pdfs/2008/posdespacho/sep/INFP20080921\\_01.html](http://www.amm.org.gt/pdfs/2008/posdespacho/sep/INFP20080921_01.html)

Figura 52. Comparación de niveles de cargas, para el día 26 de septiembre del 2008.



Fuente: **Datos obtenidos Post Despacho.**

Se observa varios puntos de embalse que no son factibles para un buen desempeño económico respecto al precio Spot, estas deficiencia se verán reducidas mediante la aproximación del modelo, en esta gráfica se muestra la dependencia entre Montecristo y el Recreo.

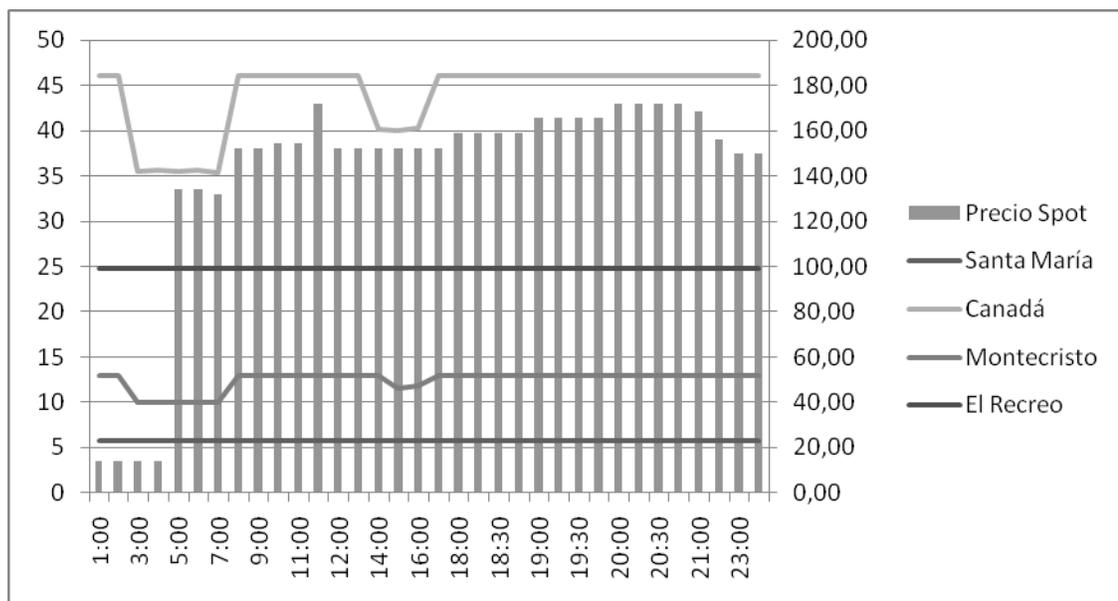
Tabla XXV. Comparación de nivel de generación para el día 27 de septiembre de 2008

Horas	Santa María	Canadá	Montecristo	El Recreo	Precio Spot
1:00	5,8	46,0	13,0	24,8	13,82
2:00	5,8	46,0	13,0	24,8	13,82
3:00	5,8	35,4	10,0	24,8	13,82
4:00	5,8	35,6	10,0	24,8	13,82
5:00	5,8	35,5	10,0	24,8	134,17
6:00	5,8	35,6	10,0	24,8	134,17
7:00	5,8	35,3	10,0	24,8	131,65
8:00	5,8	46,0	13,0	24,8	152,23
9:00	5,8	46,0	13,0	24,8	152,23
10:00	5,8	46,0	13,0	24,8	154,37
11:00	5,8	46,0	13,0	24,8	154,37
11:30	5,8	46,0	13,0	24,8	171,59
12:00	5,8	46,0	13,0	24,8	152,23
13:00	5,8	46,0	13,0	24,8	152,23
14:00	5,8	40,1	13,0	24,8	152,23
15:00	5,8	40,0	11,6	24,8	152,23
16:00	5,8	40,2	11,8	24,8	152,23
17:00	5,8	46,0	13,0	24,8	152,23
18:00	5,8	46,0	13,0	24,8	159,15
18:15	5,8	46,0	13,0	24,8	159,15
18:30	5,8	46,0	13,0	24,8	159,15
18:45	5,8	46,0	13,0	24,8	159,15
19:00	5,8	46,0	13,0	24,8	165,56
19:15	5,8	46,0	13,0	24,8	165,56
19:30	5,8	46,0	13,0	24,8	165,56
19:45	5,8	46,0	13,0	24,8	165,56
20:00	5,8	46,0	13,0	24,8	171,59
20:15	5,8	46,0	13,0	24,8	171,59
20:30	5,8	46,0	13,0	24,8	171,59
20:45	5,8	46,0	13,0	24,8	171,59
21:00	5,8	46,0	13,0	24,8	168,64
22:00	5,8	46,0	13,0	24,8	156,27
23:00	5,8	46,0	13,0	24,8	149,80
0:00	5,8	46,0	13,0	24,8	149,80

Fuente: Datos obtenidos Post Despacho,

[http://www.amm.org.gt/pdfs/2008/posdespacho/sep/INFP20080921\\_01.html](http://www.amm.org.gt/pdfs/2008/posdespacho/sep/INFP20080921_01.html)

Figura 53. Comparación de niveles de cargas, para el día 27 de septiembre del 2008.



Fuente: Datos obtenidos Post Despacho.

Se observa alguna dificultad en el despacho para dos de las tres centrales. La central con más dificultades es Canadá, que muestra dos reducciones en su potencia muy marcadas; Montecristo con reducciones en su potencia de menor magnitud y para el Recreo una operación constante en la que no aplica el modelo de aproximación.

### 3.5 Modelo aproximado del comportamiento actual entre las centrales Canadá, Montecristo y El Recreo

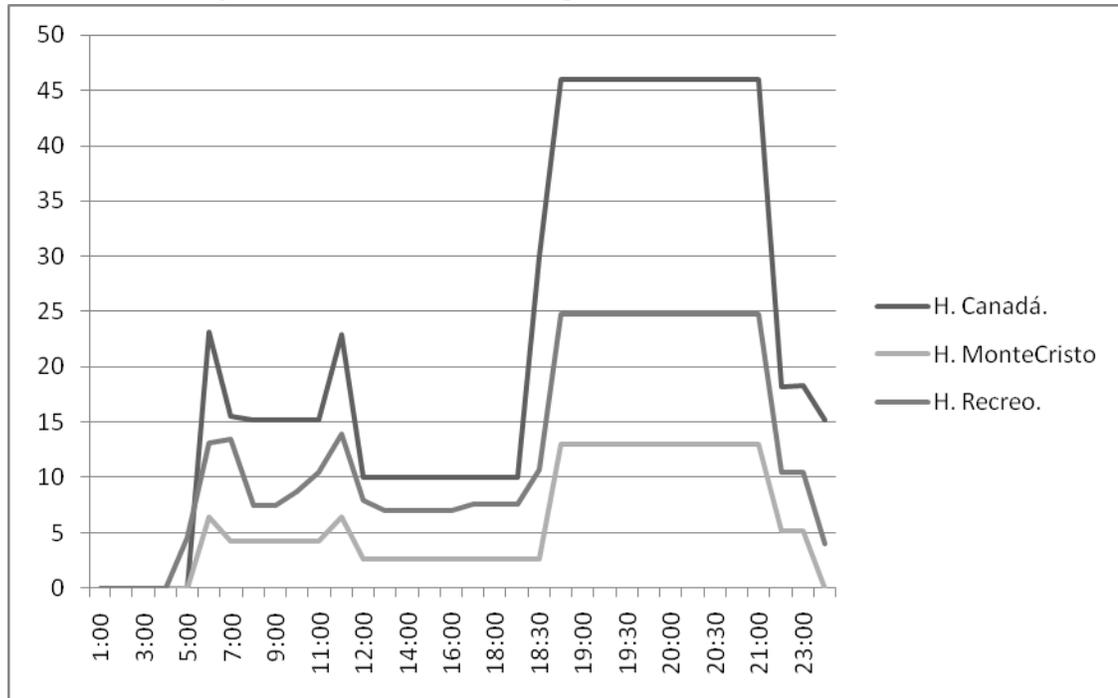
Para la realización de este modelo, tomaremos en cuenta el día 13 de marzo del 2008, como día típico de generación.

Tabla 26. Datos de la Generación horaria para el 13 de marzo del 2008

Horas	H. Canadá.	H. Monte Cristo	H. Recreo.
1:00	0	0	0
2:00	0	0	0
3:00	0	0	0
4:00	0	0	0
5:00	0	0	4,6
6:00	23,2	6,5	13,1
7:00	15,6	4,3	13,5
8:00	15,2	4,3	7,5
9:00	15,2	4,3	7,5
10:00	15,2	4,2	8,8
11:00	15,2	4,2	10,5
11:30	23	6,5	14
12:00	10	2,7	8
13:00	10	2,7	7
14:00	10	2,7	7
15:00	10	2,7	7
16:00	10	2,6	7
17:00	10	2,6	7,6
18:00	10	2,6	7,6
18:15	10	2,6	7,6
18:30	30	2,6	10,7
18:45	46	13	24,8
19:00	46	13	24,8
19:15	46	13	24,8
19:30	46	13	24,8
19:45	46	13	24,8
20:00	46	13	24,8
20:15	46	13	24,8
20:30	46	13	24,8
20:45	46	13	24,8
21:00	46	13	24,8
22:00	18,2	5,2	10,5
23:00	18,3	5,2	10,5
24:00.	15,2	0	4

Fuente: Datos obtenidos PostDespacho

Figura 54. Tendencias normales para el día 13 de marzo del 2008.



Fuente: Datos obtenidos Post Despacho.

Se ve claramente la dependencia de Hidroeléctrica el Recreo, respecto a la generación de Hidroeléctrica Canadá, por lo que con una simple regresión lineal se corrobora.

Entonces se tiene para la linealización que

$F(x)$  es igual a la carga en el Recreo

$X$  es igual a la carga en Canadá

Dado que la forma general de una regresión lineal es

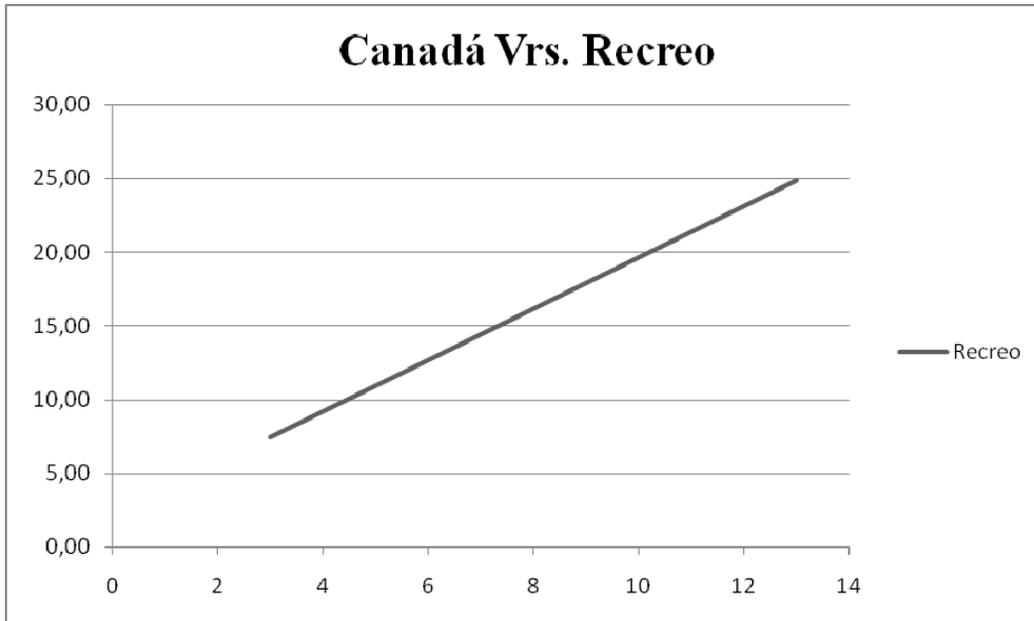
$$f(x) = m * x + b$$

Usando métodos electrónicos de cálculo el resultado es

$$f(x) = 0.50327 * x + 1.3947$$

Esta ecuación anterior muestra la dependencia del Recreo respecto a Canadá.

Figura 55. Linealidad en el comportamiento de Canadá y El Recreo



Fuente: Datos obtenidos Post Despacho

Como muestra la gráfica anterior, se corrobora la linealidad de la carga entre ambas Centrales a las cuales se hace referencia en el modelo de aproximación.

Para la regresión de la aproximación de la linealidad entre Montecristo y el Recreo.

Tenemos que

$F(x)$  es igual a la carga en el Recreo

$X$  es igual a la carga en Montecristo

Dado que la forma general de una regresión lineal es

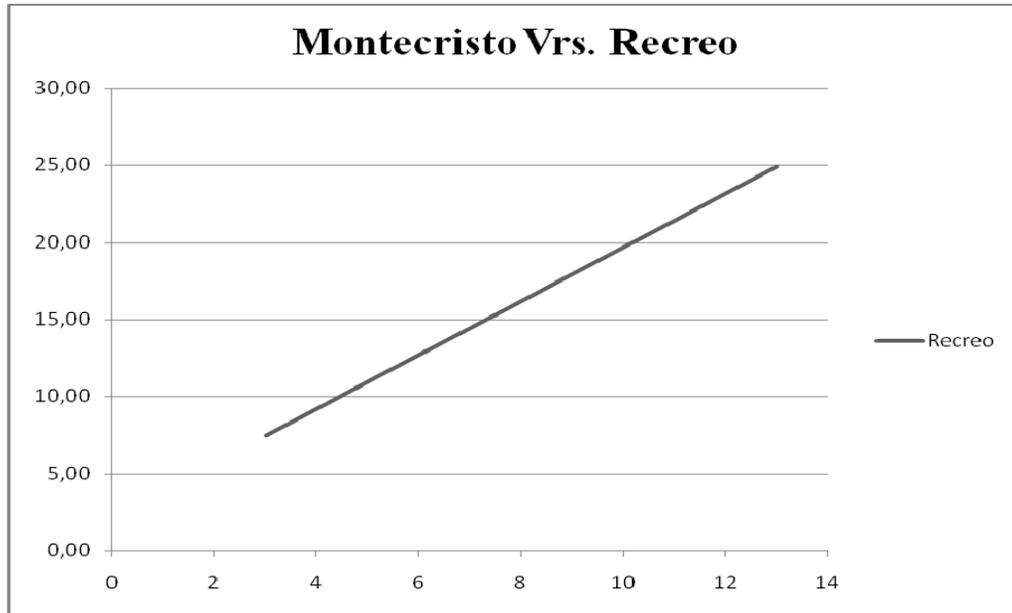
$$f(x) = m * x + b$$

Usando métodos electrónicos de cálculo el resultado es

$$f(x) = 1.7401 * x + 2.2524$$

La ecuación anterior muestra la dependencia del Recreo respecto a Montecristo.

Figura 56. Linealidad en el comportamiento entre Montecristo y El Recreo.



Fuente: Datos obtenidos Post Despacho.

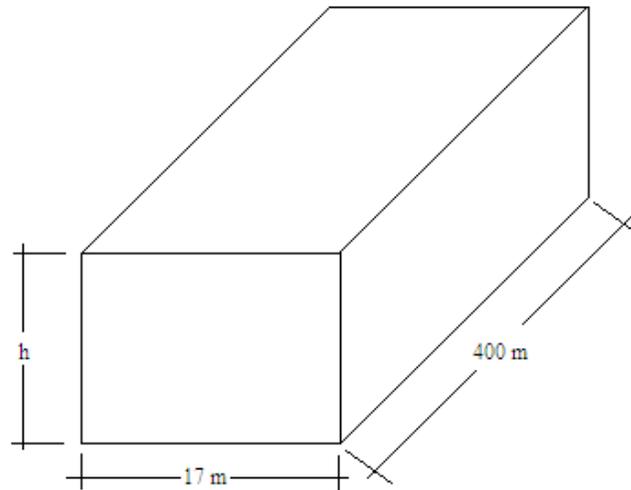
Como muestra la gráfica anterior, y se corrobora la linealidad de la carga entre ambas Centrales a las cuales se hace referencia en el modelo de aproximación.

### 3.5.1 Definición de volumen aproximado para la presa El Recreo

Para efectos solamente de estudio, se definirá el volumen útil como una forma geométrica simple, por ejemplo un rectángulo, que nos dará algunos errores de exactitud.

Un rectángulo semejando el lecho de la cuenca inundada sumado con un cilindro que asemejará la cámara de carga antes de la bocatoma.

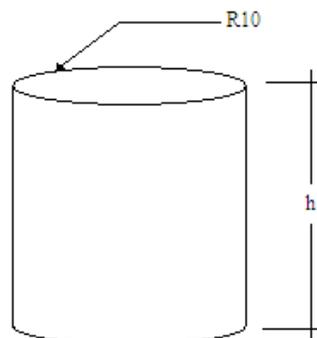
Figura 57. Muestra la aproximación volumétrica de la cuenca para la presa de El Recreo.



Fuente: Datos obtenidos Consultora Centroamericana S. A.

Un cilindro semejando la cámara de carga

Figura 58. Muestra la aproximación volumétrica de la cámara de carga de El Recreo.



Fuente: Datos obtenidos de Consultora Centroamericana S. A.

La suma de los dos volúmenes, dará como resultado una aproximación con algunos errores en la reducción de la altura, que por motivos de estudios será aceptable.

Volumen de Rectángulo Cúbico

$$V = A * B * L$$

Donde

V es volumen, m<sup>3</sup>

A es el ancho, m

B es la altura sustituida por h, m

L es el largo del lecho, m

Entonces sustituyendo

$$V_1 = 17 * h * 400$$

Volumen del Cilindro

$$V_2 = \pi r^2 * h$$

Donde

V es el volumen, m<sup>3</sup>

R es el radio de la cámara de carga, m

H es la altura, m

$$V_2 = \pi(10)^2 * h$$

Entonces el Volumen total de la presa El Recreo, para el estudio del comportamiento de presas en cascada es.

$$V = [(\pi(10)^2 + 6800)] * h$$

$$V = 7115 * h \quad (m^3)$$

$$V = 7115 * (903.32 - 900.20) = 23,000 \quad (m^3)$$

Definición del Factor de Planta de cada Central:

Este factor da como resultado el consumo de volumen de agua por segundo expresado en (m<sup>3</sup>/s) por cada unidad de MW generado, los datos obtenidos del apartado 1.5.3 de este trabajo.

Para la central Canadá

Potencia total de 46 MW

Caudal turbinado total 14.5 m<sup>3</sup>/s

Por lo que el factor de planta para Canadá es.

$$f. Planta = \frac{14.5 \text{ m}^3/\text{s}}{46 \text{ MW}} = 0.315 \left( \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) \text{ por MW generado}$$

Para la central Montecristo

Potencia total de 13 MW

Caudal turbinado total 14 m<sup>3</sup>/s

Por lo que el factor de planta para Montecristo es.

$$f. Planta = \frac{14 \text{ m}^3/\text{s}}{13 \text{ MW}} = 1.077 \left( \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) \text{ por MW generado}$$

Para la central El Recreo

Potencia Total de 24.8 MW

Caudal turbinado total 16 m<sup>3</sup>/s

Por lo que el factor de planta para el Recreo es.

$$f. Planta = \frac{16 \text{ m}^3/\text{s}}{24.8 \text{ MW}} = 0.645 \left( \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) \text{ por MW generado}$$

Tabla XXVII. Factores de planta para las centrales en cascada.

Central Hidroeléctrica.	Factor de Planta.
Hidroeléctrica Canadá	<b>0.315</b> $\left( \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right)$ <i>por MW generado</i>
Hidroeléctrica Monte Cristo	<b>1.077</b> $\left( \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right)$ <i>por MW generado</i>
Hidroeléctrica El Recreo	<b>0.645</b> $\left( \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right)$ <i>por MW generado</i>

Fuente: Datos obtenidos ficha técnica de cada central.

### 3.5.2 Modelo aproximado para las tendencias del precio spot en presas en cascada

Hasta este punto se ha llegado a la conclusión de que es aceptable la linealidad de dependencia para El Recreo con respecto a ambas Centrales aguas arriba, por lo que se tomará la referencia de el Recreo respecto a Montecristo.

Entonces se define la maximización como la tendencia a completar el volumen necesario en la presa de El Recreo, en un tiempo definido, para un caudal de consumo específico y por último para un caudal entrante de la central Montecristo definido.

Para ello se define la ecuación para la maximización de volumen de agua en la presa de El Recreo, tomando en cuenta siete factores importantes es.

Donde

$H_2$  la altura instantánea de la presa del Recreo, m

$H_1$  el volumen máximo permisible antes de verter en el Recreo, m

$F_2$  el factor de planta para el Recreo

$V$  el volumen total para la presa de el recreo,  $m^3$

$R$  el nivel de carga para la central el Recreo, MW

$M$  el nivel de carga para la central Montecristo, MW

$F_1$  el factor de planta para Montecristo

$T$  el tiempo permisible para la carga de la predicción, s

$$V = 7115 * ( H1 - H2) - (Caudal consumido) * t + (Caudal entrante) * t$$

De la ecuación del volumen total se sustituye

$$23\ 000\ m^3 = 7115 * ( H1 - H2) - (F2 H2) * t + (F1t +) * t$$

Sustituyendo algunos valores, entonces

$$23\ 000\ m^3 = 7115 * ( 903.32 - H2) - (0.645200) * t + (1.07720) * t$$

Para el modelo se buscará predecir el nivel de potencia en el Recreo.

Se despeja R para la ecuación anterior.

$$23\ 000\ \text{m}^3 - 1.077 * M * t - 7115 * (H1 - H2) = 1 - .645 * R * t$$

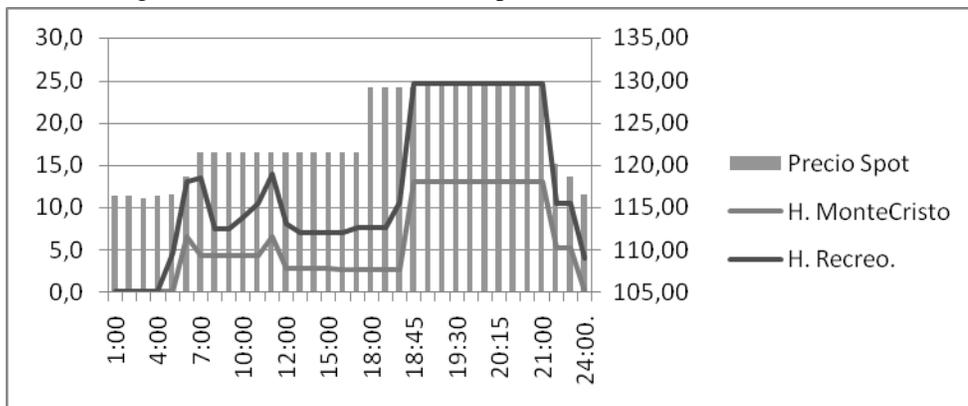
$$R = \frac{7115 * (903.32 - H2) - 23\ 000 + (1.07700) * t}{0.645 * t}$$

### MODELO DE DESPACHO IDEAL

#### Caso 1 (típico verano)

La predicción se basa en el día 13 de marzo del 2008.

Figura 59. **Tendencias normales para el día 13 de marzo del 2008.**



Fuente: **Datos obtenidos Post Despacho.**

Para el caso que el operador se encuentre con las siguientes condiciones.

- Su embalse con un nivel de 901 m
- Y Montecristo tenga una media promedio de generación de 4 MW
- Y que el Recreo posee un contrato total de Spot

Entonces los resultados son

$$R = \frac{7115 * (903.32 - 901) - 23\ 000 + (1.07700) * 36000}{0.645 * 36000}$$

$$R = 6\ \text{MW}$$

Se simula la carga de las 6:00 hrs hasta las 18:00 hrs.

Tabla XXVIII. Tendencias normales y de la predicción por medio del modelo, 13 de Marzo 2008.

Hora	H. Monte Cristo	H. Recreo.	Precio Spot	Predicción Recreo	Venta sin Predicción	Venta con Predicción
1:00	0,0	0,0	116,43	0	0,00	0,00
2:00	0,0	0,0	116,43	0	0,00	0,00
3:00	0,0	0,0	116,06	0	0,00	0,00
4:00	0,0	0,0	116,43	0	0,00	0,00
5:00	0,0	4,6	116,56	4,6	536,19	536,19
6:00	6,5	13,1	118,62	6	1553,90	711,71
7:00	4,3	13,5	121,59	6	1641,40	729,51
8:00	4,3	7,5	121,59	6	911,89	729,51
9:00	4,3	7,5	121,59	6	911,89	729,51
10:00	4,2	8,8	121,59	6	1069,95	729,51
11:00	4,2	10,5	121,59	6	1276,64	729,51
11:30	6,5	14,0	121,59	6	1702,19	729,51
12:00	2,7	8,0	121,59	6	972,68	729,51
13:00	2,7	7,0	121,59	6	851,10	729,51
14:00	2,7	7,0	121,59	6	851,10	729,51
15:00	2,7	7,0	121,59	6	851,10	729,51
16:00	2,6	7,0	121,59	6	851,10	729,51
17:00	2,6	7,6	121,59	6	924,05	729,51
18:00	2,6	7,6	129,23	24,8	982,17	3204,98
18:15	2,6	7,6	129,23	24,8	982,17	3204,98
18:30	2,6	10,7	129,23	24,8	1382,79	3204,98
18:45	13,0	24,8	129,23	24,8	3204,98	3204,98
19:00	13,0	24,8	129,47	24,8	3210,93	3210,93
19:15	13,0	24,8	129,47	24,8	3210,93	3210,93
19:30	13,0	24,8	129,47	24,8	3210,93	3210,93
19:45	13,0	24,8	129,47	24,8	3210,93	3210,93
20:00	13,0	24,8	129,47	24,8	3210,93	3210,93
20:15	13,0	24,8	129,47	24,8	3210,93	3210,93
20:30	13,0	24,8	129,47	24,8	3210,93	3210,93
20:45	13,0	24,8	129,47	24,8	3210,93	3210,93
21:00	13,0	24,8	129,47	24,8	3210,93	3210,93
22:00	5,2	10,5	120,08	10,5	1260,82	1260,82
23:00	5,2	10,5	118,62	10,5	1245,49	1245,49
24:00.	0,0	4,0	116,56	4	466,25	466,25
				Venta Total	53328,21	54692,89

Fuente: Datos obtenidos PostDespacho y resultados del modelo verano

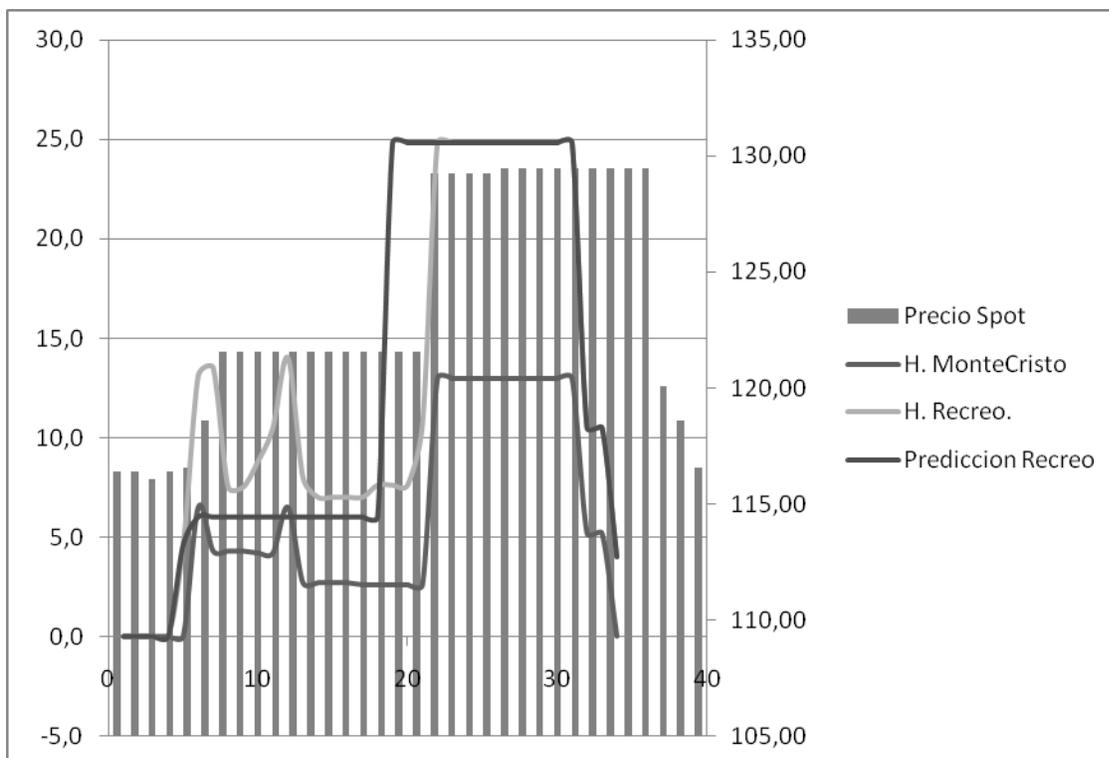
Entonces se comprueba que la ganancia con la predicción es de

$$\Delta\$ = 54892.89 - 53328.21$$

$$\Delta\$ = 1564.6 / \text{día}8/ \text{ día}$$

Y el comportamiento de la tendencia es así

Figura 60. **Tendencias normales y de la predicción por medio del modelo para un día de verano**

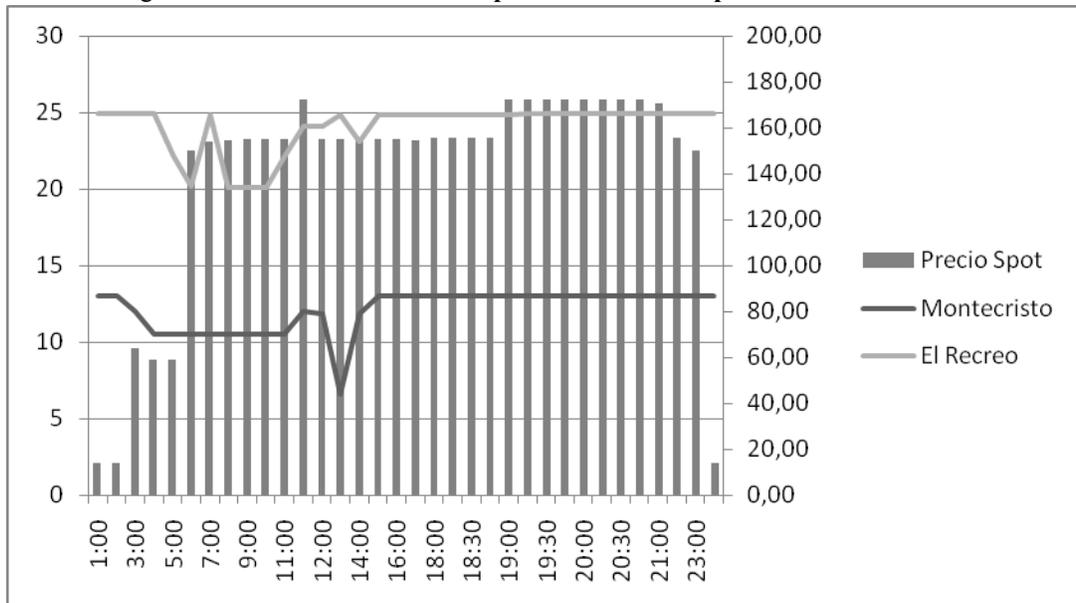


Fuente: **Datos obtenidos Post Despacho y resultados del modelo verano**

### Caso 2 (típico de Invierno)

Para ello se prueba el día 25 de septiembre.

Figura 61. Tendencias normales para el día 25 de Septiembre del 2008



Fuente: Datos obtenidos Post Despacho.

Para el caso que el operador se encuentre con las siguientes condiciones.

- La potencia media para Montecristo es de 10.5 MW
- El dato obtenido de la bitácora de Sala de Mando el Recreo de H es de 901.73 m.
- Y haciendo constar que el factor de escorrentía ha sido elevado por las condiciones invernales del tiempo en unos 25% del caudal entrante.

Entonces

$$R = \frac{7115 * (903.32 - 901.73) - 23000 + (1.0770(1.25) * 10.5) * 60 * 60 * 5}{0.645 * 60 * 60 * 5}$$

$$R = 20.91 \text{ MW}$$

La potencia a Despachar durante 5 horas es de 20.91 MW, que va desde las 5:00 hrs. Hasta las 10:00 hrs.

Tabla XXIX. Tendencias normales y de la predicción por medio del modelo, 25 de septiembre del 2008.

Horas	El Recreo	Precio Spot	Predicción El Recreo	Venta sin Predicción	Venta con Predicción
1:00	24,9	13,83	24,9	344,37	344,37
2:00	24,9	13,83	24,9	344,37	344,37
3:00	24,9	63,92	24,9	1591,61	1591,61
4:00	24,9	58,89	24,9	1466,36	1466,36
5:00	22,2	58,89	20,91	1307,36	1231,39
6:00	20,2	149,9	20,91	3027,98	3134,41
7:00	24,8	153,85	20,91	3815,48	3217,00
8:00	20,1	154,52	20,91	3105,85	3231,01
9:00	20,1	155,15	20,91	3118,52	3244,19
10:00	20,1	155,15	24,8	3118,52	3847,72
11:00	22,1	155,15	24,8	3428,82	3847,72
11:30	24,1	172,14	24,8	4148,57	4269,07
12:00	24,1	155,15	24,8	3739,12	3847,72
13:00	24,8	155,15	24,8	3847,72	3847,72
14:00	23,1	155,15	24,8	3583,97	3847,72
15:00	24,8	155,15	24,8	3847,72	3847,72
16:00	24,8	155,15	24,8	3847,72	3847,72
17:00	24,8	154,52	24,8	3832,10	3832,10
18:00	24,8	155,75	24,8	3862,60	3862,60
18:15	24,8	155,75	24,8	3862,60	3862,60
18:30	24,8	155,75	24,8	3862,60	3862,60
18:45	24,8	155,75	24,8	3862,60	3862,60
19:00	24,8	172,14	24,8	4269,07	4269,07
19:15	24,9	172,14	24,9	4286,29	4286,29
19:30	24,9	172,14	24,9	4286,29	4286,29
19:45	24,9	172,14	24,9	4286,29	4286,29
20:00	24,9	172,14	24,9	4286,29	4286,29
20:15	24,9	172,14	24,9	4286,29	4286,29
20:30	24,9	172,14	24,9	4286,29	4286,29
20:45	24,9	172,14	24,9	4286,29	4286,29
21:00	24,9	170,34	24,9	4241,47	4241,47
22:00	24,9	155,42	24,9	3869,96	3869,96
23:00	24,9	149,9	24,9	3732,51	3732,51
23:59	24,9	133,83	24,9	3332,37	3332,37
			Venta Total	116415,90	117739,69

Fuente: Datos obtenidos PostDespacho y resultados del modelo invierno

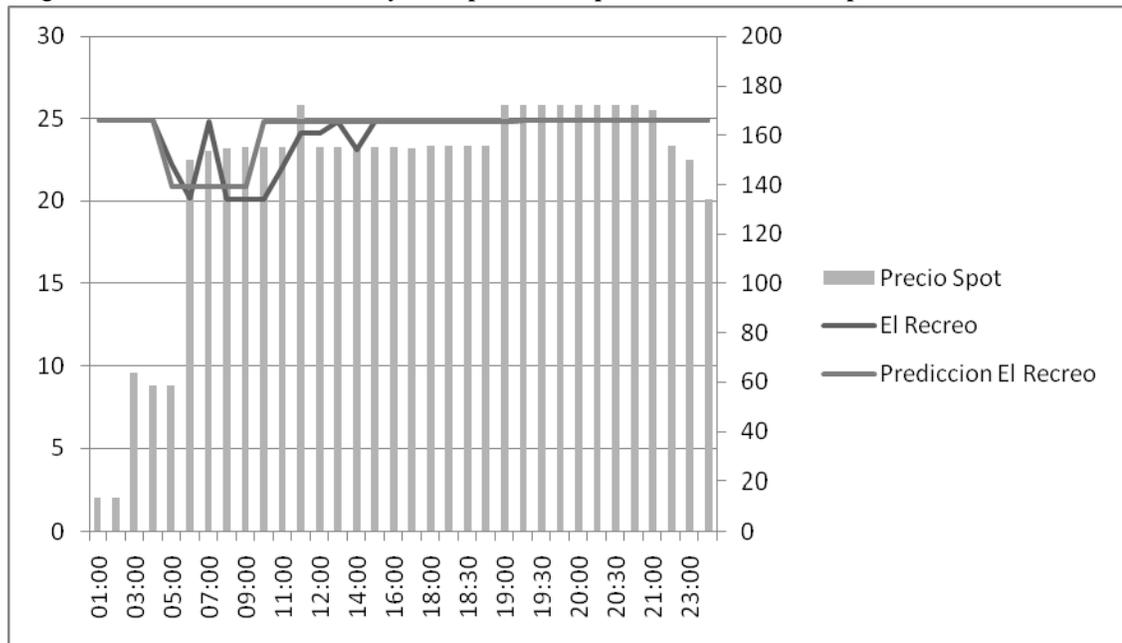
Los resultados son muy satisfactorios y demuestran una leve ganancia por la operación más constante.

$$\Delta\$ = 117739.69 - 116415.90$$

$$\Delta\$ = 1323.79/\text{día}$$

La tendencia de la Operación entonces queda así.

Figura 62. Tendencias normales y de la predicción por medio del modelo para un día de invierno



Fuente: Datos obtenidos Post Despacho y resultados del modelo invierno

Se observa las tendencias aproximadas que resuelve el modelo de la ecuación, para ambas estaciones, pero cabe agregar que poseen incongruencia en algunos días de generación y que el presente Modelo busca la maximización en la operación de las presas en cascada, refiriéndose también con el complemento del Precio Spot que reflejará una mejoría en el Beneficio/Costo de cada central.

### **3.5.3 Análisis de contingencias de sucesos no previstos en centrales del tipo cascada.**

Este es un compendio de algunos sucesos con alta probabilidad y el manejo que se puede dar para un montaje de este tipo de centrales en cascada.

#### Apertura de compuertas de fondo Presa Santa María:

La compuerta de fondo como bien se sabe, esta es un limpieza de sedimentación en la parte inferior del embalse, por lo que las condiciones son demeritorias para que las centrales aguas abajo atajen el agua si posee un alto contenido de sólidos, esto podría provocar daños serios en equipos acortando la vida útil del conjunto de la turbina en cada planta, por ello se dispone a abrir compuertas y así no embalsar agua de mala calidad para ser turbinada, esto representa un costo alto ya que el volumen de agua con alto contenido de sedimento tarda hasta dos horas en llegar a la presa de la ultima central como lo es El Recreo, luego de ser cerradas la compuertas en Santa María, con ello tarda el tiempo que se abren las compuertas de fondo sumado a las dos horas de tardanza en el arrastre del sedimento por la cuenca, esto es el tiempo que la planta deja de generar, claro está, este procedimiento se realiza con planillas anticipadas de mantenimiento programado, coordinado con el AMM, para así no adicionar una multa por indisponibilidad forzosa.

#### Disparo en las Central Canadá o Montecristo:

Los disparos, son acciones del sistema de protecciones de cada planta o decisiones que cada operador toma siempre actuando en defensa del equipo instalado, máximo tratándose de equipo económicamente y tecnológicamente tan costosos, un disparo en cualquier unidad de la central Canadá o Montecristo representa una disminución en el caudal de su desfogue, que es el alimentador de la siguiente central, por lo que un disparo de corto o largo periodo provocara la disminución en el despacho de la o las siguientes plantas afectando directamente Canadá a Montecristo y Montecristo al Recreo, por ende el operador de cada central afectada se vera obligado a

reducir su nivel de despacho de carga para poder mantener un nivel estable en el área de su presa, esto afectando directamente la predicción realizada por el personal de operación de cada planta.

Tabla XXX. Contingencias con Alta Probabilidad

Acontecimiento	Causa	Centrales Afectadas	Consecuencia
Apertura Compuerta de Fondo Santa María	Azolvamiento de la Presa	Canadá, Montecristo y El Recreo	Salida de Línea de las tres Centrales
Disparo Unidad 1 o 2 Central Canadá	Múltiples causas	Montecristo y El Recreo	Problemas en el despacho diario o hasta salida de línea
Disparo en Ambas Unidades Canadá	Múltiples causas	Montecristo y El Recreo	Reducción de potencia y hasta salida de línea
Disparo Unidad 1 o 2 Montecristo	Múltiples Causas	EL Recreo	Problemas en el despacho diario o hasta la salida de línea
Disparo Ambas Unidades Montecristo	Múltiples Causas	El Recreo	Reducción hasta su mínimo de potencia 3 MW y hasta salida de línea por bajo caudal.

Fuente: Modelo Presas en Cascada y Visualización por Software.

### 3.5.4 Simulación de costos aproximados sucesos imprevistos más relevantes de una presa en cascada.

El Acontecimiento con mayor consecuencia es la apertura de compuertas de fondo en Santa María, un modelo con una apertura de compuerta para el día 7 de marzo del 2008 a las 9:00 hrs. por un hora afectaría por tres horas la generación en el grupo de centrales aguas debajo de la central y sería de este tipo

Tabla XXXI. Contingencia para el día 7 de marzo de 2008

Horas	H. Santa María.	H. Canadá.	H. Monte Cristo	H. Recreo.	Spot
9:00	3,2	15,0	4,8	10,3	120,16
10:00	3,2	15,0	4,8	13,1	124,78
11:00	3,2	15,0	4,5	13,1	124,78
11:30	3,2	15,0	4,3	9,1	124,78
12:00	3,2	15,0	4,3	9,1	124,78

Fuente: Datos obtenidos PostDespacho y resultados del modelo verano

Los costo económicos de una apertura asumiendo la compra de la potencia no suministrada es

$$f(\$) = \sum P_{ij} * V_j$$

Donde

$P_{ij}$  es la potencia para una central determinada en un tiempo determinado del suceso.

$P_{1j}$  es la potencia instantánea de la central Canadá

$P_{2j}$  es la potencia instantánea de la central Montecristo

$P_{3j}$  es la potencia instantánea de la central El Recreo

$P_{i1}$  es la potencia para la primer hora de la contingencia

Pi2 es la potencia para la segunda hora de la contingencia

Pi3 es la potencia para la tercera hora de la contingencia

Vj es el valor tasado como precio spot en la coordinación del despacho para cualquier hora de la contingencia.

Entonces

$$f(\$) = \sum (P1j + P2j + P3j) * Vj$$

$$f(\$) = \sum (30.1) * 120.16 + (31.9) * 124.78 + (28.4) * 124.78$$

$$f(\$) = 3616.81 + 3980.48 + 3543.75 = 11\ 141$$

El costo total aproximadamente de un acontecimiento de esta índole será de

$$f(\$) = \$ 11\ 141.04$$

Suma no tan considerable si la comparamos con el daño a cualquier equipo de las centrales afectadas por turbinar agua de malas condiciones, que representaría un cambio de rodete por desgaste excesivo o cambio de agujas por problemas de desgaste prematuro.



## **4. SIMULACIÓN VISUAL DEL MODELO PRESAS EN CASCADA POR SOFTWARE**

La visualización por medio de software, es una herramienta muy usada en esta época, los controles automatizados, los programadores lógico y la adquisición de datos está al alcance de todos, por lo que es de mucha importancia la implementación de estos en la mayoría de los sistemas de generación, sin excluir los sistemas de generación hidráulica, estas herramientas permiten que el operador realice maniobras enfocándose en la visualización del sistema en su totalidad teniendo la posibilidad de prestar atención a todo el proceso de generación en un solo ordenador; hará más segura la operación de la planta y permitirá observar condiciones de su presa a través de la comunicación a otras estaciones de adquisición de datos en modo esclavo, hasta la apertura de interruptores en el área de la subestación; en fin una gama extensa de posibilidades abiertas para la supervisión y control de los sistemas en una central.

### **4.1 Características del software**

Del tipo Scada, es un sistema completo de adquisición de datos, control y visualización que ofrece una amplia gama de protocolos de comunicación para cualquier tipo de controlador lógico programable, esto se realiza con el fin de obtener datos; además, posee herramientas para facilitar la programación, así como librerías de imágenes pre cargadas para su implementación en la visualización.

### **4.2 Funcionamiento del programa**

La visualización destinada para la facilitación en la operación, como un apoyo al operador en la Central Hidroeléctrica El Recreo, para ello se configura varias páginas las que desplegarán información importante acerca de la implementación del sistema de visualización y de predicción del despacho.

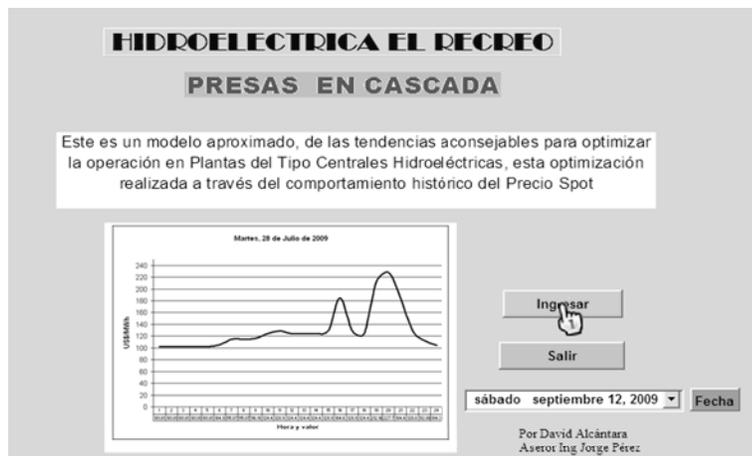
Figura 63. Pantalla principal Scada



Fuente: Programación del modelo de aproximación, DAQFactory

La figura anterior, muestra la página principal de la visualización, donde se despliega la información del modelo, así como una gráfica de las tendencias del precio spot en Guatemala, en un día X.

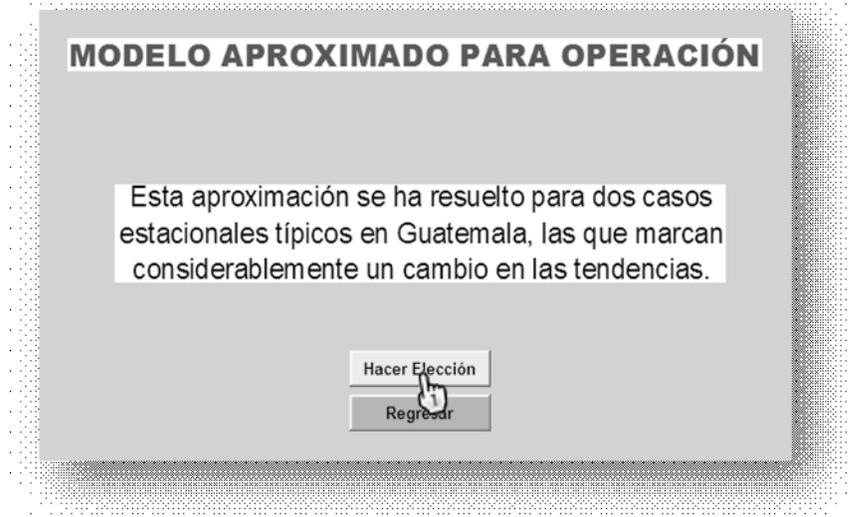
Figura 64. Pantalla principal Scada al ingresar



Fuente: Programación del modelo de aproximación, DAQFactory

Presionando Ingresar en la página principal, se carga el programa

Figura 65. **Pantalla preliminar estacional**

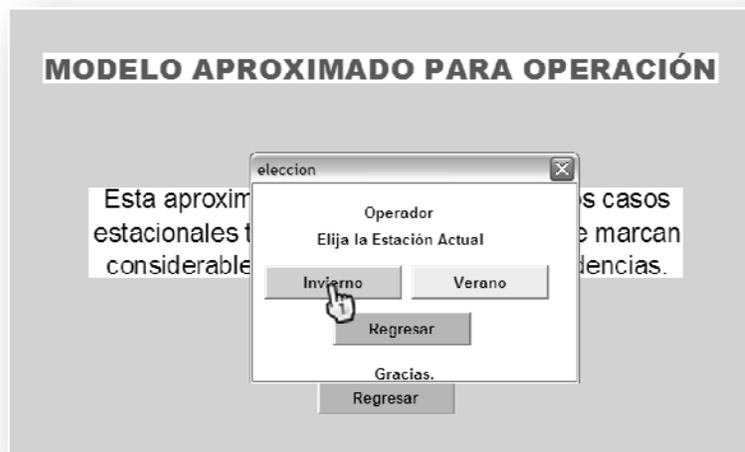


Fuente: **Programación del modelo de aproximación, DAQFactory**

La segunda Página despliega la información estacional y la petición para realizar la elección de época.

Al Presionar Hacer Elección, se despliega la tercera página.

Figura 66. **Pantalla para realizar la elección estacional**



Fuente: **Programación del modelo de aproximación, DAQFactory**

La figura anterior hace la petición al operador, para elegir la estación en la que se encuentra actualmente.

Se trazaron dos rutas, una de invierno y la otra de verano, cada una con sus variables para predecir con la mayor exactitud el caudal entrante, en la que se adiciona un 25% de afluentes extras en la presa para la época invernal.

De esta manera al presionar invierno, por ejemplo, se despliega la siguiente página.

Figura 67. **Pantalla de visualización de la cuenca**



Fuente: **Programación del modelo de aproximación, DAQFactory**

Esta muestra la cuenca aproximada para el Samalá y visualiza las cuatro plantas instaladas y sus potencias, así como la información de las cargas máximas en el despacho de cada una de ellas.

Lo relevante de esta página son los botones selectores, por ejemplo los botones de Precio Spot

Por ejemplo, al presionar el botón Spot Ma-Vi.

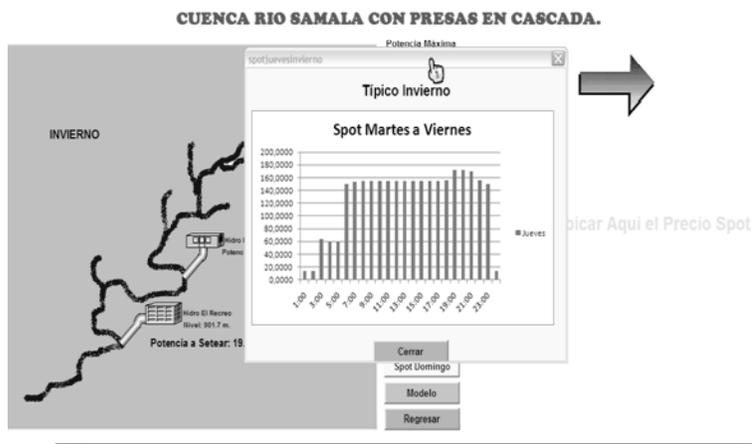
Figura 68. Pantalla de la cuenca presionando el botón Precio Spot



Fuente: Programación del modelo de aproximación, DAQFactory

Despliega, la gráfica de las tendencias horarias del Precio Spot para días de la semana entre el martes y el viernes, que tienen un comportamiento muy parecido.

Figura 69. Despliegue de un gráfico del Precio Spot a elección del operador



Fuente: Programación del modelo de aproximación, DAQFactory

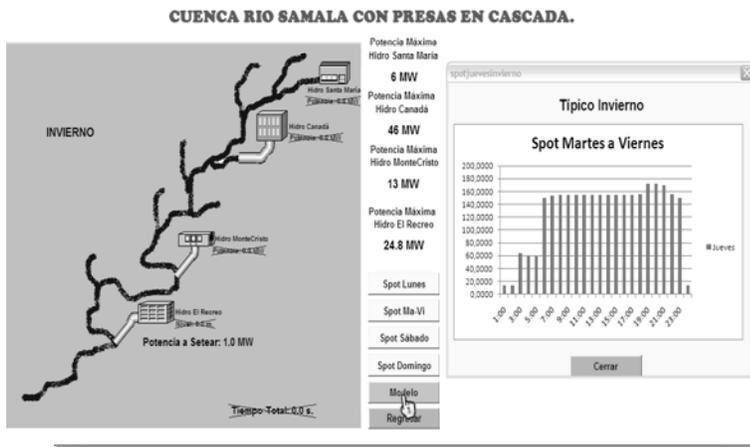
Esta gráfica, será de apoyo, para tener referencia histórica de las alzas al precio Spot, y con ello predecir una operación con un factor beneficio/costo mejorado, todo esto a la mano del operador de turno.

Se debe de arrastrar la gráfica y ubicarla donde marca la flecha.

#### 4.2.1 Visualización y coordinación del modelo

Al presionar el botón Modelo, parte fundamental de la visualización, este desplegará la ecuación de aproximación.

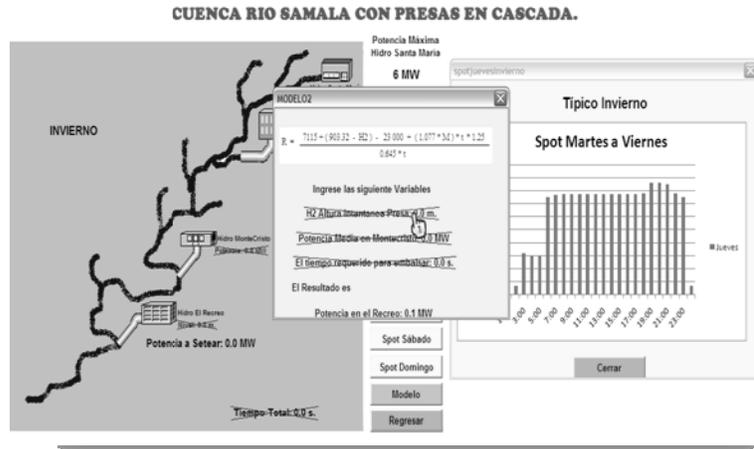
Figura 70. Pantalla completa de la visualización de la cuenca



Fuente: Programación del modelo de aproximación, DAQFactory

A continuación se despliega el Modelo de aproximación y las variables a modificar.

Figura 71. Despliegue de el Modelo de Aproximación

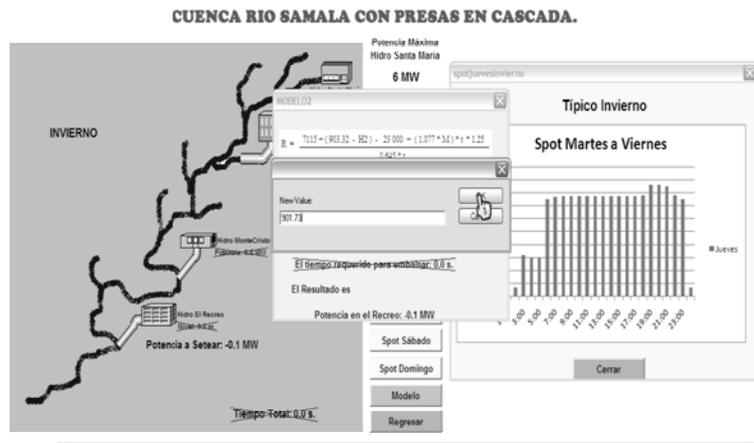


Fuente: Programación del modelo de aproximación, DAQFactory

En la figura anterior se observa que los datos poseen desbordes analógicos, dado que no están dentro de los parámetros normales de operación de las Centrales, por ello se deben de ingresar los parámetros de trabajo.

Al presionar los valores de cada variable se visualiza el menú para modificarlos.

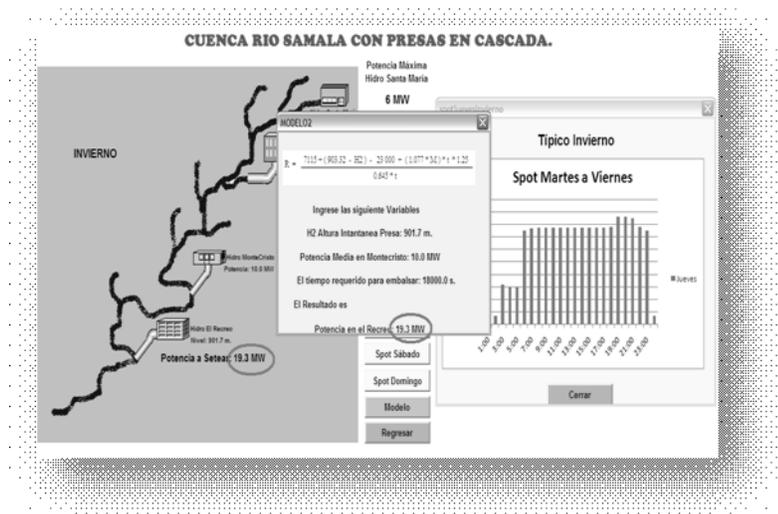
Figura 72. Integración de datos en el Modelo de Aproximación



Fuente: Programación del modelo de aproximación, DAQFactory

El resultado para la coordinación en el despacho para la Central Hidroeléctrica El Recreo son los valores encerrados en los círculos de la siguiente figura.

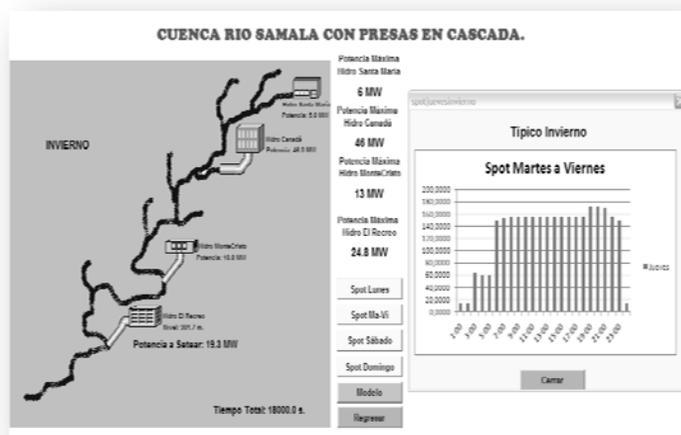
Figura 73. Visualización del resultado del Modelo de Aproximación



Fuente: Programación del modelo de aproximación, DAQFactory

Los datos importantes a visualizar son la potencia que despacha instantáneamente Montecristo, el nivel de la Presa en El Recreo, el tiempo requerido para completar el embalse y el despacho de potencia en El Recreo.

Figura 74. Visualización total del Modelo



Fuente: Programación del modelo de aproximación, DAQFactory

## CONCLUSIONES

1. En la realización de este trabajo, se pudo comprobar las ventajas que aporta la modalidad de Presas en Cascada durante el proceso de aprovechamiento de los recursos hídricos. En general, se observó que este sistema afecta en una mínima proporción al medio ambiente y al ecosistema; minimiza el área requerida de terreno fértil a inundar en la zona pues solo necesita la instalación de una presa principal; por otro lado se hace evidente la reducción del riesgo de colapso en la estructura de la presa, ya que la envergadura de la misma es de menor tamaño; además se logra un aprovechamiento total de la cuenca en función de su cota geodésica, al obtener toda la energía potencial que aquella posee y brindando, al mismo tiempo, la posibilidad de instalar distintos tipos de turbina para mejorar la capacidad del potencial hídrico.
2. En el aspecto económico, se pudo constatar que la modalidad de presas en cascada ofrece cierto grado de versatilidad, pues al momento de falla en alguna de las centrales, el recurso desaprovechado por la central con falla, es aprovechado por las centrales aguas abajo de esta.
3. Se comprobó la dependencia del nivel de carga despachado por cada una de las centrales, el cual muestra cierta inconsistencia en la potencia de la Central Hidroeléctrica Santa María respecto a la potencia de la Central Hidroeléctrica Canadá. Se pudo constatar que la central Santa María, por las condiciones en su diseño, no obedece a dicho comportamiento, su presa de grandes dimensiones, para el bajo consumo de volumen de agua de sus turbinas, le permite generar casi

a máxima carga todo el día, colocándola en distintas condiciones de Canadá, que debe embalsar el constante caudal desfogado de Santa María para poder tomar carga para las horas pico del día. Por esta razón solo se toma en cuenta la linealidad entre Canadá y Montecristo, y entre ésta con El Recreo, siendo muy marcada en los datos históricos del Post Despacho del AMM y corroborada en la implementación de la ecuación del tipo regresión lineal y al gráfico de dicha tendencia.

4. La aplicación del modelo matemático a El Recreo, resultó en una notoria mejoría para la generación diaria y en la obtención de números positivos en las diferencias en energía vendida por día, se pudo deducir, por ello, que la utilización de dicho modelo mejoraría la toma de decisiones para el despacho en las demás Centrales también porque, al utilizarlo, los operadores tendrán una referencia más precisa en la predicción diaria del despacho. En la actualidad cada operador cuenta con referencias históricas y dicho modelo vendría a completar sus datos, permitiendo la integración de otras variables como el alza en la demanda por medio de gráficos del precio Spot, el caudal entrante aproximado y el nivel en la presa, entre otros. Todo ello permitiría realizar un despacho más estable.
5. El uso de herramientas tipo SCADA, facilita la adquisición, procesamiento e implementación de datos como variables dentro de un modelo. El despliegue de gráficos que demuestran visualmente el funcionamiento del modelo matemático aumentan la confiabilidad en los operadores que realizan el despacho y permite constatar, en una simple simulación, cualquier cambio que desee realizarse en el nivel de carga del mismo, todo controlado desde la comodidad de un ordenador.
6. El modelo para la aproximación obedece muy bien en condiciones normales de operación, sin embargo también podría presentar ciertas fallas derivadas de condiciones atípicas en la operación, por ejemplo, una apertura de compuerta de

fondo en Santa María, un disparo de alguna unidad en las centrales aguas arriba de aquella que se encuentre operando bajo el Modelo de Aproximación y, la más importante, la falta de infraestructura de comunicación, entre centrales por medio de RTU, para la lectura en tiempo real de los niveles de carga; todo esto constituye un margen muy amplio de error en la predicción, dado que la lectura se realiza a través de datos provenientes del reporte horario al AMM por medio de radio u otros medios.

7. En la simulación del modelo se pudo obtener un incremento al cierre del día del total de la venta, con registros del mas del 5% para un día normal de verano y de un 1.3% para un día normal de invierno, por lo cual se considera que la implementación de este modelo aportaría gran beneficio a las Centrales Hidroeléctricas, sobretodo en el plano económico.



## RECOMENDACIONES

1. En Guatemala, el uso de centrales en cascada tiene beneficios amplios en muchos aspectos. Se recomienda que en la futura implementación de éstas también se tome en consideración la integración de modelos de predicción que permitirá un despacho más estable y eficiente, obteniendo gráficas de generación más lineales.
2. Un factor importante a considerar, en actuales y futuras centrales con este tipo de modalidad, es la coordinación de toda la línea, desde el inicio de la cascada hasta el final, esto permite obtener el mayor beneficio en el despacho; su importancia radica en la dependencia existente entre cada una de ellas y a la vez permite que se responsabilicen de los problemas que acaecen en la central ubicada aguas abajo.
3. Existen varios requerimientos para la ejecución del modelo, por lo que se deben implementar sistemas de comunicación, tales como fibra óptica en su versión mono modo para la coordinación en tiempo real y para reducir el tiempo en la toma de decisiones en el despacho hecho por el operador de cada central.
4. Cada operador deberá considerar el margen de error del modelo, por ejemplo, altas avenidas, operaciones anormales en las centrales aguas arriba, o cualquier tipo de dificultad que afecte la normalidad en el despacho de carga; su utilización debe ser tomada como una sugerencia de la predicción de su despacho, mientras estas situaciones atípicas no hayan sido implementadas en el modelo.



## REFERENCIAS

1. Administrador del Mercado Mayorista. **Precio Spot.** Guatemala. [www.amm.org.gt](http://www.amm.org.gt)
2. Andritz. **Manual de Operación y Mantenimiento Para Turbina Pelton En Hidroeléctrica El Recreo.** Austria.
3. Arroyo Sánchez, José Manuel. **Manual Informativo de Centrales Hidroeléctricas.** España: <http://www.uclm.es/area/gsee/aie/censublin/hidraulicas.pdf>
4. Azeotech. **DAQFactory para Windows, Version 5.8.** Estados Unidos. 2009
5. Brockhaus. **Diccionario Popular de las Ciencias y de la Técnica.** 2a. edición. España. Editorial Gustavo Gili. S.A. 1964. p.658
6. Centrales Hidroeléctricas. **Recursos Hídricos.** España. <http://thales.cica.es/rd/Recursos/rd99/ed99-0226-01/capitulo3.html>
7. Comisión Nacional de Energía Eléctrica. **Mercado Eléctrico.** Guatemala [www.cnee.gob.gt/estadisticas-mercado](http://www.cnee.gob.gt/estadisticas-mercado)
8. Escuela de Ingeniería de Antioquía. **Mecánica de Fluidos y Recursos Hidráulicos.** Colombia. [www.fluidos.eia.edu.co/turbinas/imagen617.gif](http://www.fluidos.eia.edu.co/turbinas/imagen617.gif)
9. Fernández, Cesar. **Presentación Seguridad Energética, Diversificación De las Matrices Energéticas.** Guatemala: CNEE. 2008
10. Flink, Donald; H. Wayne Beaty. **Manual de Ingeniería Eléctrica. Tomo II.** 13a. Edición. México. Editorial McGraw-Hill. 1996.
11. Google Earth. **Tele Atlas 2009 Digital Globe.** Estados Unidos. [www.googleearth.com](http://www.googleearth.com)
12. Hyundai Ideal Electric Co. **Resumen Ejecutivo Hidroeléctrica El Recreo.** Estados Unidos.
13. INDE. **Catalogo Informativo Hidroeléctrica Santa María.** Guatemala. <http://www.inde.gob.gt/portal/home.astx>

14. Inepar General Electric. **Resumen Ejecutivo Hidroeléctrica Canadá.** Brasil, 2001.
15. Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología INSIVUMEH. **Hidrología.** Guatemala. [www.insivumeh.gob.gt/hidrologia/ríos](http://www.insivumeh.gob.gt/hidrologia/ríos)
16. Legislación Guatemalteca. **Decreto 93-96, Ley General de Electricidad.** Guatemala. 1996.
17. Manuel Basterreche Asociados, S.A. **Evaluación de Impacto Ambiental para central hidroeléctrica El Recreo.** Guatemala.
18. Mataix, Claudia. **Mecánica de fluidos y Maquina Hidráulicas.** 2da. edición. México: Harla. 1982.
19. Mega Siglo XXI. **Diccionario enciclopédico.** Colombia: Editorial Norma. 2003. p.964.
20. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. **Diccionario esencial de las ciencias.** España. Espasa. 2001. p.1061
21. Vásquez D. Abdel. **Criterios y Procedimientos para llevar a cabo Investigaciones Geológicas en Presas.** Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
22. VA TECH. **Resumen Ejecutivo Hidro Monte Cristo.** Austria.
23. Western, Cees van. **Zonificación de Amenazas Naturales en la cuenca del río Samalá y Análisis de vulnerabilidad y riesgo en la población de San Sebastián Retalhuleu.** Guatemala. 2003.