

**FACTIBILIDAD Y DISEÑO DE SISTEMAS DE
GENERACIÓN DISTRIBUIDA BASADOS EN
MICRO-GENERACIÓN HIDRÁULICA**

TESIS

**Que para obtener el Grado de
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA**

Presenta

Ing. Rafael Peña Gallardo

Dr. J. Aurelio Medina Ríos

Director de Tesis

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Marzo de 2006

Agradecimientos

Estoy profundamente agradecido con el Dr. J. Aurelio Medina Ríos, por su consejo en los distintos escenarios de desarrollo de esta investigación de tesis, así como por su ayuda en la búsqueda de las herramientas que sirvieron de base para la realización de está tesis. Agradezco mucho el apoyo y paciencia de mis padres, hermanos y Patricia durante el tiempo requerido para la conclusión del presente estudio.

Resumen

Los sistemas de generación distribuida constituyen una alternativa viable a la solución del problema de generación y suministro de energía eléctrica en regiones aisladas o pequeñas cargas, esto especialmente en países en vías de desarrollo.

En esta tesis se realiza una breve descripción de las tecnologías disponibles en generación distribuida, en específico se estudia y analiza la factibilidad de implantación de sistemas micro o mini-hidráulicos de generación eléctrica en regiones puntuales donde exista un pequeño río o caída de agua.

Debido a que el agua es la materia prima para la generación hidroeléctrica, fue importante analizar el comportamiento de las series de tiempo de caudal de pequeños ríos, así como aplicar técnicas de pronóstico de series de tiempo como lo son las metodologías Arima (Auto-regressive Integrated Moving Average) o metodologías de inteligencia artificial; como las redes neuronales o programación genética, esto con el objeto de determinar el comportamiento futuro del caudal y así definir si es factible o no la instalación de una mini-central hidráulica.

En base a los resultados obtenidos de las series de tiempo de caudal, se desarrolla una metodología para determinar las características de cada uno de los elementos electro-mecánicos de la central mini-hidráulica propuesta, además se dan recomendaciones generales para los componentes más importantes de la obra civil.

Para el estudio de la operación dinámica de este tipo de sistemas se utiliza el software de simulación PSCAD/EMTDC y se presentan los modelos incluidos en este paquete para sistemas hidráulicos y su aplicación en mini-sistemas de generación. Se realizaron estudios en estado estacionario y estado transitorio de una mini-red de generación y distribución propuesta, obteniéndose la respuesta de voltajes y corrientes en diferentes puntos del sistema.

Finalmente se ofrecen conclusiones en base a los resultados obtenidos en el desarrollo de esta tesis, dándose sugerencias para el desarrollo de trabajos futuros y tomando como punto de referencia la investigación realizada y los resultados obtenidos.

Abstract

The distributed generation systems constitute a viable alternative to the solution of the generation and electric power supply problem in isolated regions or small loads, which is especially applied in developing countries.

In this thesis, a brief description of the available technologies in distributed generation is made. The feasibility of installation of electrical generation based on mini-hydraulic systems in punctual regions having a small river or water fall is analyzed.

Because the water is the raw material for the hydroelectric generation, it was important to analyze the behavior of the water flow time series from small rivers, and apply time series forecasting methodologies such as ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average) or artificial intelligence methodologies, e.g, neural networks or genetic programming, in order to determine the future behavior of the water flow and to define if it is feasible or not the installation of a mini or micro-hydraulic plant.

Based on the obtained results of the water flow time series, a methodology is developed to determine the characteristics of each one of the electro-mechanical elements of the proposed mini-hydraulic central. General recommendations are also given for the most important civil components.

The simulation software PSCAD/EMTDC is used for the study and analysis of the presented mini-generation system. Also, the included models in this package for hydraulic systems are shown. Steady state and transient analysis of the proposed generation and distribution mini-grid were carried-out, obtaining the voltage and current waveforms at different points of the system.

Finally conclusions are offered based on the investigation reported in this thesis. Suggestions are in addition given for future research work.

Contenido

Agradecimientos	iii
Resumen	iv
Abstract	v
Contenido	vi
Lista de Figuras	x
Lista de Tablas	xiii
Lista de Símbolos y Abreviaciones	xiv
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes, Descripción General del Problema	1
1.1.1. Definición de Generación Distribuida y Centrales Mini-hidráulicas	2
1.1.2. La Generación Distribuida en Otros Países	3
1.1.3. La Generación Mini-Hidráulica en Otros Países	4
1.1.4. Interconexión	5
1.1.5. Aplicaciones de la Generación Distribuida	6
1.1.6. Beneficios de la Generación Distribuida	7
1.1.7. Aspectos Legales	8
1.2. Objetivos de la Tesis	8
1.3. Justificación de la Tesis	9
1.4. Descripción de los Capítulos	10
2. Representación de los Micro-generadores Hidráulicos	12
2.1. Introducción	12
2.1.1. Recurso de Energía Mini-hidráulica en México	13
2.1.2. Aprovechamiento del Recurso en México	15
2.1.3. Distribución de la Capacidad Hidroeléctrica Instalada	16
2.2. Reseña de Sistemas de Generación Distribuida	16

2.3. Referencia hacia Micro-generadores Hidráulicos	19
2.3.1. Configuración de un Sistema Mini-hidroeléctrico	22
2.4. Conclusiones	23
 3. Estudios de Factibilidad de Aplicación de Micro-generadores Hidráulicos y Micro-redes de Generación	 24
3.1. Introducción	24
3.1.1. Factibilidad Operativa	25
3.1.2. Factibilidad Técnica	25
3.1.3. Factibilidad Económica	25
3.2. Presentación de un Estudio de Factibilidad	26
3.3. Metodología para Evaluar la Factibilidad en un Sistema Mini-hidráulico	27
3.4. Necesidad de Micro-redes de Generación Distribuida	33
3.5. Factibilidad Puntual de Implantación de Redes de Generación Distribuida	34
3.5.1. Aplicación de Series de Tiempo	34
3.5.1.1. Algunos Modelos de Pronóstico de Series de Tiempo	35
3.5.1.2. Casos de Estudio	42
3.5.1.3. Serie de Tiempo Normalizada	44
3.5.1.4. Software Project R	45
3.5.1.5. Método ARIMA	46
3.5.1.6. Transformación Box-Cox	50
3.5.2. Aplicación de Redes Neuronales	52
3.5.3. Software ECSID	58
3.5.4. Método de Monte-Carlo	61
3.6. Resultados	68
3.7. Conclusiones	70
 4. Diseño de Micro-redes Hidráulicas de Generación	 71
4.1. Introducción	71
4.2. Tipos de Centrales Micro y Mini-hidráulicas	73
4.3. Obra Civil	75

4.3.1. Azudes y Presas	77
4.3.1.1. Diseño de un Azud o Presa Vertedora	78
4.3.2. Obra de Toma	79
4.3.2.1. Criterios de Diseño para una Obra de Toma	80
4.3.2.2. Diseño de una Obra de Toma	81
4.3.3. Canal de Derivación	82
4.3.3.1. Sección y Ángulo de Talud del Canal	84
4.3.3.2. Velocidad del Agua v	84
4.3.3.3. Rugosidad n	85
4.3.3.4. Borde Libre	87
4.3.3.5. Perímetro Mojado	87
4.3.3.6. Radio Hidráulico	87
4.3.3.7. Pasos a Seguir para el Cálculo de un Canal	88
4.3.4. Aliviaderos	90
4.3.4.1. Diseño de un Aliviadero	91
4.3.5. Cámara de Carga y Desarenador	93
4.3.5.1. Diseño de una Cámara de Carga con Desarenador	95
4.3.6. Tubería de Presión	96
4.3.6.1. Diseño y Selección de la Tubería de Presión	99
4.3.7. Edificio	100
4.3.6. Canal de Salida	100
4.4. Equipamiento Electro-mecánico	100
4.4.1. Turbina Hidráulicas	101
4.4.1.1. Selección Rápida de la Turbina	103
4.4.2. Generadores	107
4.4.2.1. Sistema de Excitación	108
4.4.2.2. Selección del Micro-generador	109
4.4.3. Elementos de Regulación	110
4.4.4. Transformadores	111
4.4.5. Celdas y Cuadros Eléctricos	112
4.4.6. Línea Eléctrica de Interconexión	112
4.5. Equipos Auxiliares	114
4.6. Conclusiones	115

5. Operación en Estado Estacionario y Estado Transitorio de la Micro-red Hidráulica de Generación.	116
5.1. Introducción	116
5.2. Micro-generadores Hidráulicos en PSCAD/EMTDC	117
5.3. Casos de Estudio	121
5.3.1. Operación en Estado Estacionario	123
5.3.1.1. Regulación de Voltaje en la Línea de Distribución	126
5.3.2. Operación en Estado Transitorio	127
5.3.2.1. Falla Trifásica a Tierra en la Línea de Distribución	128
5.3.2.2. Falla Monofásica a Tierra en la Línea de Distribución	133
5.3.3. Selección de Protecciones	137
5.3.4. Operación Conectada a un Bus Infinito	139
5.4. Conclusiones	142
6. Conclusiones Generales	144
6.1. Aportaciones	146
6.2. Sugerencias para Trabajo de Investigación Futuro	146
Apéndices	148
A. Serie de Tiempo, Estación Hidrométrica Cardel, Veracruz	148
B. Diagramas de Bloques de Componentes Hidráulicos en PSCAD/EMTDC	150
C. Parámetros del Sistema de Prueba	156
Referencias	161

Lista de Figuras

2.1.	Micro-generador Hidráulico.	12
2.2	Tecnologías Disponibles de Generación Distribuida.	16
2.3.	Sistema Hidráulico Típico.	22
3.1.	Diagrama de Enfoque Box-Jenkins.	40
3.2.	Diagrama de Flujo de Método Box-Jenkins.	41
3.3.	Serie de Tiempo de Caudal de Agua, Río la Antigua.	43
3.4.	Comportamiento Anual de la Serie de Tiempo de Caudal.	44
3.5.	Serie de Tiempo de Caudal Normalizada.	45
3.6.	Datos Obtenidos por el Método ARIMA.	48
3.7.	Datos Obtenidos por el Método best-ARIMA.	50
3.8.	Serie de Tiempo Transformada por Método Box-Cox.	51
3.9.	Datos Obtenidos por el Método Auto-regresivo y Cox-Box.	52
3.10	Esquema General de Conexiones de una Red Neuronal.	54
3.11	Serie de Tiempo Obtenida por Medio de una Red Neuronal.	55
3.12	Datos Pronosticados por Medio de la Red Neuronal.	57
3.13	Pronostico a Largo Plazo por Medio de la Red Neuronal.	58
3.14	Validación del Modelo Obtenido por Medio de ECSID.	60
3.15	Pronóstico de la Serie de Tiempo por Medio de ECSID.	61
3.16	Histograma de la Serie de Tiempo en la Simulación Monte-Carlo	64
3.17	Gráfica de la Simulación Monte-Carlo	65
3.18	Pronóstico a Largo Plazo por Medio de la Red Neuronal y Monte-Carlo	66
3.19	Datos Comparativos para la Condición Inicial en la Red Neuronal	68
4.1.	Esquemas de Mini-centrales Hidráulicas.	74
4.2.	Componentes de la Obra Civil de un Sistema Mini-hidráulico.	75
4.3.	Diagrama de un Azud.	78

4.4.	Esquema de una Obra de Toma.	80
4.5.	Tipos de Canales.	83
4.6.	Perímetro Mojado.	87
4.7.	Esquema de un Aliviadero.	91
4.8.	Esquema de una Cámara de Carga con Desarenador.	93
4.9.	Componentes Principales de una Tubería de Presión.	96
4.10.	Diagrama de Funcionamiento de Turbinas Hidráulicas.	104
4.11.	Diagrama de Turbinas Disponibles en Alstom para Centrales Mini-hidráulicas.	105
4.12.	Poste con Cruceta Sencilla.	114
5.1.	Icono del Modelo del Generador Síncrono.	118
5.2.	Icono del Modelo del Excitador de CA.	119
5.3.	Icono del Modelo de la Flecha de Torsión.	119
5.4.	Icono del Modelo de la Turbina Hidráulica.	120
5.5.	Icono del Modelo del Gobernador Hidráulico.	121
5.6.	Sistema Mini-hidráulico de Generación Distribuida.	122
5.7.	Diagrama Unifilar del Sistema de Generación Propuesto.	123
5.8.	Corrientes de Estado Estacionario. (a) Corrientes en Terminales del Generador, (b) Corrientes en la Carga.	124
5.9.	Voltajes de Estado Estacionario. (a) Voltajes en Terminales del Generador, (b) Voltajes en la Carga.	125
5.10.	Falla en Sistema de Generación Propuesto.	128
5.11.	Comportamiento de las Corrientes ante una Falla Trifásica a Tierra en la Línea de Distribución. (a) Corrientes en Terminales del Generador, (b) Corrientes en la Línea de Distribución, (c) Corrientes en la Carga.	130
5.12.	Comportamiento de los Voltajes ante una Falla Trifásica a Tierra en la Línea de Distribución. (a) Voltajes en Terminales del Generador, (b) Voltajes en la Línea de Distribución, (c) Voltajes en la Carga.	132
5.13.	Comportamiento de las Corrientes ante una Falla Monofásica a Tierra en la Línea de Distribución. (a) Corrientes en	

	Terminales del Generador, (b) Corrientes en la Línea de Distribución, (c) Corrientes en la Carga.	135
5.14.	Comportamiento de los Voltajes ante una Falla Monofásica a Tierra en la Línea de Distribución. (a) Voltajes en el Devanado Primario del Transformador Elevador (b) Voltajes en la Línea de Distribución, (c) Voltajes en la Carga.	137
5.15.	Diagrama Unifilar de la Selección de Protecciones.	137
5.16.	Sistema de Generación Distribuida Mini-Hidráulico Conectado a una Red Eléctrica.	140
5.17.	Comportamiento de los Voltajes en Terminales del Generador ante una Falla Trifásica en Terminales del Micro-Generador Hidráulico	141
5.18.	Comportamiento de las Corrientes en el Devanado Primario del Transformador Elevador ante una Falla Trifásica en Terminales del Micro-Generador Hidráulico	142
B1.	Modelo de un Sistema Excitador en Base a un Alternador de <i>ca</i> Rectificada.	150
B2.	Modelo del Sistema Estabilizador de Potencia.	151
B3.	Modelo de una Turbina con Columna de Agua Constante.	152
B4.	Modelo de una Turbina con Columna de Agua Variable.	153
B5.	Modelo de una Turbina Incluyendo los Efectos de un Tanque Agitador y una Columna de Agua Constante.	153
B6.	Modelo de una turbina Incluyendo los Efectos del Tanque Agitador y una Columna de Agua Variable.	154
B7.	Modelo de un Gobernador Usado en Estudios de Rechazo de Carga.	155

Lista de Tablas

1.1.	Capacidad y Designación de Centrales Hidráulicas.	3
1.2.	Centrales Mini-Hidráulicas Instaladas en Europa	5
2.1.	Recursos Hidráulicos Aprovechables en México.	14
2.2.	Hidroeléctricas en México.	15
2.3.	Capacidad Hidroeléctrica Instalada en México.	16
3.1.	Coeficientes del Método ARIMA.	46
3.2.	Datos Obtenidos por el método ARIMA.	47
3.3.	Coeficientes del Método best-ARIMA.	48
3.4.	Datos Obtenidos por el método best-ARIMA.	49
3.5.	Datos Obtenidos por la Red Neuronal.	55
3.6.	Datos Obtenidos por la Red Neuronal Utilizando Simulaciones Monte-Carlo	66
3.7.	Resumen de los Datos Obtenidos por los Modelos Estudiados	69
4.1.	Potencia y Generación Media Anual Obtenida en Diferentes Alturas. ..	72
4.2.	Talud Recomendado para Canales de Sección Trapezoidal.	84
4.3.	Velocidad Máxima del Agua Recomendada.	84
4.4.	Coeficiente de Rugosidad n	85
4.5.	Velocidad de Decantación de las Partículas de Arena.	95
4.6.	Comparación de los Diferentes Materiales para Tuberías de Presión. ..	98
4.7.	Características Principales de Turbinas Hidráulicas.	101
4.9.	Eficiencia del Grupo de Generación (η_{GR}).	103
A1.	Estación Hidrométrica CARDEL (cuenca: río La Antigua, corriente: río La Antigua)	148

Lista de Símbolos y Abreviaturas

K	kilo
M	mega
G	giga
m	metros
W	watts
Hz	hertz
€	euro
$W-h$	watt-hora
g	aceleración de la gravedad
t	tiempo
d/dt	derivada con respecto del tiempo
KD	ganancia derivativa
KI	ganancia integral
KP	ganancia proporcional
Ω	ohms
δ	ángulo de potencia
X	reactancia
R	resistencia
P	potencia real
F	fuerza magnetomotriz
Ra	resistencia de armadura
Ta	constante de tiempo en la armadura
Xp	reactancia de dispersión
Xd	reactancia síncrona de eje directo
Xd'	reactancia síncrona transitoria de eje directo
Xd''	reactancia síncrona sub-transitoria de eje directo
Xq	reactancia síncrona de eje de cuadratura
Xq'	reactancia transitoria de eje en cuadratura
Xq''	reactancia sub-transitoria de eje en cuadratura

<i>Tdo'</i>	constante de tiempo transitoria de circuito abierto en eje directo
<i>Tdo''</i>	constante de tiempo sub-transitoria de circuito abierto en eje directo
<i>Tqo'</i>	constante de tiempo transitoria de circuito abierto en eje de cuadratura
<i>Tqo''</i>	constante de tiempo sub-transitoria de circuito abierto en eje de cuadratura
<i>p.u.</i>	por unidad
<i>lps</i>	litros por segundo
<i>rpm</i>	revoluciones por minuto
<i>RMS</i>	raíz media cuadrática
<i>seg</i>	segundos

Capítulo 1

Introducción.

1.1. Antecedentes, Descripción General del Problema

La Generación Distribuida representa un cambio en el paradigma de la generación de energía eléctrica centralizada. Aunque se pudiera pensar que es un concepto nuevo, la realidad es que tiene su origen, de alguna forma, en los inicios mismos de la generación eléctrica.

De hecho, la industria eléctrica se fundamentó en la generación en el sitio del consumo. Después, como parte del crecimiento demográfico y de la demanda de bienes y servicios, evolucionó hacia el esquema de Generación Centralizada, precisamente porque la central eléctrica se encontraba en el centro geométrico del consumo, mientras que los consumidores crecían a su alrededor. Sin embargo, se tenían restricciones tecnológicas en cuanto a la capacidad máxima de generación de los generadores eléctricos de corriente continua y además la distancia máxima a la cual se podía transportar la energía eléctrica era de 30 a 57 kilómetros, como máximo.

Con el tiempo, la generación eléctrica se estructuró como se conoce hoy en día, es decir, con corriente alterna y transformadores, lo que permite llevar la energía eléctrica prácticamente a cualquier punto alejado del centro de generación. Bajo este escenario, se perdió el concepto de generación centralizada, ya que las grandes centrales se encuentran en lugares distantes de las zonas de consumo, pero cerca del suministro del combustible y agua.

En los años ochentas, factores energéticos (crisis petrolera), ecológicos (cambio climático) y de demanda eléctrica (alta tasa de crecimiento) a nivel mundial, plantearon la necesidad de alternativas tecnológicas para asegurar, por un lado, el suministro oportuno y de calidad de la energía eléctrica y, por el otro, el ahorro y el uso eficiente de los recursos naturales.

Una de estas alternativas tecnológicas es generar la energía eléctrica lo más cerca posible al lugar del consumo, precisamente como se hacía en los albores de la industria eléctrica, incorporando ahora las ventajas de la tecnología moderna y el respaldo eléctrico de la red del sistema eléctrico, para compensar cualquier requerimiento adicional de compra o venta de energía eléctrica. A esta modalidad de generación eléctrica se le conoce como Generación In-Situ, Generación Dispersa, o más cotidianamente, Generación Distribuida.

1.1.1. Definición de Generación Distribuida y Centrales Mini-hidráulicas

No existe aún una definición comúnmente aceptada para la Generación Distribuida, e, incluso, la propia denominación difiere según la fuente documental. En ocasiones se utiliza el término generación dispersa y, aunque más raramente, el de generación In-Situ.

Una definición muy conocida es la del IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*): "Generación Distribuida es la producción de electricidad con instalaciones que son suficientemente pequeñas en relación con las grandes centrales de generación, de forma que se puedan conectar casi en cualquier punto de un sistema eléctrico. Es un subconjunto de recursos distribuidos".

En esta definición no se hace ninguna referencia al margen de potencias de los generadores, pero en general se acepta que va desde unos 3 a 5 MW, los más pequeños y de 10 a 30 MW los de mayor tamaño.

Con respecto a las pequeñas centrales hidroeléctricas, se utilizan otras denominaciones para designarlas como lo es “mini” centrales o “micro” centrales cuando son de un megawatt o menos potencia, en algunos otros casos se utiliza indistintamente el término centrales mini-hidráulicas para designarlas.

En este trabajo de tesis se utilizará la siguiente convención ilustrada en la Tabla 1.1, con el fin de estar acorde con la terminología utilizada en la nueva Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica en nuestro país [CFE 2004], en donde se menciona que un “pequeño productor” será aquel que instale en una central una potencia no mayor a 30 MW.

Tabla 1.1.- Capacidad y Designación de Centrales Hidráulicas.	
Tipo de Central	Capacidad (MW)
Micro-central	menos de 1
Mini-central	de 1 a 5
Pequeña central	de 5 a 30

1.1.2. La Generación Distribuida en otros Países

En el contexto internacional el uso de la generación distribuida ha sido impulsada por diversos factores. De acuerdo con datos del CIGRE de 1999 [CIGRE WG 37-23], en diversos países del mundo se ha incrementado el porcentaje de la potencia instalada de generación distribuida, en relación con la capacidad total instalada. Así, en países como Dinamarca y Holanda alcanza valores de hasta el 37%, y en otros, como Australia, Bélgica, Polonia, España y Alemania, tan solo del 15% y en el caso de Estados Unidos, del 5%.

En lo relativo al potencial en generación distribuida en el mundo se cuenta con la siguiente información.

- Se estima que en los próximos 10 años el mercado mundial para la generación distribuida será del orden de 4 a 5 mil millones de dólares.
- Estudios del Electrical Power Research Institute y del Natural Gas Fundation prevén que, de la nueva capacidad de generación eléctrica que se instalará al año 2010 en Estados Unidos, del 25% al 30% será con generación distribuida.
- Con base en estimaciones de la Agencia Internacional de Energía, los países desarrollados serán responsables del 50% del crecimiento de la demanda de energía

eléctrica mundial en los próximos 20 años, equivalente a 7 millones de MW, donde el 15% de esta demanda le corresponderá a generación distribuida.

1.1.3. La Generación Mini-Hidráulica en otros Países

El departamento para desarrollo internacional (DFID) con sede en el Reino Unido, en su reporte para el Banco Mundial publicó un documento denominado “Best Practice for Sustainable Development of Micro Hydro Power in Developing Countries”, en el cual describen los proyectos micro-hidráulicos realizados y en funcionamiento antes del año 2000, así como la experiencia obtenida en cada uno de ellos [Khennas 2000].

Dentro de los países participantes en este programa se encuentran:

- Sri Lanka. Cuenta con aproximadamente 130 micro-centrales hidráulicas, la mayoría son de una capacidad menor a 100 kW. La energía generada es utilizada en pequeñas fábricas, plantaciones de té y para alumbrado.
- Nepal. Cuenta con 134 micro-centrales hidráulicas, con una capacidad de 10 kW a 100 kW. La energía generada se utiliza principalmente en molinos, alumbrado o pequeños poblados.
- Perú. Cuenta con 4 micro-centrales hidráulicas; la primera tiene una capacidad de 35 kW y es utilizada para alimentar una cooperativa ganadera, la segunda central es de una capacidad de 10 kW y es utilizada para abastecer una planta incubadora privada, la tercera planta es de 185 kW de capacidad y es utilizada para abastecer de energía eléctrica al pueblo de Pedro Ruiz, la cuarta micro-central cuenta con dos unidades de 200 kW y es propiedad de una compañía de distribución y generación de energía eléctrica.

- Mozambique y Zimbabwe. Cuenta con 4 micro-centrales hidráulicas de 13 kW, 15 kW (2 unidades) y 20 kW, estas plantas son utilizadas en el abastecimiento de energía de pequeños poblados.

Por otro lado la comunidad europea en el libro “Best Practice Projects YearBook”, resume el total y características de todas las centrales mini-hidráulicas instaladas en los años 1997 – 2000 en Europa [European 2000]. En la Tabla 1.2. se enlista el país y el número de centrales mini-hidráulicas instaladas en Europa de 1997 al 2000.

Tabla 1.2.- Centrales Mini-Hidráulicas Instaladas en Europa.		
País	Número de Unidades	Capacidad (kW)
Finlandia	3	215
Francia	5	300 - 2,350
Alemania	1	4,800
Grecia	6	700
Irlanda	1	14
Holanda	1	250
Noruega	7	4.21- 5,000
Portugal	1	7,000
España	2	450 – 1,600
Suecia	3	30 – 250
Reino Unido	1	350

1.1.4. Interconexión

En la mayoría de los casos, un aspecto necesario en la generación distribuida es la interconexión con la red eléctrica, para poder cubrir cualquier eventualidad del sistema de compra o venta de energía eléctrica. Algunos de los aspectos técnicos a considerar en la interconexión son:

- Relevadores de protección.
- Conexión del transformador.
- Sistema de puesta a tierra.
- Coordinación de protecciones y regulación de la tensión de la compañía.
- Equipos de calidad de servicio.
- Conformidad con normas de los convertidores de potencia.
- Monitoreo y control remoto del grupo.
- Mantenimiento preventivo y correctivo periódico.
- Sistema de comunicación entre el operador privado y el controlador de la red de distribución.

El Instituto de Ingenieros Electricistas y Electrónicos (IEEE) de los Estados Unidos contempla la norma eléctrica “IEEE-Standard-1547 – Standard for Distributed Resources Interconnection with Power Systems”, que es de uso exclusivo para normalizar las interconexiones y la operación de los sistemas de generación distribuida [IEEE 1547].

1.1.5. Aplicaciones de la Generación Distribuida

La aplicación de una u otra tecnología en la generación distribuida depende de los requerimientos particulares del usuario. Los arreglos tecnológicos más usuales se citan a continuación:

Carga base. Se utiliza para generar energía eléctrica en forma continua; opera en paralelo con la red de distribución; puede tomar o vender parte de la energía, y usa la red para respaldo y mantenimiento.

Proporcionar carga en punta. Se utiliza para suministrar la energía eléctrica en períodos punta, con lo que disminuye la demanda máxima del consumidor, ya que el costo de la energía en este período es el más alto.

Generación aislada o remota. Se usa el arreglo para generar energía eléctrica en el modo de autoabastecimiento, debido a que no es viable a partir de la red eléctrica (sistema aislado o falta de capacidad del suministrador).

Soporte a la red de distribución. A veces en forma eventual o bien periódicamente, la empresa eléctrica requiere reforzar su red eléctrica instalando pequeñas plantas, incluida la subestación de potencia, debido a altas demandas en diversas épocas del año, o por fallas en la red.

Almacenamiento de energía. Se puede tomar en consideración esta alternativa cuando es viable el costo de la tecnología a emplear, las interrupciones son frecuentes o se cuenta con fuentes de energía renovables.

1.1.6. Beneficios de la Generación Distribuida

El auge de los sistemas de generación distribuida se debe a los beneficios inherentes a la aplicación de esta tecnología, tanto para el usuario como para la red eléctrica. A continuación se listan algunos de los beneficios [Anne-Marie 2001]:

a) Beneficios para el usuario

- Incremento en la confiabilidad.
- Aumento en la calidad de la energía.
- Reducción del número de interrupciones.
- Uso eficiente de la energía.
- Menor costo de la energía (en ambos casos, es decir, cuando se utilizan los vapores de desecho, o por el costo de la energía eléctrica en horas pico).
- Uso de energías renovables.
- Facilidad de adaptación a las condiciones del sitio.
- Disminución de emisiones contaminantes.

b) Beneficios para el suministrador

- Reducción de pérdidas en transmisión y distribución.
- Abasto en zonas remotas.
- Libera capacidad del sistema.
- Proporciona mayor control de energía reactiva.
- Mayor regulación de tensión.
- Disminución de inversión.
- Menor saturación.
- Reducción del índice de fallas.

1.1.7. Aspectos Legales

Aunque en 1992 se abrieron a la inversión privada las actividades de cogeneración, auto-abastecimiento, pequeña producción, producción independiente y exportación e importación de energía eléctrica, la generación distribuida como tal no se cita explícitamente en la Constitución Política de México, ni en sus leyes y reglamentos.

Sin embargo, en las dos últimas se encuentran los instrumentos propios de regulación para las fuentes firmes y renovables de generación de energía eléctrica, que pueden ser aplicables a la modalidad llamada generación distribuida, entre los cuales destacan: contrato de interconexión, contrato de servicio de respaldo, convenio de compra venta de excedentes, convenio de servicios de transmisión, convenio de servicios asociados y contrato de porteo de energía eléctrica [CONAE 2005].

1.2. Objetivos de la Tesis

El presente trabajo aborda el estudio de los sistemas de generación distribuida en base a micro-generadores hidráulicos, con el propósito de analizar la factibilidad de la utilización en regiones puntuales del territorio mexicano de este tipo de sistemas de

generación distribuida, capaces de tomar ventaja y utilizar eficientemente pequeños caudales y caídas de agua para la generación de energía eléctrica mediante micro-turbogeneradores, que hagan posible el suministro de energía eléctrica a poblados, pequeñas industrias y ciudades pequeñas, mediante redes interconectadas para tal propósito.

Para esto se estudian tres metodologías: Análisis de Series de Tiempo, Redes Neuronales e Identificación de Sistemas con Programación Genética, así como la aplicación del método de Monte-Carlo para solucionar el problema de encontrar la mejor condición inicial utilizada para el pronóstico de Series de Tiempo mediante una Red Neuronal, con el propósito de evaluar los aprovechamientos hidroeléctricos de una región puntual y en base a los resultados obtenidos poder determinar si es viable la instalación de un sistema mini-hidráulico, así como la estimación de otros parámetros importantes como lo son el número de micro-unidades de generación en el sistema y su capacidad máxima de generación aún en las condiciones más adversas (temporada de sequía).

Finalmente se estudia y analiza el diseño y comportamiento en estado estacionario y transitorio de las micro-redes de generación distribuida en base a micro-generadores hidráulicos, mediante simulación digital a través de PSCAD/EMTDC.

1.3. Justificación de la Tesis

Actualmente, la energía eléctrica se produce principalmente en grandes centrales eléctricas que emplean derivados del petróleo (combustóleo, gas), carbón, agua o energía nuclear principalmente. Por otra parte el crecimiento de la demanda de energía eléctrica requiere de un suministro oportuno y confiable, lo cual ha conducido a la interconexión de los sistemas eléctricos, lo que constituye la base de la producción centralizada de la energía eléctrica y la interconexión de las redes de transmisión que alimentan a las cargas del sistema.

En el mundo, en la década de los 80's, se tomó conciencia de la protección del medio ambiente, se inició una oferta alternativa de producción de energía eléctrica en base a energías renovables, preferentemente eólica, solar, biomasa y mini-hidráulica, para

complementar la oferta tradicional de producción de la energía eléctrica. Esta evolución se ha acelerado debido al desarrollo de tecnologías más eficientes y a las crisis petroleras que se han agudizado en el mundo entero.

Debido a la gran riqueza de ríos, lagos y mantos acuíferos en nuestro país, se intuye que la producción de energía eléctrica por medio de plantas mini o micro-hidráulicas es una alternativa viable. Por lo que se requiere de una metodología para evaluar la factibilidad de implantación y diseño de este tipo de plantas eléctricas, la cual debe de ser simple pero eficiente para que el tiempo requerido en la elección, evaluación y planeación de este tipo de sistemas sea el más corto posible.

Lo anterior sugiere el desarrollo de una metodología que cumpla con estas expectativas, así como el aportar un caso de referencia del diseño o selección de los componentes más importantes de una micro-red hidráulica de generación. Esto ha conducido al desarrollo de esta tesis.

1.4. Descripción de los Capítulos

En el Capítulo 1 se presenta un panorama general de la generación mini-hidráulica en el mundo: cuales son los países que utilizan esta forma de generación de energía, cómo esta distribuido su potencial y cual es la situación actual en México. Se describen los objetivos principales de la tesis, su justificación y se hace una descripción de los capítulos de que esta constituida la tesis.

En el Capítulo 2 se hace una reseña acerca de los sistemas de generación distribuida, así como las principales tecnologías utilizadas para la generación de la energía eléctrica en este tipo de sistemas; se describe el uso de micro o mini-generadores hidráulicos como una alternativa dentro de la generación distribuida viable para la implantación en nuestro país.

En el Capítulo 3 se estudian algunas metodologías para evaluar los aprovechamientos hidroeléctricos en base a series de tiempo de caudal de pequeños ríos y poder determinar la factibilidad puntual de la instalación de una micro-unidad de generación.

En el Capítulo 4 se analizan y estudian aspectos asociados con el diseño de la obra civil y la selección de los componentes electro-mecánicos que conforman a la planta mini-hidráulica, así como las micro-redes de distribución asociados al sistema de generación, tomando como base las características hidrológicas de la zona bajo estudio.

En el Capítulo 5 se analiza y modela la operación de una micro-red de generación distribuida, tanto en estado estacionario como en estado transitorio. Los resultados son obtenidos con el software PSCAD/EMTDC.

En el Capítulo 6 se presentan las conclusiones finales de esta tesis, las aportaciones realizadas y se proporcionan algunas sugerencias y comentarios para el desarrollo de investigación posterior de sistemas de generación distribuida en base a micro o mini-generadores hidráulicos.

Capítulo 2

Representación de los Micro-generadores Hidráulicos.

2.1. Introducción

Los sistemas hidroeléctricos relativamente pequeños pueden abastecer de energía eléctrica a pequeños poblados. La fuente de agua puede ser un arroyo, un canal u otra forma de corriente que pueda suministrar la cantidad y la presión de agua necesarias, a través de la tubería de alimentación, para establecer la operación del sistema hidroeléctrico.



Figura 2.1. Micro-generador Hidráulico.

Una vez que el agua de un caudal se confina en la tubería de alimentación, es inyectada sobre las aletas de la turbina en el otro extremo. La turbina, a su vez, impulsa el generador (ver Figura 2.1) y se produce energía eléctrica.

Hay tres tipos principales de turbinas; Pelton, Kaplan y Francis respectivamente, siendo del tipo Pelton las más populares debido a su versatilidad para operar en amplios rangos de caudales y presiones, sin embargo, debido a la capacidad y características necesarias en mini-hidráulica, las turbinas Francis son las más comúnmente utilizadas. Típicamente, en hidroenergía se considera que se producirá mayor potencia cuando la presión dinámica (del agua que está siendo usada) es igual a las dos terceras partes de la presión estática (cuando el sistema está cerrado y no hay flujo).

Las pequeñas centrales hidroeléctricas han sido utilizadas en México desde fines del siglo pasado en varios estados de la República Mexicana. No obstante, estas plantas fueron abandonándose por problemas gremiales y de legislación. La Comisión Federal de Electricidad dejó de instalar plantas de pequeñas capacidades desde hace 30 años [PEMH 2005].

2.1.1. Recurso de Energía Mini-hidráulica en México

El potencial hidroeléctrico total nacional actual, se estima en 53.0 GW de potencia eléctrica aprovechable, del cuál se tienen identificados 541 sitios con un potencial aprovechable de 19.6 GW. Según los datos proporcionados por la CFE el potencial hidroeléctrico aprovechado actualmente para generación de electricidad asciende a los 9,121 MW en 77 centrales con una generación anual de poco más de 20,000 GW-h al año [PEMH 2005].

El potencial estimado para centrales con capacidades instaladas menores a los 10 MW se sitúa en los 3,250 MW. Actualmente se han instalado 34 centrales dentro de este rango de capacidad, en los que se ha instalado una capacidad total de 109.0 MW, generándose anualmente 479.0 GW-h. Una tarea importante que se deberá cumplir en breve, a fin de promover el aprovechamiento de estos recursos, es el estudio de la factibilidad técnica y económica de desarrollar proyectos en los distintos sitios identificados.

México cuenta con recursos hidráulicos muy importantes y uno de los grandes retos de las administraciones ha sido aprovechar ese recurso en forma ordenada, sistemática y

óptima. Este recurso puede ser aprovechado por asentamientos humanos, ganadería, agricultura y además aprovechar su potencial como fuente de energía.

El agua, como fuente de energía, es un recurso renovable que no contamina, no produce sub-productos, su utilización como combustible no limita su aprovechamiento para otras aplicaciones, por lo que es un recurso noble que debería ser explotado con más interés para satisfacer necesidades de electrificación en regiones donde se den las condiciones.

A continuación se presenta una relación de los ríos y su escurrimiento en millones de metros cúbicos al año. Esta tabla se puede tomar como una referencia del recurso existente, algunos se explotan para fines de generación energía de eléctrica. Sin embargo, existen recursos hidrológicos ubicados de “baja potencia”, donde es factible la instalación de sistemas micro-hidroeléctricos, que por lo regular se encuentran en la sierra y en las montañas, donde también existen muchos asentamientos humanos con escasos recursos y muy limitados servicios.

Se cuenta con potencial hidrológico de al menos 280,000 millones de metros cúbicos al año. Solo entre los ríos Grijalva, Balsas, Santiago e Ixtapantongo se tiene el 89.7% de la potencia hidroeléctrica total instalada [SAMN 2005], ver Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Recursos Hidráulicos Aprovechables en México.			
Vertiente del Atlántico		Vertiente del Pacífico	
Río	$m^3 \times 10^6$ al año	Río	$m^3 \times 10^6$ al año
Bravo	5,810.00	Colorado	22,000.00
San Fernando	756.00	Concepción	400.00
Soto La Marina	2,171.00	Guaymas	37.00
Tamesí	2,300.00	Yaqui	2,790.00
Panuco	17,300.00	Mayo	937.00
Meztlán	419.00	Fuerte	5,933.00
Tuxpan	4,231.00	Sinaloa	2,176.00
Cazones	2,141.00	Macorito y Culiacán	3,506.00
Tecolutla	7,529.00	San Lorenzo	1,941.00
Nautla	2,465.00	Piactla	2,034.00
Actopan	1,308.00	Presidio	1,779.00

De la Antigua	2,817.00	Baluarte	1,861.00
Jamapa	1,895.00	Acaponeta	1,578.00
Blanco	1,813.00	San Pedro y Mezquita	2,456.00
Papaloapan	39,175.00	Lerma Santiago	11,457.00
Coatzacoalcos	22,395.00	Ameca	3,599.00
Tonala	5,875.00	Purificación	720.00
Grijalva	9,600.00	Cihuatlan	890.00
Macuspana	6,220.00	Armeria	1,200.00
Usumacinta	50,719.00	Coahuayana	1,495.00
Candelaria	1,692.00	Balsas	13,863.00
Champoton	885.00	Papagayo	5,634.00
Hondo	1,274.00	Ometepec	4,459.00

2.1.2. Aprovechamiento del Recurso en México

En México existen dos fuentes principales de generación de energía: la hidroeléctrica y la termoeléctrica. En la Tabla 2.2 se ilustra la distribución del aprovechamiento hidroeléctrico en México [PEMH 2005].

Tabla 2.2. Hidroeléctricas en México.	
Río	% Potencia Hidroeléctrica Total
Grijalva	52.30
Balsas-Santiago	20.60
Ixtapatongo	16.30
Papaloapan	6.40
Yaqui-Mayo	4.40

2.1.3. Distribución de la Capacidad Hidroeléctrica Instalada

Puede explotarse aún 15,000 MW y obtener 140,000 GW-h/año, ver Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Capacidad Hidroeléctrica Instalada en México.	
Cuenca	% del Total
Grijalva-Usumacinta	30
Balsas	12
Papaloapan	7

2.2. Reseña de Sistemas de Generación Distribuida

El éxito de la difusión y fomento de la Generación Distribuida radica en la existencia de tecnologías de punta que permiten, para potencias pequeñas, generar energía eléctrica en forma eficiente, confiable y de calidad. Estas tecnologías se pueden dividir en las de generación y las de almacenamiento (Figura 2.2).

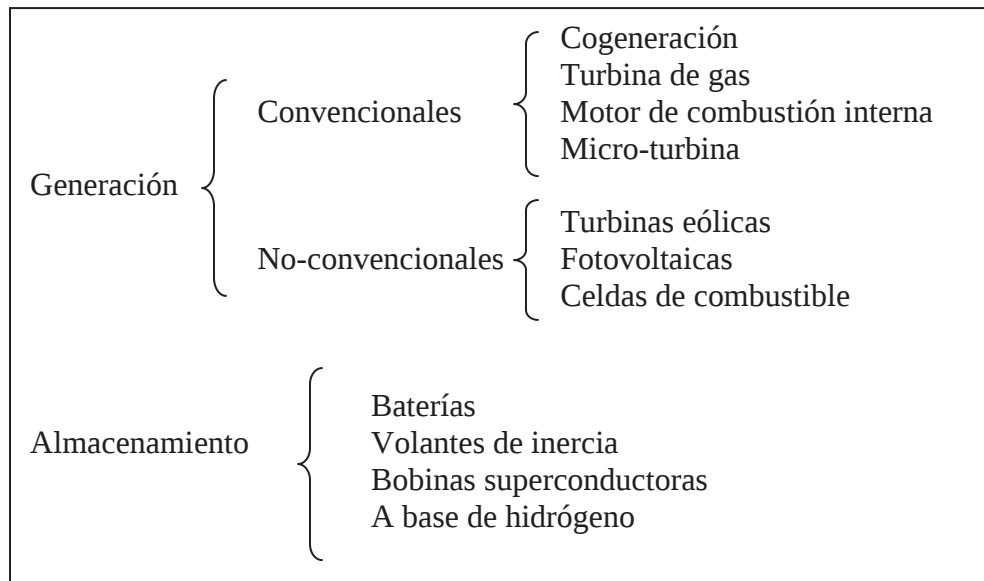


Figura 2.2. Tecnologías Disponibles de Generación Distribuida.

Las tecnologías de generación se dividen, a su vez, en *convencionales* y *no convencionales*. Las primeras incluyen a las turbinas de gas, motores de combustión interna y micro-turbinas. Las segundas se refieren a las energías renovables, como la mini-hidráulica, geotérmica, biomasa, turbinas eólicas, celdas de combustibles y celdas fotovoltaicas.

Las tecnologías de almacenamiento comprenden a las baterías de acumuladores, volantes de inercia, bobinas superconductoras, imanes y almacenamiento a base de hidrógeno. A continuación se da una breve descripción de las más importantes [Chambers 2001].

Co-generación.- Esta tecnología produce en forma secuencial energía eléctrica y térmica, donde esta última es útil a los procesos productivos en forma de un fluido caliente (vapor, agua, gases), obteniendo eficiencias globales de más del 80%. Sus capacidades son muy amplias, debido al hecho de que utiliza todas las tecnologías que abarca la Generación Distribuida.

Turbina de gas.- El combustible suele ser gas natural, aunque puede emplearse gas LP o diésel. Sus capacidades van de 265 kW a 50,000 kW, permiten obtener eficiencias eléctricas del 30% y eficiencias térmicas del 55%, los gases de combustión tienen una temperatura de 600 °C, ofrecen una alta seguridad de operación, tienen un bajo costo de inversión, el tiempo de arranque es corto (10 minutos) y requieren un mínimo de espacio físico. Por otro lado, los gases de combustión se pueden utilizar directamente para el calentamiento de procesos, o indirectamente para la generación de vapor o cualquier otro fluido caliente.

Motor de combustión interna.- Utilizan diésel, gasóleo o gas natural; existen en capacidades de 15 kW a mayores de 20,000 kW, alcanzan eficiencias eléctricas del orden del 40% y eficiencias térmicas cercanas al 33%, su temperatura de gases de combustión es de 400 °C, tienen un bajo costo de inversión, una vida útil de 25 años, alta eficiencia a baja carga, consumo medio de agua, poco espacio para instalación, flexibilidad de combustibles y su crecimiento puede ser modular.

Micro-turbinas de gas o combustibles.- Estas constituyen una tecnología reciente de Generación Distribuida, ya que exceptuando a algunos fabricantes, el mercado está a varios años de su comercialización total. Las micro-turbinas tienen cuatro modos distintos de operación: aisladas de la red eléctrica, conectadas a la red, en paralelo con exportación de energía y de modo continuo o intermitente a la misma.

Sus principales características son: rango de 15 kW a 300 kW en una sola unidad, frecuencia de 1,600 Hz, mantenimiento mínimo, sus unidades ocupan muy poco espacio, son ligeras, operan sin vibración, prácticamente no hacen ruido, operan de 40,000 a 75,000 horas y pueden utilizar como combustible, además del gas natural, el keroseno, gasolina, etanol, diésel, propano, y biomasa. Una de sus principales características en el caso de micro-turbinas de gas, es la reducción de emisiones contaminantes: 9 partes por millón (ppm) de NO_x, 40 ppm de CO y emisiones totales de hidrocarburos por debajo de las 9 ppm.

Mini-turbinas Hidráulicas.- Utilizan los mismos principios que las turbinas utilizadas en centrales hidráulicas de gran escala, solo con pequeñas adecuaciones al flujo y potencia del generador requerido.

Celdas Fotovoltaicas.- Las celdas fotovoltaicas convierten la energía de los fotones de la luz solar en electricidad. Para esto se requiere de grandes extensiones de terreno para captar una gran cantidad de luz solar y convertirla en una potencia eléctrica significativa. Con la ventaja de que no se tiene costo alguno por la utilización de combustible. Hasta la fecha este tipo de celdas se ha utilizado en zonas donde no se tienen redes de distribución de energía eléctrica y es más barata la instalación de este tipo de unidades, que cualquier otro tipo de unidades disponibles, como lo son los generadores en base a gasolina o diesel.

Este tipo de sistemas es altamente atractivo ya que no presentan emisiones contaminantes, no utiliza combustibles fósiles, tienen un costo de mantenimiento aceptable, excepto donde involucra el uso de baterías. Pero también se debe de considerar el precio por cada panel de celdas fotovoltaicas que en la mayoría de los casos es elevado. Además de que este tipo de generación es temporal, por lo que se necesita de otro equipo como lo son baterías.

Celdas Combustibles.- Una celda combustible es un dispositivo en el cual hidrógeno y oxígeno son combinados sin necesidad de combustión para producir electricidad en presencia de un catalizador.

Este tipo de celdas ofrecen una importante solución en la generación de energía eléctrica donde las especificaciones ambientales son estrictas. El costo de este tipo de unidades es elevado, al igual que el costo de mantenimiento. Además de que presentan variaciones de voltaje que para algunos equipos resulta inaceptable.

Baterías.- Son, entre otros, los acumuladores convencionales de plomo-ácido y las de Níquel-Cadmio, que presentan una densidad de energía almacenada del orden de 30 Wh/kg. Existen varios tipos de baterías en desarrollo, como las de Sodio-Azufre que alcanzan valores de densidad de 60 a 150 Wh/kg, las de Zinc-Aire, con valores de 80 a 100 Wh/kg y las de flujo (redox) o pilas de combustible regenerativas, que son las de Zinc-Bromo-Cloro y las de Bromuro de Sodio-Polisulfuro de Sodio.

Volantes de inercia.- Existen volantes de baja velocidad (7,000 rpm) y de acero de alta resistencia, que es de 55 Wh/kg. Los volantes avanzados son de fibra de alta resistencia y baja densidad, giran a alta velocidad (más de 50,000 rpm) llegando a valores de hasta 350 Wh/kg.

Bobinas superconductoras.- Mediante esta tecnología, la energía se almacena en forma de campo electromagnético, el cual es creado por la acción de bobinas superconductoras. Los materiales superconductores pueden ser de baja temperatura, del orden de los 4 °K, o de alta temperatura, 77 °K.

2.3. Referencia hacia Micro-generadores Hidráulicos

Para el caso de generación de energía las turbinas se clasifican en dos grupos: las turbinas de reacción y las de impulso. En el sentido estricto, puede decirse que todas las turbinas trabajan bajo una combinación de impulso y reacción, existiendo una acción preponderante sobre el rodete.

Cuadro de clasificación general de las turbinas:

Por la patente:	Pelton
	Francis
	Hélice (alabes fijos)
	Kaplan (alabes móviles)
	Reiffenstein (rodete Francis o Kaplan sin distribuidor)
	Bulbo (Rodete Kaplan, sin espiral de alimentación)
Por la forma de transmisión de la energía:	Impulso (presión constante = presión atmosférica)
	Reacción (presión variable $\neq$ presión atmosférica)
Por la dirección del chorro del rodete:	Axiales (entrada paralela al eje)
	Radiales (entrada según el radio del rodete)
	Radioaxiales (entrada oblicua al eje)
	Tangenciales (entrada tangencial al rodete)
Por la posición del eje:	Vertical (plano del rodete horizontal)
	Horizontal (plano del rodete vertical)
	Inclinada
Por el tipo de instalación:	Sencilla (un solo rodete por eje)
	Múltiple (varios rodetes en un mismo eje)

Debido a que es más común clasificar a las turbinas por su patente, a continuación se presentan las características más relevantes de cada una de las más comunes [RETSscreen 2004]:

Pelton:

Es una turbina de impulso y de acción tangencial. El agua es dirigida al rodete por medio de chiflones, la cual si es tipo horizontal podrá tener uno o dos chiflones, pero si es vertical podrá tener hasta ocho. Trabaja con cargas altas, 150 y 2,200 *m*, pero con gastos muy bajos, menores a los 30 m^3/s . Esta sometida a presión atmosférica, por lo que no podrá ser sumergida.

En caso de variación en el gasto, la eficiencia no se altera, pero es más sensible a los cambios de carga.

Francis:

Es una turbina de reacción, radioaxial, generalmente centrípeta. Alabes móviles permiten ser accionados por el regulador de la turbina para variar el gasto y tomar cambios en la demanda. Alabes de rodete fijo para cargas bajas y medias de 25 a 380 *m* aproximadamente y gastos del orden de 30 a 200 m^3/s . Presión variable desde la entrada del rodete hasta abandonar el tubo de aspiración. La eficiencia es sensible tanto a la variación del gasto como a la carga. Generalmente es vertical.

Kaplan:

Es una turbina de reacción, radioaxial. Los alabes se mueven automáticamente al variar las condiciones de operación, lo que hace que la eficiencia se mantenga prácticamente constante durante el funcionamiento. Esta diseñada para grandes gastos, 500 m^3/s o más, pero para cargas menores a los 80 *m*.

Hélice:

Es una turbina de reacción, radioaxial, centrípeta de alabes fijos, diseñada para grandes gastos, hasta 500 m^3/s y cargas bajas, menores a 30 *m*, aproximadamente y de presión variable. Esta fue la primera versión de turbina inventada por Víctor Kaplan.

El rendimiento de este tipo de turbinas se encuentra del orden del 90% como mínimo y típicamente de 93%.

2.3.1. Configuración de un Sistema Mini-hidroeléctrico

Para las centrales mini-hidroeléctricas se utilizan turbinas de tipo Pelton y Francis. Las potencias típicas van de 300 watts hasta 1 megawatt. En este tipo de sistemas, la obra electromecánica puede representar entre el 15 y el 35 % del costo total de la obra, el resto es obra civil y mano de obra.

Un factor importante dentro de proyectos de electrificación rural, es el costo por fletes y traslado del personal a sitios donde regularmente no hay un fácil acceso.

En la Figura 2.3, se representan las principales partes de un sistema mini-hidroeléctrico:

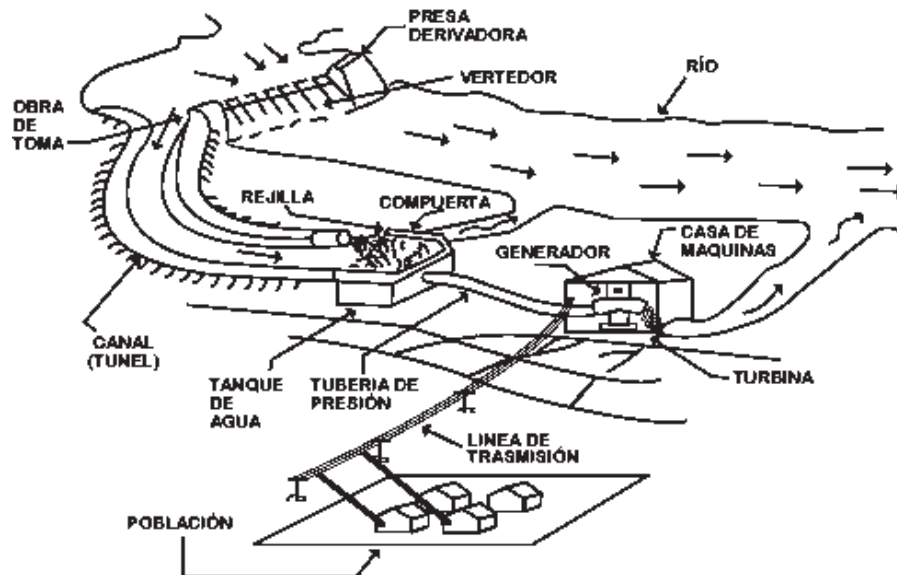


Figura 2.3. Sistema Hidráulico Típico.

Un sistema mini-hidroeléctrico (Figura 2.3) podrá tener la obra de toma con un vaso-cortina-túnel de conducción cuando es preciso contar con un almacenamiento de agua para las épocas de estiaje, pero también puede ser con un canal de conducción si el gasto del río de suministro es constante todo el año. Los cálculos de los canales de conducción, obra de toma y desfogue son partes muy importantes de un sistema y puede significar que el sistema opere o no. Siempre se deberán efectuar cálculos precisos de flujos, presiones y velocidades. Cuando se requiere de una cortina para almacenaje del agua en un vaso, será muy importante la evaluación del nivel de agua mínimo de operación, el nivel de agua máximo operación y el nivel de aguas máximas extraordinarias.

En cuanto a la instalación eléctrica, es importante que cuente con sistema de control y regulación. Cuando una mini-hidroeléctrica está operando, esta energía es entregada al sistema de distribución, haya o no cargas conectadas. Esta energía tiene que ser descargada de alguna forma sino hay demanda en un momento dado. Por ello que se disipan los excedentes mediante una resistencia en forma de calor, la cual podrá ser aprovechada para algún proceso de calefacción o refrigeración.

Se puede deducir que los términos de referencia para la evaluación preliminar de sistema mini-hidroeléctrico son: la altura de la caída de agua, mejor conocida como salto y el gasto en metros cúbicos sobre segundo. De ahí se derivan todos los cálculos.

2.4. Conclusiones

En este capítulo se presentaron las principales tecnologías utilizadas dentro la generación distribuida, así como una descripción generalizada de cada una de ellas. Este tipo de tecnologías se caracteriza principalmente por ser de pequeña capacidad de potencia y en algunos de los casos hacer uso de energías renovables.

El avance tecnológico de los últimos años ha permitido que este tipo de tecnologías sean cada vez más económicas y que los gastos por concepto de mantenimiento sean menores, comparados con tecnologías de generación de energía eléctrica convencionales utilizados actualmente. Además, debido a que son de muy poca capacidad, se pueden instalar en lugares donde exista algún recurso natural disponible, como pequeñas caídas de agua o recursos geotérmicos.

Actualmente el uso de turbinas hidráulicas de muy baja capacidad de potencia (micro-turbinas) es una de las tecnologías más atractivas y que se encuentran plenamente desarrolladas y comercializadas. Por ello esta tesis se enfoca a la utilización de este tipo de tecnología dentro de los sistemas de generación distribuida.

Dentro de la gran variedad de tecnologías existentes en Generación Distribuida y considerando las características geográficas de nuestro país (principalmente en el centro y sur del país) se intuye que la generación mini-hidráulica tendrá un gran crecimiento en los próximos años.

Capítulo 3

Estudios de Factibilidad de Aplicación de Micro-generadores Hidráulicos y Micro-redes de Generación.

3.1. Introducción

Es necesario establecer un estudio de factibilidad para conocer la viabilidad de diseñar e implementar un sistema, definiendo al mismo tiempo los principales elementos del sistema; donde factibilidad se refiere a la disponibilidad de los recursos necesarios para llevar a cabo los objetivos o metas señalados. La factibilidad se apoya en tres aspectos básicos [Tutorial ITLP 2004]:

- Operativo.
- Técnico.
- Económico.

El éxito de un proyecto esta determinado por el grado de factibilidad que se presente en cada una de los tres aspectos anteriores.

Además, los estudios de factibilidad sirven para recopilar datos relevantes sobre el desarrollo de un proyecto y en base a ello tomar la mejor decisión, contando con los elementos necesarios para decidir si procede su estudio, desarrollo o implementación.

3.1.1. Factibilidad Operativa

- Operación garantizada.
- Uso garantizado.

Se refiere a todos aquellos recursos donde interviene algún tipo de actividad o proceso, esta depende de los recursos humanos que participen durante la operación del proyecto. Durante esta etapa se identifican todas aquellas actividades que son necesarias para lograr el objetivo, se evalúa y determina todo lo necesario para llevarla a cabo.

3.1.2. Factibilidad Técnica

- Mejora del sistema actual.
- Disponibilidad de tecnología que satisfaga las necesidades.

Se refiere a los recursos necesarios adicionales como herramientas, conocimientos, habilidades, experiencia, etc., los cuales son necesarios para efectuar las actividades o procesos que requiere el proyecto. Generalmente se refiere a elementos tangibles. El proyecto debe considerar si los recursos técnicos actuales son suficientes o deben complementarse.

3.1.3. Factibilidad Económica

- Tiempo del analista.
- Costo de estudio.
- Costo del tiempo del personal.
- Costo del tiempo.
- Costo del desarrollo / adquisición.

Se refiere a los recursos económicos y financieros necesarios para desarrollar o llevar a cabo las actividades o procesos. Como recursos básicos que deben considerarse son el costo del tiempo, el costo de la realización y el costo de adquirir nuevos recursos.

Generalmente, la factibilidad económica es el elemento más importante ya que a través de él se solventan las demás carencias de otros recursos; es lo más difícil de conseguir y requiere de actividades adicionales cuando no se posee.

3.2. Presentación de un Estudio de Factibilidad

Un estudio de factibilidad requiere ser presentado con todas la posibles ventajas para la empresa u organización, pero sin descuidar ninguno de los elementos necesarios para que el proyecto funcione. Por esto, los estudios de factibilidad se complementan con dos pasos necesarios en la presentación del estudio:

- Requisitos Óptimos.
- Requisitos Mínimos.

El primer paso se refiere a presentar un estudio con los requisitos óptimos que el proyecto requiera, es decir, estos elementos deberán ser los necesarios para que las actividades y resultados del proyecto sean obtenidos con la máxima eficacia.

El segundo paso consiste en un estudio de requisitos mínimos, el cual cubre los requisitos mínimos necesarios que el proyecto debe ocupar para obtener las metas y objetivos. Este paso trata de hacer uso de los recursos disponibles de la empresa para minimizar cualquier gasto o adquisición adicional.

Un estudio de factibilidad generalmente debe representar gráficamente los gastos y los beneficios que acarreará la puesta en marcha del sistema, para tal efecto se hace uso de la curva costo-beneficio.

3.3. Metodología para Evaluar la Factibilidad en un Sistema Mini-hidráulico

Para el caso de sistemas mini-hidráulicos, se establece un procedimiento general para determinar un potencial aprovechable dentro de una zona determinada. Esta metodología se divide en los siguientes pasos:

a) Localización de sitios.

La localización de los sitios para proyectos mini-hidráulicos, el cuál identifica tres puntos fundamentales sobre el río considerado:

- El sitio donde es viable construir la obra de captación de agua.
- El sitio donde es viable construir el tanque de carga e inicio de la tubería a presión.
- El sitio donde es viable ubicar la casa de máquinas.

b) Definición de las características de los proyectos.

Una vez establecidos los puntos antes mencionados, prácticamente quedan definidas las características del proyecto a estudiar: las dimensiones de la boquilla determinan la geometría de la presa alpina o vertedora sobre el cauce del río, el trazo y longitud de la conducción, la cota del tanque de carga, el trazo y desarrollo de la tubería a presión, la ubicación y cota de la casa de máquinas.

Otro aspecto importante para la localización es el área de la sub-cuenca, de manera que el proyecto propuesto capten un escurrimiento que permita obtener las potencias y generaciones congruentes con el presente estudio.

c) Obtención del área de cuenca.

Las áreas de las cuencas o áreas de escurrimiento representan la posible cantidad de captación de agua hasta el sitio de la boquilla. Se comienza por trazar el “parteaguas” de la cuenca por aprovechar. Este parteaguas lo define la topografía de las montañas circundantes al sitio de la boquilla. En teoría, una gota de lluvia que caiga sobre el parteaguas se dividirá: 50% se dirigirá hacia la cuenca en estudio y el restante 50% hacia otras cuencas aledañas. El área interior del parteaguas define el área de la cuenca y se mide en kilómetros cuadrados.

d) Estación(es) hidrométrica(s).

Las estaciones hidrométricas son de gran utilidad para este tipo de estudios. Ellas registran periódicamente el gasto que llevan los principales ríos de cualquier región de la República Mexicana. Para el desarrollo de este trabajo se cuenta con los datos históricos de 16 estaciones hidrométricas. Tales registros abarcan períodos del orden de 20 años, y en la gran mayoría sólo se tiene información hasta 1985.

La metodología en este caso consiste en localizar la estación hidrométrica con influencia más cercana en el proyecto o río seleccionado, por lo general, aguas abajo del punto de captación (boquilla).

e) Cálculo gasto promedio y pronóstico de caudal a futuro.

En base a los datos obtenidos de la estación hidrométrica, se forma la serie de tiempo que representa la variación de caudal a lo largo del tiempo. A esta serie de tiempo se le aplican técnicas de pronóstico con el propósito de obtener el comportamiento a futuro del caudal y en base a los resultados obtenidos calcular la potencia aprovechable en el sitio seleccionado.

f) Cálculo de potencia y generación media anual.

Una vez determinado el gasto en el sitio del proyecto, es posible conocer su potencia y generación media anual con base en la siguiente ecuación [ITDG 1996]:

$$GMA = \frac{9.81 Q_m H \eta 8760}{1 \times 10^6} \quad (3.1)$$

ó

$$GMA = \frac{9.81 Q_I H \eta 8760 f.p.}{1 \times 10^6} \quad (3.2)$$

Donde:

GMA Generación Media Anual, en Gigawatts-hora

Q_m Gasto medio anual, en m^3/s

Q_I Gasto a instalar, en m^3/s

H Caída estática, en m

η Eficiencia, en %

$f.p$ Factor de planta

8760 Número de horas al año

9.81 Factor de conversión de kgf-m/s a kW

1×10^6 Factor de conversión de kW a GW

Tomando en cuenta que estas pequeñas centrales son al “hilo del agua”, es decir, que no cuentan con una obra importante de regulación del gasto, el factor de planta en la práctica es muy cercano a la unidad. Esto es que el gasto medio anual (Q_m) sea igual al gasto a instalar (Q_I).

g) Esquema general de los aprovechamientos.

El esquema general considerado en los proyectos consta de los siguientes elementos:

- Obra de captación
- Canal o túnel de conducción
- Tanque de carga
- Tubería a presión
- Central hidroeléctrica

Obra de captación. El diseño hidráulico de estas estructuras se basa en el criterio de que sean competentes para dejar pasar cuando menos la avenida de diseño, aplicándose la fórmula para descarga libre en vertedores [ITDG 1996]:

$$Q = CLH^{1.5} \quad (3.3)$$

Donde:

C Coeficiente de descarga

L Longitud de cresta vertedora

H Carga hidráulica sobre la cresta vertedora

Canal o túnel de conducción. Tienen la capacidad de conducir el gasto medio anual. Los túneles permiten reducir la longitud de desarrollo de los canales de conducción. Para el caso de centrales mini-hidráulicas típicamente se considera: sección rectangular o circular de concreto, pendiente media de 0,002 y 0,0015 milésimas, respectivamente y un coeficiente de rugosidad n igual a 0,013.

Aplicando las fórmulas de Manning y de continuidad [ITDG 1996], se tiene:

$$V = \frac{r^{0.6667} s^{0.5}}{n} \quad (3.4)$$

Donde:

V Velocidad media, en m/s

n Coeficiente de rugosidad de Manning = 0,013

s Pendiente del canal, en milésimas

r Radio hidráulico = Área / Perímetro mojado, en m

$$Q = Av \quad (3.5)$$

Donde:

A Área de la sección del canal, en m^2

v Velocidad media normal a la sección del canal, en m/s

Tanque de carga. Esta estructura tiene las siguientes funciones:

- a) Permitir que la velocidad del agua en la obra de toma del tanque sea de 1 m/s .
- b) En caso de mantenimiento o reparación de las turbinas, desviar el flujo a través de un vertedor de descarga lateral con capacidad para verter el gasto de entrada por el canal de conducción.
- c) Tener la capacidad de llenar la tubería a presión.
- d) Mantener sumergida la tubería en la obra de toma, evitando así la entrada de aire a la tubería a presión.

El volumen de agua en el tanque servirá para amortiguar las ondas de presión (golpe de ariete), causadas por el cierre brusco de las turbinas y así restablecer rápidamente la estabilidad.

Para obtener la dimensión de los tanques de carga se sigue el procedimiento que se describe a continuación [Penche 1998]:

1. Se toman en cuenta el gasto medio anual de cada proyecto, el tirante en el canal a la llegada al tanque, la carga hidráulica y la longitud de la tubería.
2. Se considera la velocidad económica para la tubería a presión.
3. Por norma, la profundidad del tanque se fija en tres veces el diámetro económico de la tubería a presión.
4. El tiempo de vaciado será el cociente del volumen de agua en la tubería y el producto de la velocidad en la tubería por el área interior en la tubería.

5. El volumen de la cámara de carga será el producto que resulte del gasto por el tiempo de vaciado por un factor de 0,6, éste indica que el tanque quedará siempre al 40% de su capacidad.
6. El área del tanque será el cociente del volumen de la cámara de carga y la profundidad del tanque.
7. La longitud total del tanque será la suma de las longitudes del tanque amortiguador, el vertedor y la cámara de carga.

Tubería a presión. Su función es conducir el agua desde el tanque de carga hasta las turbinas y se calcula con el criterio del diámetro económico.

Central hidroeléctrica. Es la obra civil que aloja al equipo turbogenerador y se considera un esquema típico, ya que el rango de dimensiones de los equipos no es muy amplio.

Equipo electromecánico. El equipo electromecánico está constituido por la turbina, generador, transformador de potencia, controles y subestación.

Línea de transmisión. Es la línea que parte de la central hasta la carga o consumidores. Su voltaje está en función de la potencia instalada en la central. Los voltajes que se tienen son 6, 13,8, 34,5, 69 y 115 kV.

h) Volumen de obra.

Con las características físicas de las estructuras definidas, se cuantifican los volúmenes de obra, esto en base a los precios vigentes y equipo seleccionado.

i) Evaluación económica.

Con la finalidad de evaluar económicamente los proyectos, se calculan los costos del kilowatt instalado y kilowatt-hora nivelado, con base en los siguientes parámetros:

1. Año de inicio de la construcción
2. Año de terminación de la construcción (típico 1 año)
3. Año de inicio de operación (típico 2 años)
4. Vida útil del proyecto (típico 30 años)
5. Flujo de inversión para un año (variable para cada proyecto)
6. Generación media anual (variable para cada proyecto)
7. Potencia total instalada (variable para cada proyecto)
8. Costo por operación y mantenimiento (variable para cada proyecto)
9. Tasa anual de descuento (típico 10% anual)

Con base en la información económica, se hace una evaluación de cada proyecto para determinar su factibilidad, calculando el costo unitario de la generación, el kilowatt-hora nivelado, la relación beneficio/costo y el tiempo de recuperación del capital.

j) Cartera de proyectos viables.

Si se cuenta con uno o más proyectos, se procede a jerarquizarlos en base en su relación beneficio/costo. Generalmente esta en función de la generación media anual.

3.4. Necesidad de Micro-redes de Generación Distribuida

La generación de energía eléctrica a pequeña escala, constituye una alternativa a la solución del problema de suministro de energía en regiones aisladas, especialmente en los países en vías de desarrollo, constituyéndose así en una de las bases principales para la electrificación rural, y en muchos de los casos como fuente alternativa de generación propia para industrias.

Sin embargo, es frecuente que durante la planeación se incurra en prolongados periodos de estudio, lo cual se traduce en un elevado costo del proyecto, un mayor tiempo de elección y evaluación de la factibilidad de implantación de sistemas de generación distribuida, como lo es la micro o mini-hidráulica.

Para que los proyectos puedan ser identificados, diseñados y ejecutados en un periodo de tiempo más corto posible para satisfacer cierta demanda eléctrica, se requiere de la adopción de una metodología apropiada que sea considerablemente más simple pero a su vez eficiente que las utilizadas en los grandes proyectos mini-hidráulicos.

De este modo, la selección de un esquema hidroeléctrico más conveniente garantizará una operación adecuada de la pequeña central y posibilitará la obtención del máximo beneficio del proyecto en sus aspectos técnico, económico y social.

3.5. Factibilidad Puntual de Implantación de Redes de Generación Distribuida

Un aspecto importante en la implantación de un sistema mini-hidráulico es el evaluar el potencial hidroenergético de un lugar escogido previamente. Este estudio ilustra como el caudal de agua varía a lo largo del año, donde se debe tomar el agua para obtener su máximo aprovechable. Además se obtiene cuánta es la potencia disponible que se puede obtener del caudal de agua, así como los límites máximo y mínimo de potencia aprovechable.

En base a los datos de mediciones de escurrimientos mensuales de agua, se aplicarán algunas metodologías para pronosticar el comportamiento del caudal en los años correspondientes a la vida útil de una miniplanta hidráulica, para con ello poder obtener la potencia aprovechable del río bajo estudio. En base a los resultados obtenidos será posible determinar la factibilidad puntual de la instalación de una o varias micro-unidades de generación hidráulicas.

3.5.1. Aplicación de Series de Tiempo

Se denominan Series de Tiempo a un conjunto de mediciones de cierto fenómeno o experimento registrado secuencialmente en el tiempo. El primer paso para analizar una serie de tiempo es graficarla, para permitir identificar la tendencia, la estacionalidad y las

variaciones irregulares (componente aleatoria) del recurso energético. Un modelo clásico para una serie de tiempo puede ser expresada como suma o producto de tres componentes: tendencia, estacional y un término de error aleatorio [Brockwell 1990].

3.5.1.1. Algunos Modelos de Pronóstico de Series de Tiempo

El *pronóstico* es un proceso de estimación de un acontecimiento futuro proyectando datos del pasado. Éstos se combinan sistemáticamente en forma predeterminada para hacer una estimación del futuro.

La *predicción* es un proceso de estimación de un suceso futuro basándose en consideraciones subjetivas diferentes a los simples datos provenientes del pasado; estas consideraciones subjetivas no necesariamente deben combinarse de una manera predeterminada. Es decir, cuando no existen datos del pasado, se requiere una predicción, y de lo contrario, se necesita un pronóstico.

El *pronóstico* es la base de la planificación de cualquier sistema a largo plazo. Para el caso de estudio de factibilidad y diseño de un sistema mini-hidráulico es necesario conocer el comportamiento que tendrán las variables hidráulicas en el futuro, las cuales son la base en la selección y diseño de los equipos, obra civil y vida útil de la planta mini-hidráulica.

Se debe tener presente que un pronóstico perfecto suele ser *imposible*. Es por ello que es fundamental revisar y actualizar continuamente los pronósticos con base en los datos más recientes, lo que se logra con un sistema flexible de planificación de la producción o demanda.

Podemos diferenciar dos tipos de pronósticos: *pronósticos detallados* para un proceso o sistema en específico cuyo comportamiento se requiere conocer a corto plazo, y en el otro extremo se requieren *pronósticos globales* para conocer el comportamiento del sistema en un horizonte de tiempo mucho más lejano. Se deben utilizar diferentes horizontes de tiempo según la información que se necesite para los distintos tipos de decisiones de planeación.

Los pronósticos se pueden clasificar en cuatro tipos básicos: *cualitativos, análisis de*

series de tiempo o cuantitativos, relaciones causales y simulación.

Las *técnicas cualitativas* son de carácter subjetivo y se basan en estimaciones y opiniones. El análisis de series de tiempo se basa en la idea de que se pueden usar los datos del pasado para realizar pronósticos. Los pronósticos causales suponen que los datos están relacionados con uno o más factores subyacentes del ambiente. Los modelos de simulación permiten al pronosticador recorrer una gama de suposiciones sobre la condición del pronóstico.

A continuación se presentan los modelos más comúnmente utilizados para pronósticos cuantitativos [Montgomery 1990]:

- **Promedio Móvil Simple:** Se promedia un periodo que contiene varios puntos de datos, dividiendo la suma de los valores de los puntos entre el número de puntos. Así, cada punto tiene la misma influencia.

$$PMS = \frac{\sum_{t=1}^n Y_t}{n} \quad (3.6)$$

Donde:

PMS Promedio móvil simple.
 n Número de datos total.
 t Número de dato.
 Y_t Dato t -ésimo.

- **Promedio Móvil Ponderado:** Ciertos puntos se ponderan más o menos que otros, según se considere conveniente de acuerdo con la experiencia.

$$PMP = \frac{\sum_{t=1}^n C_t Y_t}{n} \quad (3.7)$$

Donde

PMP Promedio móvil ponderado.

C_t Ponderación, definida como:

$$0 \leq C_t \leq 1.0 \quad (3.8)$$

$$\sum_{t=1}^n C_t = 1.0 \quad (3.9)$$

- **Suavizamiento Exponencial:** Los puntos de datos más recientes tienen mayor peso; este peso se reduce exponencialmente cuanto más antiguos son los datos. El modelo básico de suavizamiento exponencial se puede expresar de la siguiente forma:

$$\hat{Y}_{t+1} = \alpha Y_t + (1 - \alpha) \hat{Y}_t \quad (3.10)$$

Donde:

$\hat{Y}_{t+1}$ Nuevo valor suavizado (pronóstico).

α Constante de atenuación ($0 < \alpha < 1$).

Y_t Nueva observación o valor real de la serie en el periodo t .

$\hat{Y}_t$ Valor atenuado anterior o experiencia promedio de la serie atenuada al periodo $t - 1$.

Mediante manipulación algebraica esta ecuación se puede expresar también como:

$$\hat{Y}_{t+1} = \hat{Y}_t + \alpha(Y_t - \hat{Y}_t) \quad (3.11)$$

Entonces, el suavizamiento exponencial es simplemente el pronóstico previo adicionado con α número de veces el error en el pronóstico anterior. La constante de atenuación α sirve como el factor para ponderar, en tanto que el valor real de α determina el grado hasta el cual la observación más reciente puede influir en el valor del pronóstico.

Como caso particular de utilización más común de esta técnica en el pronóstico de series de tiempo se encuentra el modelo de suavizamiento exponencial de Holt – Winters [Davis 2003], el cual ajusta los pronósticos de la serie de acuerdo a la tendencia y a la estacionalidad de la misma. Las cuatro ecuaciones que emplea el modelo de Holt – Winters mencionado son:

a) La serie exponencial suavizada

$$A_t = \alpha \frac{Y_t}{S_{t-L}} + (1-\alpha)(A_{t-1} + T_{t-1}) \quad (3.12)$$

b) La estimación de la tendencia

$$T_t = \beta(A_t - A_{t-1}) + (1-\beta)T_{t-1} \quad (3.13)$$

c) La estimación de la estacionalidad

$$S_t = \gamma \frac{Y_t}{A_{t-1}} + (1-\gamma)S_{t-L} \quad (3.14)$$

d) El pronóstico de p periodos en el futuro

$$\hat{Y}_{t+p} = (A_t - pT_t)S_{t-L+p} \quad (3.15)$$

Donde

- A_t nuevo valor suavizado (pronóstico).
- α constante de atenuación.
- Y_t nueva observación o valor real de la serie en el periodo t .
- S_t estimación de la estacionalidad.
- T_t estimación de la tendencia.
- β constante de atenuación de la estimación de la tendencia ($0 < \beta < 1$).
- γ constante de suavizamiento de la estimación de la estacionalidad ($0 < \gamma < 1$).

p periodos a estimar en el futuro.
 L longitud de la estacionalidad.

- **Análisis de Regresiones:** Ajusta una línea recta a datos pasados, por lo general relacionando el valor del dato con el tiempo. El método de ajuste más común es el de mínimos cuadrados [Davis 2003]. Suponiendo que existe una relación lineal entre un tiempo Y_{t+1} y Y_t :

$$Y_{t+1} = aY + b \quad (3.16)$$

Donde

a, b Parámetros del modelo a ser determinados y que pueden ser determinados mediante las expresiones:

$$a = \frac{n \sum Y Y_{t+1} - \sum Y \sum Y_{t+1}}{n \sum Y^2 - (\sum Y)^2} \quad (3.17)$$

$$b = \frac{\sum Y_{t+1} - a \sum Y}{n} \quad (3.18)$$

- **Técnica Box Jenkins:** En 1976, Box y Jenkins publicaron el libro Time Series Analysis. Forecasting and Control [Box-Jenkins 1994], en el cual mencionan cuatro aplicaciones prácticas del pronóstico de series de tiempo: planeación económica y financiera, planeación de la producción, control de inventarios y producción, y control y optimización de procesos industriales.

El método de Box-Jenkins consiste en extraer los movimientos predecibles de los datos observados. La serie de tiempo se descompone en varios componentes, algunas veces llamados “filtros”, precisamente porque la filosofía del método consiste en detectar las distintas componentes usando los filtros correspondientes, hasta obtener residuales no predecibles cuyo comportamiento tiene poca influencia en el resultado final. El enfoque de Box-Jenkins hace principalmente uso de tres filtros lineales: el auto-regresivo, el de integración y el de medias móviles (Figura 3.1).

- Modelos Auto-regresivos: Realiza el pronóstico en base a una función lineal que representa los valores del pasado.

$$Y_t = \phi_1 Y_{t-1} + \phi_2 Y_{t-2} + \dots + \phi_n Y_{t-n} + a_t \quad (3.19)$$

Donde

- ϕ Componente n -ésima del operador autoregresivo.
 a_t Componente de ruido blanco.

- Modelos de Medias Móviles: Realiza el pronóstico en base a una combinación lineal de los errores del pasado.

$$Y_t = \theta_1 Y_{t-1} + \theta_2 Y_{t-2} + \dots + \theta_n Y_{t-n} + a_t \quad (3.20)$$

Donde

- θ Componente n -ésima del operador de media móvil.

- Modelos Auto-regresivos-Medias Móviles: es la combinación de los dos métodos anteriores.

$$Y_t = \phi_1 Y_{t-1} + \phi_2 Y_{t-2} + \dots + \phi_n Y_{t-n} + a_t + \theta_1 Y_{t-1} + \theta_2 Y_{t-2} + \dots + \theta_n Y_{t-n} \quad (3.21)$$



Figura 3.1. Diagrama de Enfoque Box-Jenkins.

El proceso iterativo de Box-Jenkins para construir modelos lineales de series de tiempo consiste en cuatro pasos:

1. Identificación de las especificaciones.
2. Estimación de los parámetros.
3. Diagnóstico de la adecuación del modelo.

4. Pronóstico de realizaciones futuras.

En la Figura 3.2 se ilustra un diagrama funcional del método de Box-Jenkins:

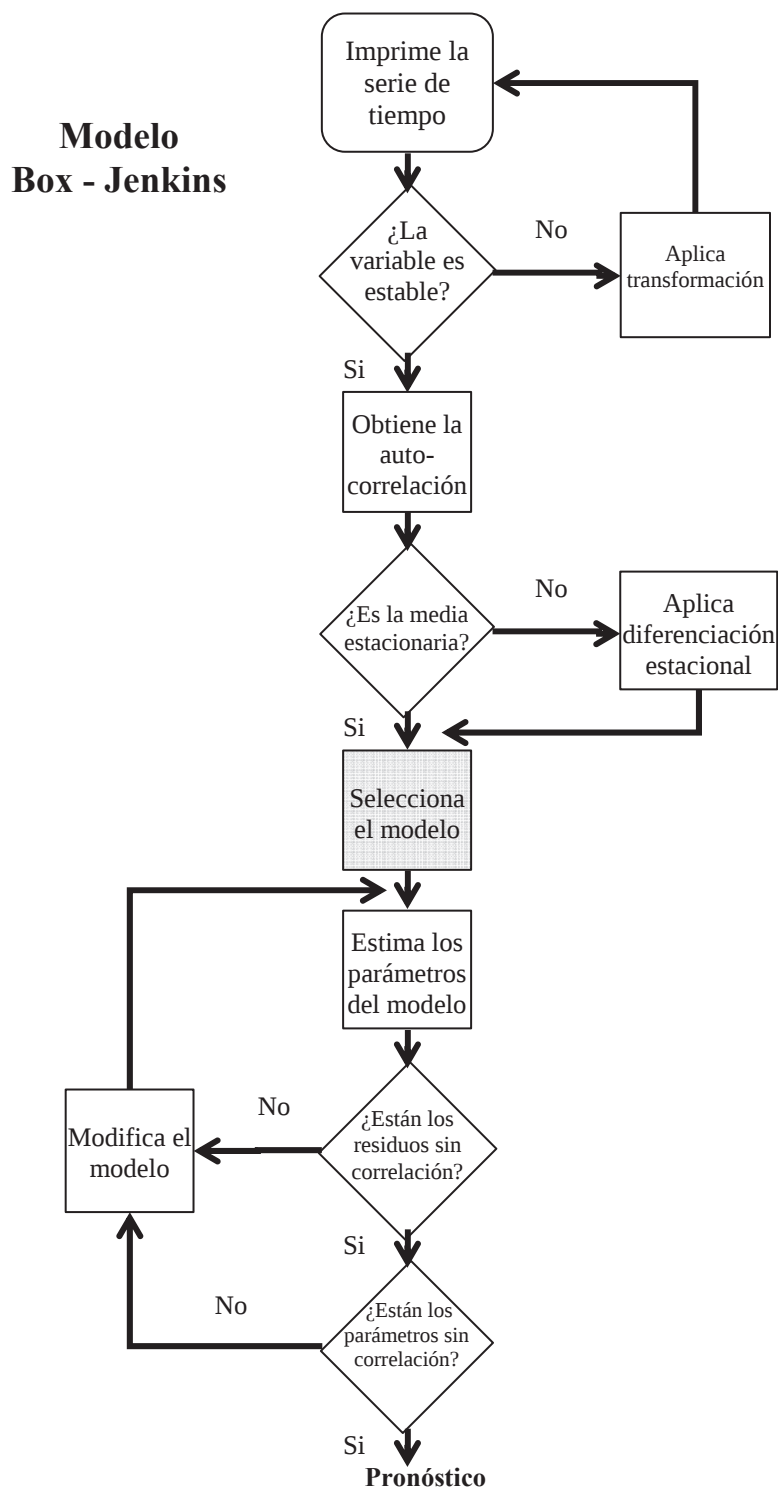


Figura 3.2. Diagrama de Flujo de Método Box-Jenkins.

De manera general el modelo de pronósticos a escoger depende de lo siguiente:

1. Horizonte de tiempo para el pronóstico.
2. Disponibilidad de datos.
3. Precisión requerida.
4. Tamaño del presupuesto para pronósticos.
5. Disponibilidad de personal calificado.

3.5.1.2. Casos de Estudio

La serie de tiempo de escurrimientos medios mensuales que se ilustra en la Figura 3.3, corresponde a los datos tomados de mediciones de la Estación Hidrométrica Cardel, en la cuenca del río la Antigua en el estado de Veracruz. Los datos fueron obtenidos de la página de Internet de la CONAE (Comisión Nacional para el Ahorro de Energía) [CONAE 2005]. La serie de tiempo cuenta con 420 observaciones mensuales, comprendiendo el periodo de Enero de 1951 a Diciembre de 1985. La serie de tiempo completa se encuentra detallada en el Apéndice A de esta tesis.

La elección de este río para ser utilizado en el caso de estudio propuesto, se debe a la falta de disponibilidad de datos de otros ríos en nuestro país o a que los registros que se tienen comprenden un periodo de tiempo breve (algunos años) y como consecuencia se dispone de una pequeña cantidad de datos. En los métodos de pronóstico mientras más datos se tengan en la serie de tiempo, se tendrá más precisión en los pronósticos realizados.

Serie de Tiempo

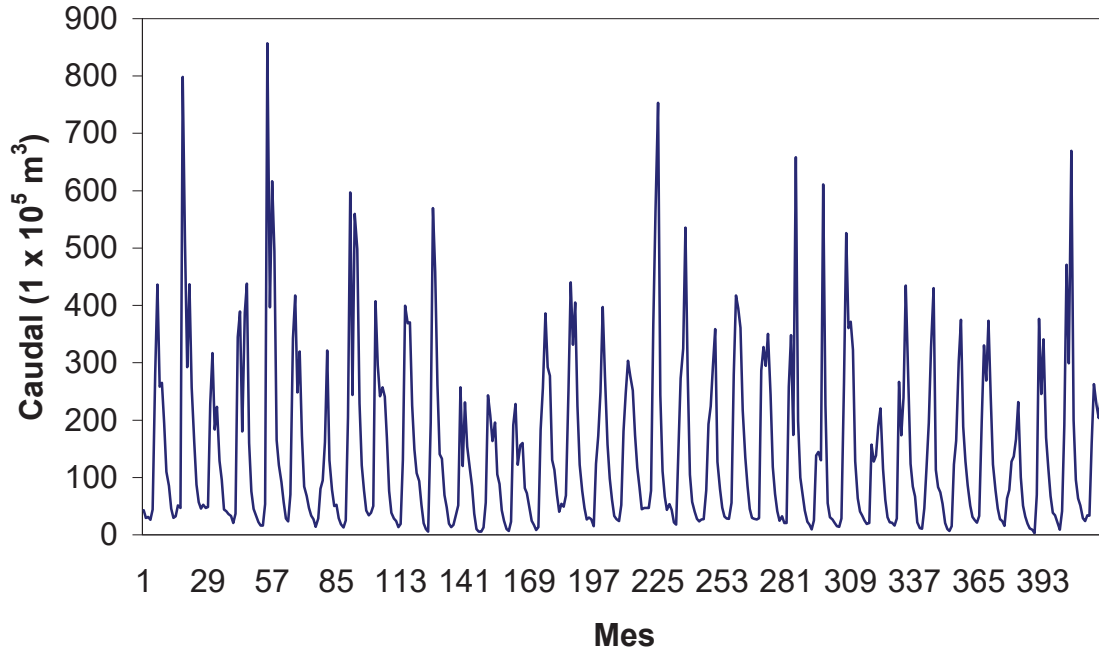


Figura 3.3. Serie de Tiempo de Caudal de Agua, Río la Antigua.

En la Figura 3.4 se ilustra el comportamiento anual que tiene la serie de tiempo de caudal. Se puede observar como el caudal presenta un ciclo regular durante el año, con una zona de estiaje que comprende del mes de Febrero hasta principios del mes de Mayo; estos meses son los importantes en el diseño o selección de un micro-generador hidráulico, debido a la falta de la materia prima para la producción de energía eléctrica, es decir, durante este lapso de tiempo se encuentran determinadas las condiciones más adversas para la operación del sistema. En el periodo de tiempo comprendido por los meses de Mayo a Septiembre, corresponde a la época de lluvias por lo que el nivel de caudal aumenta durante estos meses, con disminución en la afluencia de caudal en el mes de Agosto. Durante los meses restantes (de Octubre a Diciembre), el flujo de agua a través del río presenta una disminución gradual conforme se acerca la época de estiaje, repitiéndose de nuevo el mismo comportamiento cada año.

Comportamiento Anual

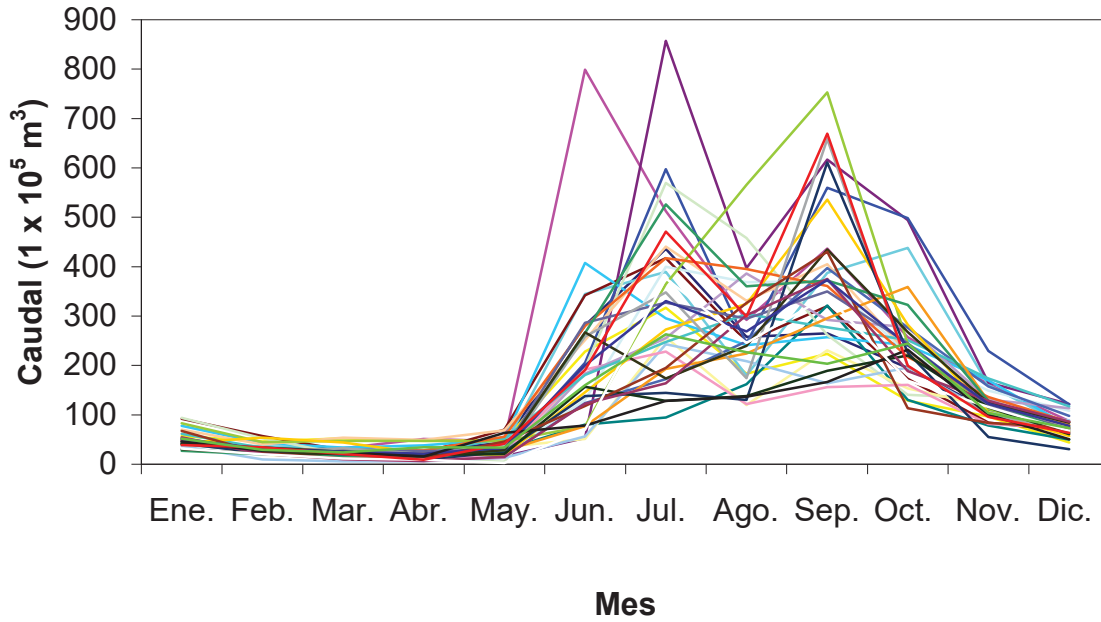


Figura 3.4. Comportamiento Anual de la Serie de Tiempo de Caudal.

3.5.1.3. Serie de Tiempo Normalizada

Para facilitar los cálculos numéricos y obtener una respuesta más rápida en las técnicas de pronóstico de series de tiempo, se aplica una normalización a la serie de tiempo. Los datos transformados se encuentran en el intervalo elegido de 0.1 a 0.9 *p.u.*, la expresión utilizada se encuentra definida como [Brockwell 1990]:

En el intervalo [0.1, 0.9]

$$\hat{Y}_t = \frac{Y_t - Y_{\min}}{Y_{\max} - Y_{\min}} (I_{\max} - I_{\min}) + I_{\min} \quad (3.22)$$

Donde

$\hat{Y}_t$ valor normalizado

Y_t valor del dato

$Y_{\max}$ valor máximo de la serie de tiempo

Y_{min}	valor mínimo de la serie de tiempo
I_{min}	límite superior del intervalo (0.9)
I_{max}	límite inferior del intervalo (0.1)

La Figura 3.5 ilustra la serie de tiempo resultante después de aplicarle una normalización en el intervalo [0.1, 0.9], como se puede observar la serie de tiempo resultante preserva las características de la serie de tiempo original.

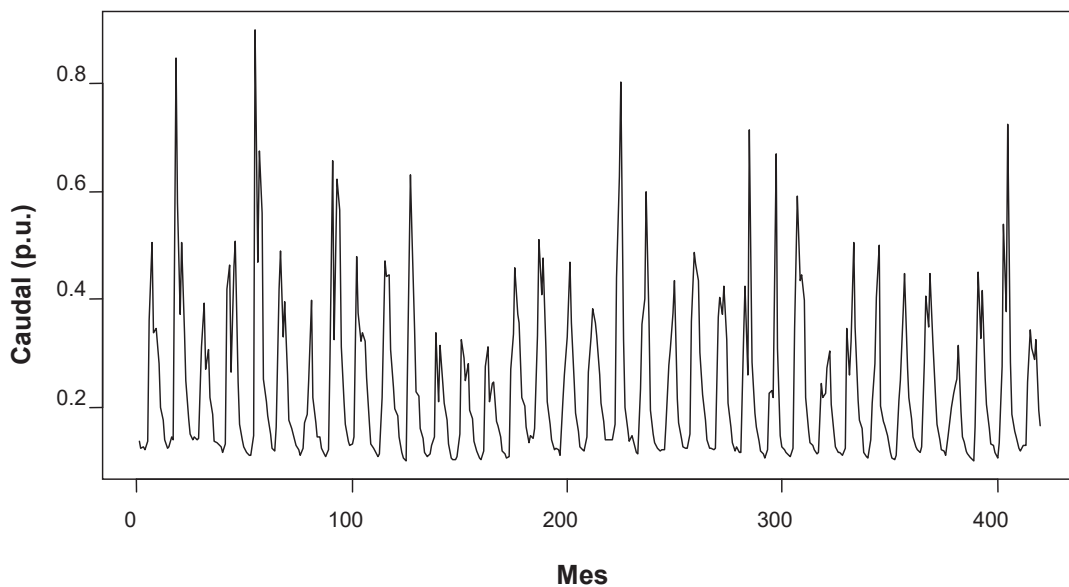


Figura 3.5. Serie de Tiempo de Caudal Normalizada.

3.5.1.4. Software Project R

El Project R es un lenguaje y ambiente gráfico de programación, diseñado para el desarrollo principalmente de métodos estadísticos [PROJECT 2005]. Este programa además incluye librerías que pueden ser fácilmente extendidas en la aplicación que se requiera. Dentro de las librerías incluidas se encuentran metodologías diseñadas para el modelado lineal y no lineal de sistemas, métodos y algoritmos estadísticos clásicos, análisis

de series de tiempo, clasificación y clustering, entre otros, además incluye técnicas para la representación grafica de los resultados obtenidos.

El programa es parte del proyecto GNU [GNU 2005], por lo cual es de fuente abierta (open source) y puede ser usado y distribuido libremente bajo la licencia general GPL (General Public License).

3.5.1.5. Método ARIMA

En el presente caso de estudio se analiza el pronóstico de la serie de tiempo bajo estudio, mediante el uso del modelo ARIMA (Auto-Regressive Integrated Moving Average), ya que este modelo es el más utilizado en el problema de pronóstico de series de tiempo y es comúnmente utilizado dentro de la metodología de Box-Jenkins. Para esto es necesario determinar cada uno de los parámetros del modelo en base a los datos históricos.

Utilizando el programa Project R, se implementó un modelo que permite obtener cada uno de los parámetros del modelo ARIMA. Se utilizaron 400 puntos de entrenamiento y 20 puntos para comparar el pronóstico obtenido por el modelo.

Para un modelo ARIMA (3,0,1), es decir, con tres parámetros auto-regresivos, cero integradores y uno de media móvil; se obtuvieron los siguientes coeficientes:

Tabla 3.1. Coeficientes del Método ARIMA.				
ar_1	ar_2	ar_3	ma_1	Media
1.2431	-0.3164	-0.2291	-0.6956	0.2354

Donde:

ar_1, ar_2, ar_3 , coeficientes auto-regresivos del modelo ARIMA.

ma_1 coeficiente de media móvil del modelo ARIMA.

En la Tabla 3.2, se pueden observar los datos obtenidos del pronóstico para la serie de tiempo Cardel, en base a los coeficientes estimados del modelo ARIMA.

Tabla 3.2. Datos Obtenidos por el Método ARIMA.	
Datos Reales	Datos Pronosticados
0.1900	0.1360
0.2471	0.2760
0.2939	0.5384
0.3149	0.3777
0.3130	0.7245
0.2933	0.2845
0.2646	0.1872
0.2356	0.1568
0.2131	0.1456
0.2009	0.1247
0.1996	0.1197
0.2068	0.1294
0.2191	0.1287
0.2324	0.2470
0.2434	0.3435
0.2500	0.3095
0.2517	0.2880
0.2492	0.3261
0.2440	0.1945
0.2380	0.1661

En la Figura 3.6 se puede observar la gráfica comparativa entre los datos pronosticados y los datos reales. El pronóstico encontrado muestra desviaciones notorias en magnitud de los datos reales, por lo que este modelo no es adecuado para estimar el comportamiento preciso futuro de la serie de tiempo.

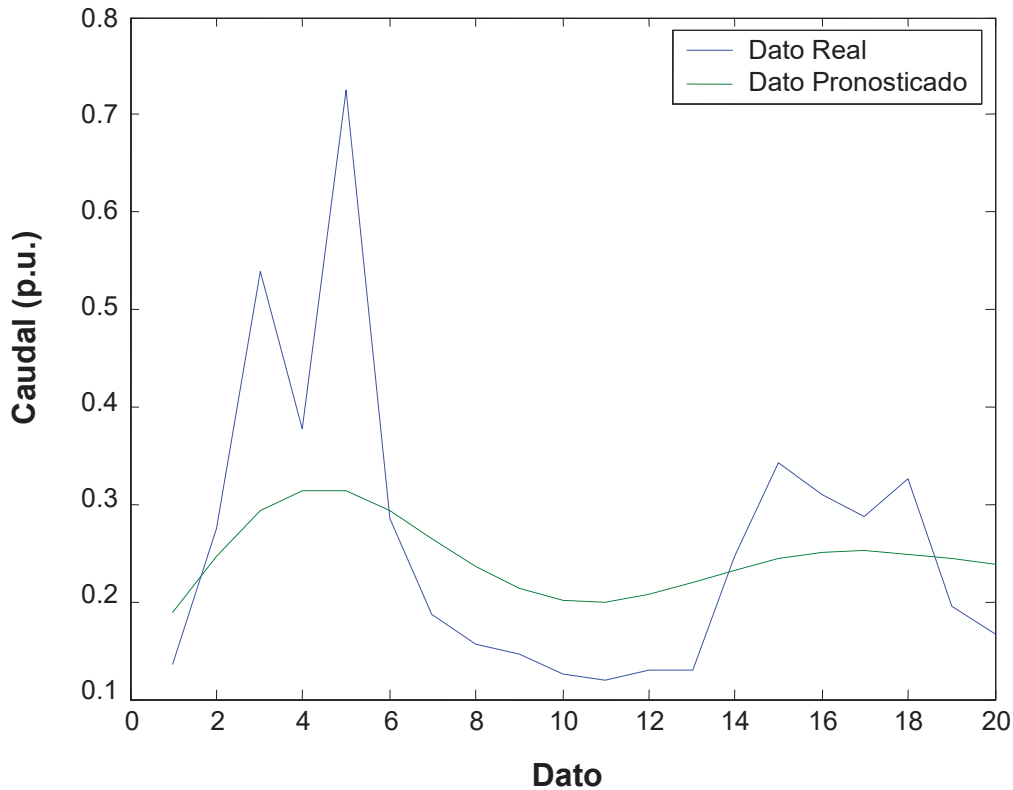


Figura 3.6. Datos Obtenidos por el Método ARIMA.

Debido a que el modelo anterior no resulto satisfactorio, se utilizó la librería “bestARIMA” contenida dentro del programa Project R, esta librería encuentra iterativamente el mejor modelo ARIMA para un conjunto dado de datos.

En la Tabla 3.3 se ilustran los datos obtenidos:

Tabla 3.3. Coeficientes del Método bestARIMA.					
ar_1	ar_2	ma_1	ma_2	ma_3	$intg$
1.7325	-0.9997	-2.6833	2.6410	-0.9508	-1e-04

Donde:

$intg$ coeficiente integrador del modelo ARIMA.

El modelo obtenido fue un ARIMA (2,1,3), y los datos pronosticados se encuentran contenidos en la Tabla 3.4:

Tabla 3.4. Datos Obtenidos por el método best- ARIMA.	
Datos Reales	Datos Pronosticados
0.1900	0.1651
0.2471	0.2359
0.2939	0.2994
0.3149	0.3387
0.3130	0.3431
0.2933	0.3116
0.2646	0.2524
0.2356	0.1814
0.2131	0.1175
0.2009	0.0778
0.1996	0.0728
0.2068	0.1038
0.2191	0.1625
0.2324	0.2332
0.2434	0.2969
0.2500	0.3366
0.2517	0.3416
0.2492	0.3107
0.2440	0.2519
0.2380	0.1811

En la Figura 3.7 se ilustra la gráfica del pronóstico obtenido y la de los datos reales, este modelo es más preciso en el pronóstico de datos, pero tiene el inconveniente que no detecta los picos que existen en la serie de tiempo original, es decir el pronóstico se asemeja a una onda oscilante senoidal, lo cual no sucede con la serie de tiempo original.

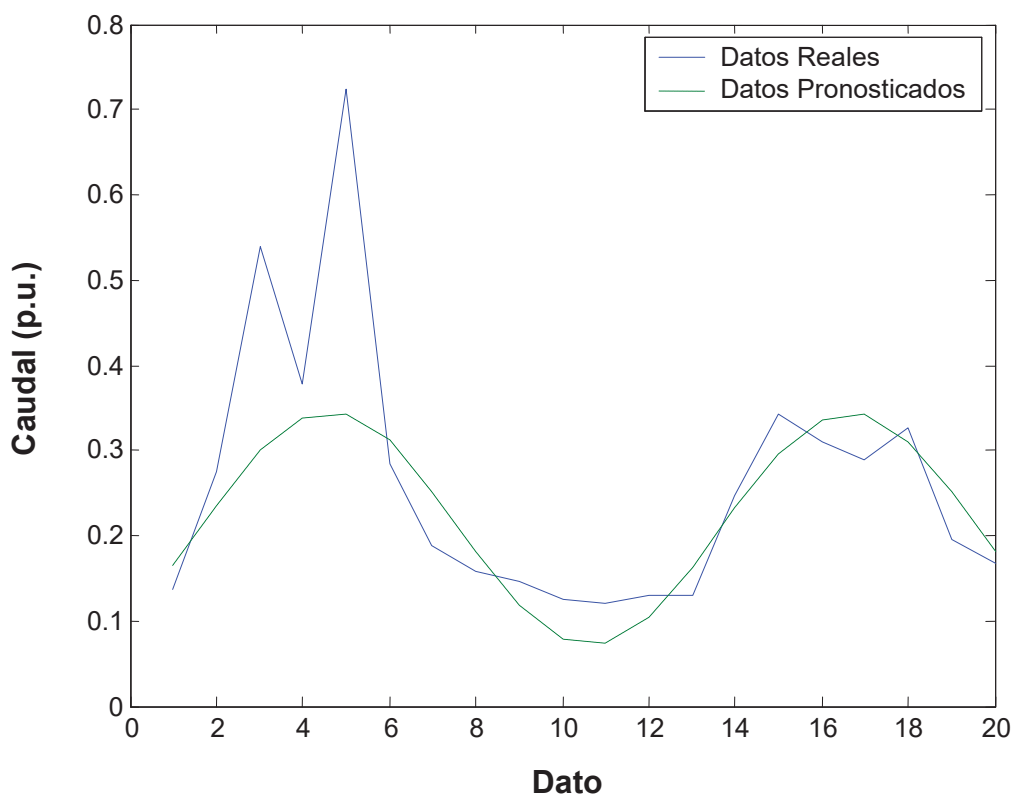


Figura 3.7. Datos Obtenidos por el Método best-ARIMA.

3.5.1.6. Transformación Box-Cox

La transformación de Box-Cox convierte un conjunto de datos a una distribución normal, lo cual permite que el sistema sea más fácilmente determinado [Economics-Glossary 2005].

Sea $\lambda \geq 0$ y Y un conjunto de datos, entonces:

$$\tau(Y; \lambda) = \begin{cases} \frac{(Y^\lambda - 1)}{\lambda} & \text{si } \lambda \neq 0 \\ \ln(Y) & \text{si } \lambda = 0 \end{cases} \quad (3.23)$$

El objetivo de aplicar esta transformación a la serie de tiempo, es el poder estimar de una mejor manera datos a futuro, considerando cierta pérdida de información en los datos (como lo son las pequeñas oscilaciones o picos que presenta la serie de tiempo en cada uno de sus valores máximos), pero aumentando la confiabilidad del pronóstico obtenido.

En la Figura 3.8 se ilustra la serie de tiempo transformada por el método de Box-Cox.

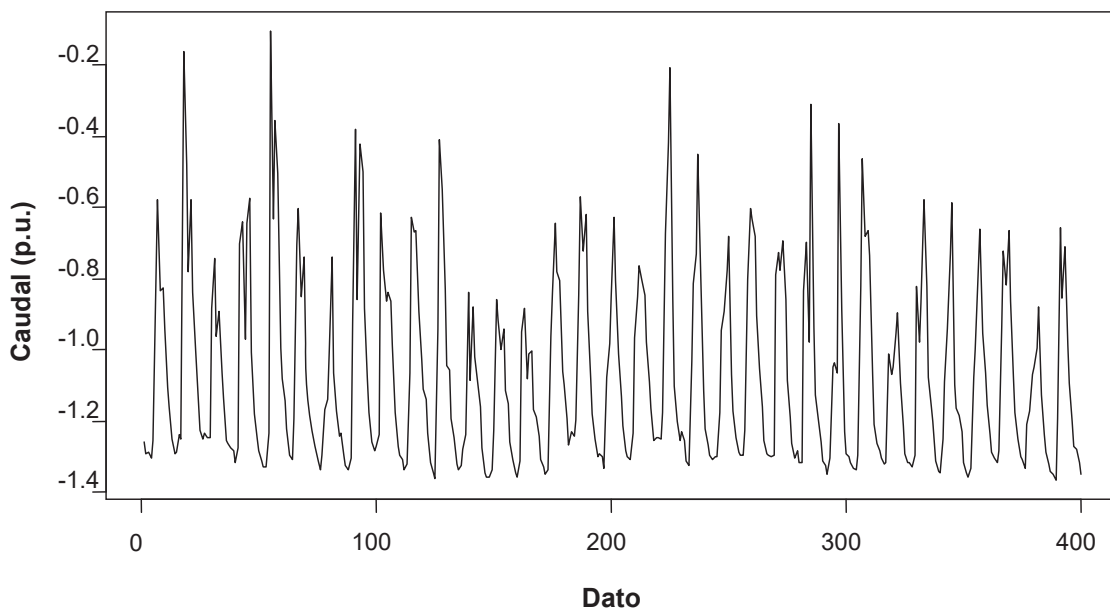


Figura 3.8. Serie de Tiempo Transformada por Método Box-Cox.

A la serie de tiempo transformada se le aplicó un método ARIMA, obteniéndose 24 coeficientes auto-regresivos. El pronóstico de 100 puntos comprendido del dato 400 al 500, puede ser observado en la Figura 3.9. Los datos pronosticados corresponden a una forma de onda oscilatoria, en cada oscilación su amplitud decae.

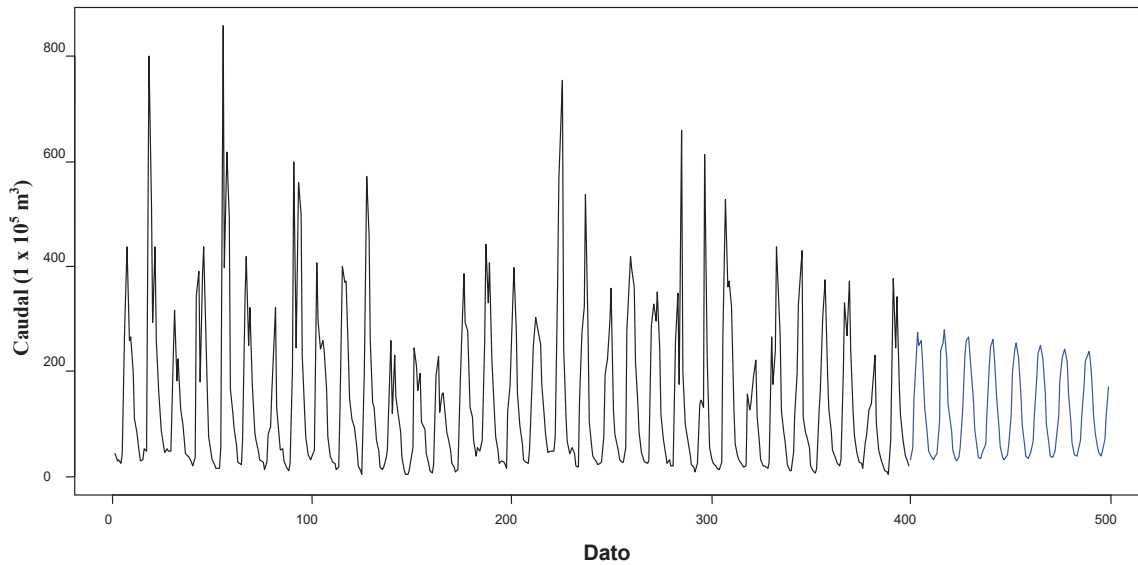


Figura 3.9 Datos Obtenidos por el Método Auto-regresivo y Cox-Box.

3.5.2. Aplicación de Redes Neuronales

Las redes neuronales representan una técnica de modelación matemática, que intenta imitar el proceso de aprendizaje que ocurre en el sistema nervioso. Su primer antecedente data de mediados del siglo XX y las primeras que se conocieron fueron las redes Perceptrón y Adaline [Freeman-Skapura 1991].

Las redes neuronales se basan en una estructura de neuronas unidas por enlaces que transmiten información a otras neuronas, las cuales entregan un resultado mediante funciones matemáticas. Las redes neuronales aprenden de la información histórica a través de un entrenamiento, proceso mediante el cual se ajustan los parámetros de la red, a fin de entregar la respuesta deseada, adquiriendo entonces la capacidad de predecir respuestas del mismo fenómeno. El comportamiento de las redes depende entonces de los pesos para los enlaces, de las funciones de activación que se especifican para las neuronas, las que pueden ser de tres categorías: lineal, de umbral (o escalón) y sigmoidea, y de la forma en que propagan el error.

Existen varios algoritmos que permiten ir corrigiendo el error de pronóstico; uno de los más usados es el denominado "backpropagation", que consiste básicamente en propagar el error hacia atrás, desde la capa de salida hasta la de entrada, permitiendo así la adaptación de los pesos con el fin de reducir dicho error [Hilera-Martínez 2000].

En forma simplificada, el funcionamiento de una red "backpropagation" consiste en el aprendizaje de un conjunto predefinido de pares de entradas-salidas dados como ejemplo, empleando un ciclo de propagación–adaptación de dos fases: primero, al aplicar un primer patrón como estímulo para la capa de entrada de la red, éste se va propagando a través de las capas siguientes para generar la salida, la cual proporciona el valor del error al compararse con la que se desea obtener. A continuación estos errores se transmiten hacia atrás, partiendo de la capa de salida, hacia todas las neuronas de la capa oculta intermedia que contribuyan directamente a la salida, recibiendo el porcentaje del error aproximado a la participación de las mismas en la salida original.

Este proceso se repite siempre hacia atrás, capa por capa, hasta que todas las neuronas de la red hayan recibido un error que describa su aporte relativo al error total. Basándose en esta información recibida, se reajustan todos los pesos de conexión, de manera que la siguiente vez que se presente el mismo patrón disminuya la diferencia entre la salida calculada y la deseada.

La importancia de la red backpropagation consiste en su capacidad de auto-adaptar los pesos de las neuronas de las capas intermedias para aprender la relación que existe entre un conjunto de patrones dados como ejemplo y sus salidas correspondientes.

Dependiendo del tipo de aplicación y sus características, se han desarrollado distintos tipos de redes neuronales, que se aplican en reconocimientos de voz, sistemas de control, procesamiento, clasificación de patrones en imágenes satelitales, determinación de variables climáticas, procesos químicos, pronóstico e identificación de parámetros y procesos de gestión.

Una red neuronal artificial es un entramado o estructura formada por nodos o neuronas, que se conectan entre sí y tienen la capacidad de recibir datos de entrada y producir una salida. Un esquema general de una red neuronal puede observarse en la Figura 3.10

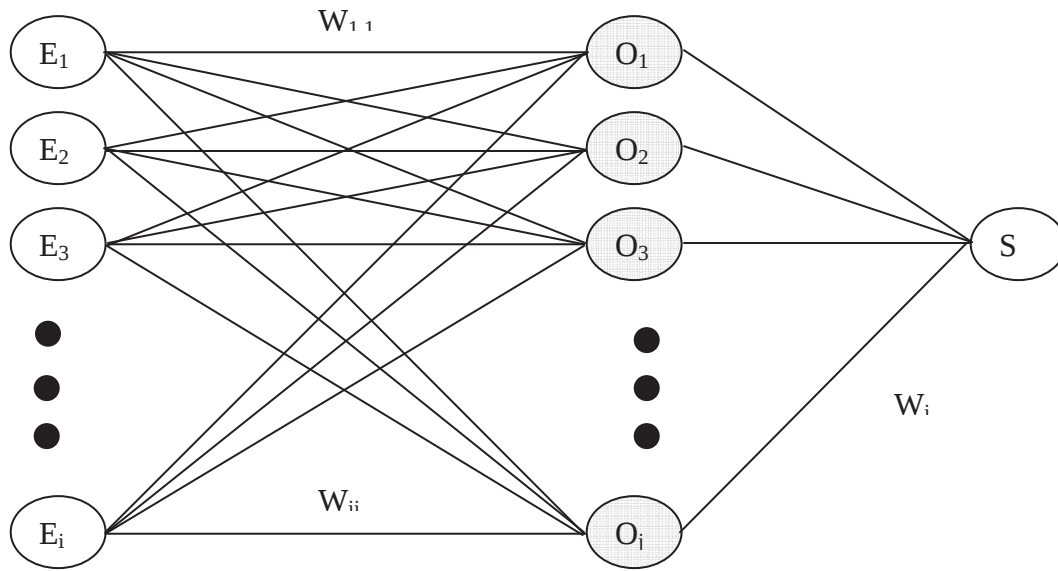


Figura 3.10. Esquema General de Conexiones de una Red Neuronal.

Durante la fase de entrenamiento de la red, se determinan iterativamente los pesos de las conexiones, W_{ji} que conectan a las neuronas de entrada E_i con las de la capa oculta O_j y W_j para la transferencia entre la capa oculta y la de salida S_i . A partir de los datos de entrada; la red en cada iteración propaga una salida, a través de las neuronas que la componen, con los pesos y función de transferencia considerados; esta salida se compara con la real, obteniéndose así un error. El entrenamiento concluye cuando la red es capaz de reproducir las salidas conocidas para los parámetros de entrada con un error mínimo arbitrario. Las funciones de transferencia y activación utilizadas pueden ser de tipo lineal, escalón o sigmoidea.

La segunda fase consiste en realizar la validación de la red diseñada con otro conjunto de datos para los cuales se conocen los resultados, a fin de comprobar la eficiencia de la misma.

Para este caso de estudio se utilizó una red neuronal de 3 capas, similar a la descrita anteriormente y como se detalla en la referencia [Rumelhart 1986], cuya implementación es una modificación al programa desarrollado por Karsten Kutza [Karsten 1996] diseñado para el pronóstico de manchas solares.

En la Figura 3.11 se ilustra la serie de tiempo obtenida del entrenamiento de la red neuronal, como se puede observar la red neuronal obtenida si representa de manera satisfactoria a la serie de tiempo bajo estudio.

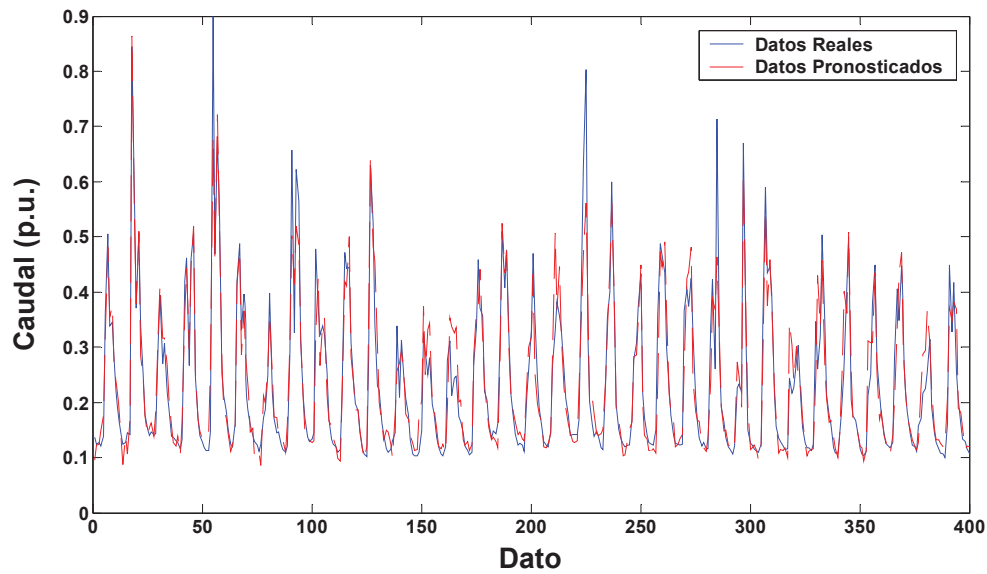


Figura 3.11 Serie de Tiempo Obtenida por Medio de una Red Neuronal.

Se utilizaron 400 datos como entrenamiento, tomando como punto de comparación los últimos 20 datos de la serie de tiempo original. La Tabla 3.5 muestra los datos reales de la serie de tiempo comparados con los datos pronosticados por la red neuronal.

Tabla 3.5. Datos Obtenidos por la Red Neuronal.	
Datos Reales	Datos Pronosticados
0.1900	0.1264
0.2471	0.3452
0.2939	0.2892
0.3149	0.4911

0.3130	0.2739
0.2933	0.6600
0.2646	0.1957
0.2356	0.1575
0.2131	0.1429
0.2009	0.1134
0.1996	0.1170
0.2068	0.0951
0.2191	0.1253
0.2324	0.3304
0.2434	0.3736
0.2500	0.2434
0.2517	0.4444
0.2492	0.2019
0.2440	0.1771
0.2380	0.1346

En la Figura 3.12 se puede observar los datos pronosticados por la red neuronal, la aproximación obtenida en el pronóstico con respecto a los datos reales es mayor que la obtenida por medio de los métodos ARIMA, estudiados previamente.

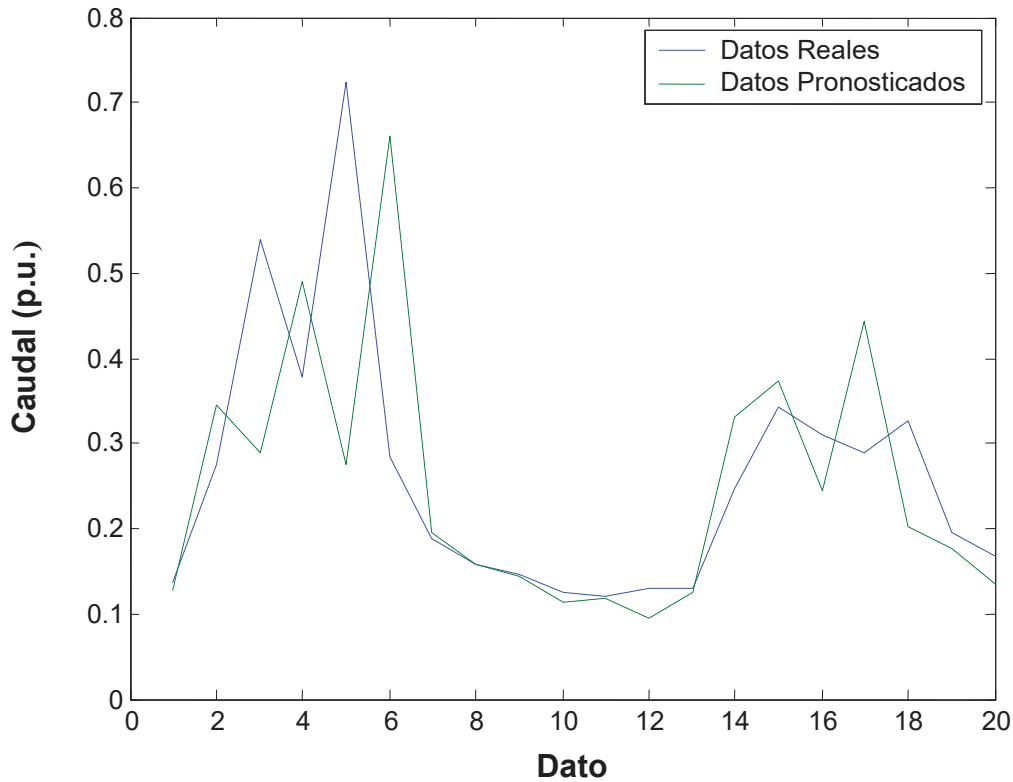


Figura 3.12. Datos Pronosticados por Medio de la Red Neuronal.

Es importante tener un pronóstico a largo plazo de la serie de tiempo de caudal, para así tener una mejor precisión en la elección de la capacidad de los componentes eléctricos de la mini-central hidráulica (generador, turbinas, etc.). Para esto se realizó un pronóstico de 100 puntos a partir del último dato contenido en la serie de tiempo (aproximadamente 8.3 años), es decir, después del dato 420. La gráfica que representa el pronóstico obtenido es ilustrada en la Figura 3.13. Se puede observar que conforme avanza el tiempo de pronóstico los datos obtenidos decrecen en magnitud, a partir del punto 440 el pronóstico ya no es confiable ya que presenta una forma irregular con respecto a la serie de tiempo original, después del punto 451 la red neuronal pronostica un valor constante de 0.1758.

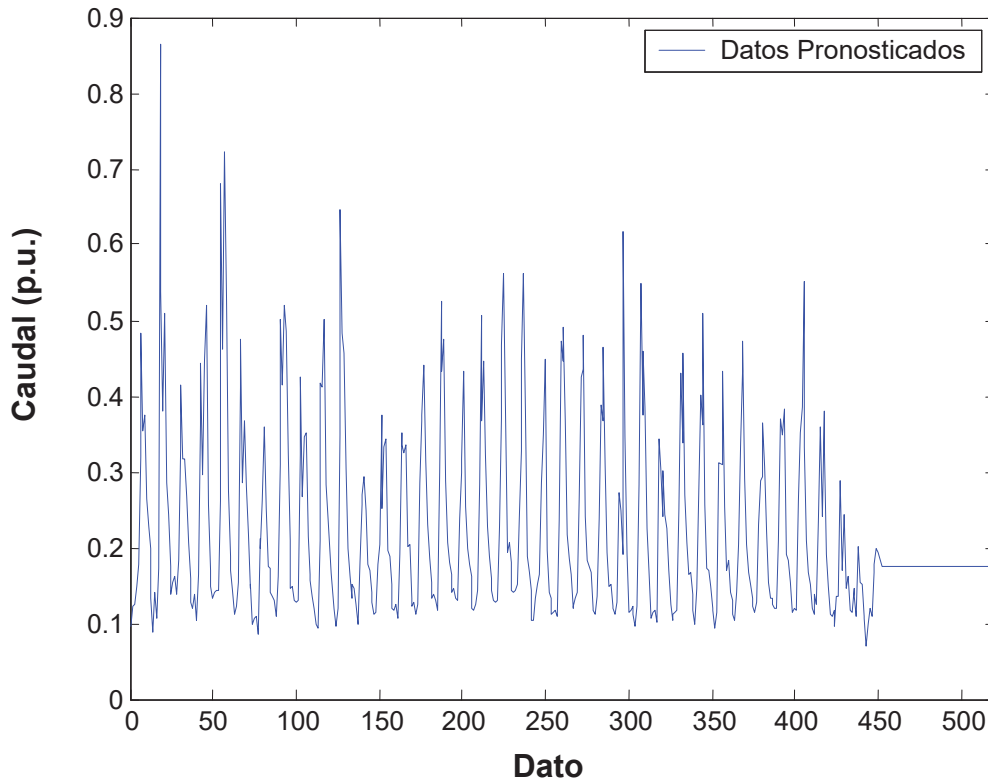


Figura 3.13. Pronostico a Largo Plazo por Medio de la Red Neuronal.

3.5.3. Software ECSID

ECSID son las siglas de “Evolutionary Computation based System Identification”, es un programa que crea modelos matemáticos a partir de las observaciones de un conjunto de datos. Este programa se basa en la Programación Genética y Gene Expression Programming, la cuál es una herramienta basada en el principio de Darwin de la evolución; esto es, la supervivencia del más apto [Graff 2005].

Se utilizaron 337 datos de entrenamiento para la obtención de un modelo que represente a la serie de tiempo y 83 datos de validación de los pronósticos obtenidos por medio del modelo.

El modelo obtenido por el programa es:

$$\begin{aligned}
 Y(i) = & (((Y(i-12) + ((38.904144 / (((Y(i-12) + 19.941227) + 49.617794) + (((Y(i-16) - \\
 & 38.904144) - (52.624268 + ((86.11374 / Y(i-1)) / (((Y(i-12) + 30.841295) + 19.941227) - \\
 & Y(i-16)) / Y(i-24)))) + 38.904144)) / (42.35617 / (179.22308 + (Y(i-24) / (((96.710175 + \\
 & (22.692736 / (Y(i-24) - (Y(i-18) / 0.21417001)))) + 19.941227) - (21.185997 + (Y(i-12) - \\
 & 22.692736))) / Y(i-24)) * 49.617794)))) / 19.941227) / (((4.214771 / ((Y(i-12) / 22.171614) \\
 & / 38.904144)) / (((Y(i-24) + 1.2447697) + (Y(i-12) - 74.44332)) - 22.171614) / \\
 & 0.8586228)) + 0.43528712))) / Y(i-24))) / (42.35617 / (108.285355 + (Y(i-24) / \\
 & (((93.15255 + (25.4732 / (Y(i-24) - (Y(i-18) / 0.077387206)))) + 19.941227) - \\
 & (21.185997 + (Y(i-12) - 22.692736))) / 38.904144) * 49.617794 + 208.39029)))) / \\
 & (86.11374 / (38.904144 + ((Y(i-1) - 22.171614) / 0.43528712) / (((Y(i-16) - ((86.11374 / \\
 & (38.904144 + (-48.63827 / (((Y(i-16) - (21.185997 / (19.941227 / ((Y(i-1) - 22.171614) / \\
 & 0.43528712) / Y(i-24)))))) - 41.74304) + 0.43528712) / 42.35617) + (Y(i-12) / 9.572341)))) \\
 & / 0.9139364)) - 49.617794) + (86.11374 / (((Y(i-12) + (Y(i-24) / -0.521122)) + Y(i-1)) + \\
 & 0.43528712) + (((Y(i-12) + 47.687233) + 38.904144) / Y(i-12)) + 19.941227) / \\
 & 19.941227 - 0.021828502))) / 19.941227) + (Y(i-12) / 9.4381485)))))) \quad (3.24)
 \end{aligned}$$

En la Figura 3.14 se puede observar la gráfica comparativa entre los datos obtenidos por medio del modelo de ECSID y la serie de tiempo original. El modelo obtenido tiene una buena aproximación en la generación de los datos originales, pero pierde mucha información acerca de los máximos y cambios bruscos en la forma de onda de la serie de tiempo original.

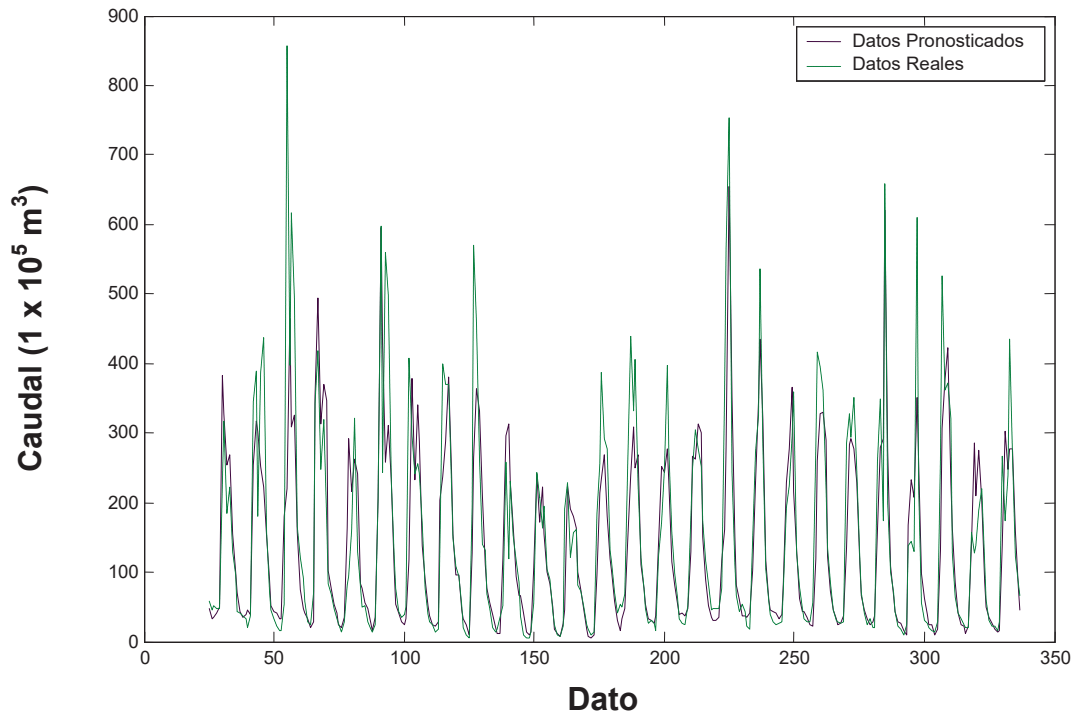


Figura 3.14. Validación del Modelo Obtenido por Medio de ECSID.

Del modelo obtenido anteriormente se realiza un pronóstico de 83 datos y estos son comparados contra los datos reales que se tienen, dicha comparación se puede observar en la Figura 3.15, los datos pronosticados tienden a una forma de onda triangular irregular que se repite en periodos de oscilación constantes de 12 datos (un año). En los primeros 60 puntos el modelo es capaz de tener una buena aproximación de la serie de tiempo real, aunque sin describir el comportamiento de una manera precisa, después del punto 60 el pronóstico ya no es confiable, ya que incluso pronostica valores negativos de caudal en cada oscilación.

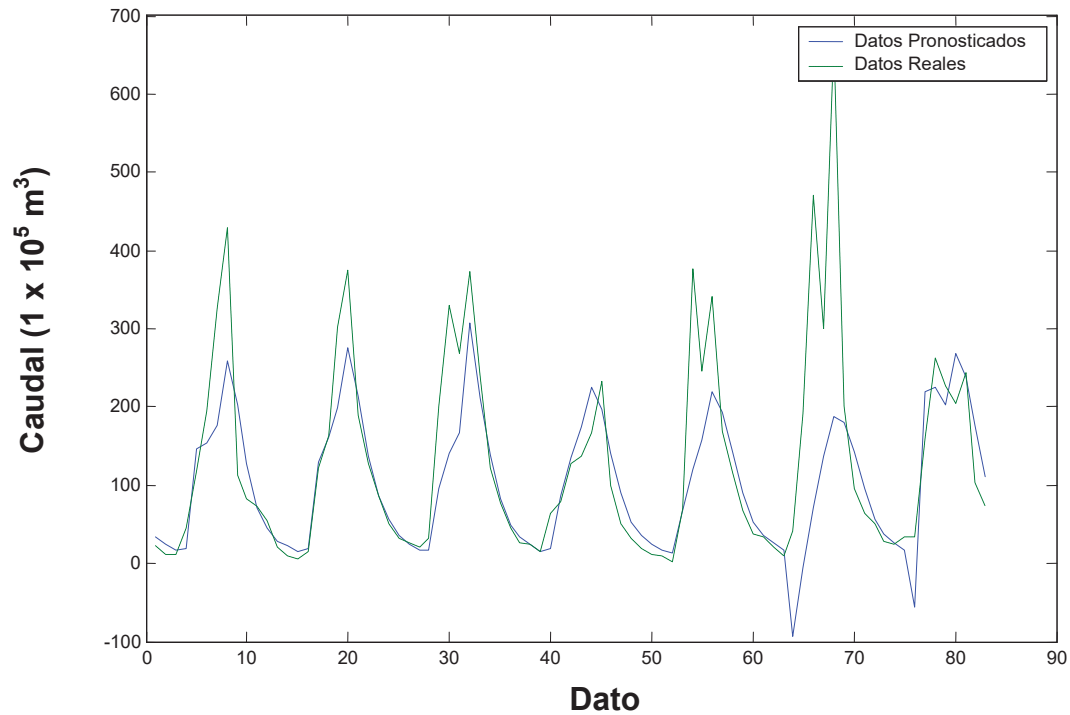


Figura 3.15. Pronóstico de la Serie de Tiempo por Medio de ECSID.

3.5.4. Método de Monte-Carlo

Bajo el nombre de Método Monte-Carlo o Simulación Monte-Carlo se agrupan una serie de procedimientos que analizan distribuciones de variables aleatorias usando simulación de números aleatorios [CSEP 2005].

El Método de Monte-Carlo da solución a una gran variedad de problemas matemáticos haciendo experimentos con muestreos estadísticos en una computadora. El método es aplicable a cualquier tipo de problema, ya sea estocástico o determinístico.

Generalmente en estadística los modelos aleatorios se usan para simular fenómenos que poseen algún componente aleatorio. En ocasiones la aplicación del método Monte-Carlo se utiliza para analizar problemas que no tienen un componente aleatorio explícito; en estos casos un parámetro determinista del problema se expresa como una distribución aleatoria y se simula dicha distribución.

La simulación de Monte-Carlo también fue creada para resolver integrales que no se pueden resolver por métodos analíticos; para solucionar estas integrales se usaron números aleatorios. Posteriormente se utilizó para cualquier esquema que emplee variables aleatorias con distribuciones de probabilidad conocidas [Donnelly 2005].

El algoritmo de Simulación Monte-Carlo Crudo o Puro está fundamentado en la generación de números aleatorios por el método de Transformación Inversa, el cual se basa en las distribuciones acumuladas de frecuencias [CSEP 2005]:

- Determinar las variables aleatorias y sus distribuciones acumuladas.
- Generar un número aleatorio uniforme $\hat{I}(0,1)$.
- Determinar el valor de las variables aleatorias para el número aleatorio generado de acuerdo a las clases (distribuciones) que se tengan.
- Calcular media, desviación estándar y realizar el histograma.

Otra opción para trabajar con el método de Monte-Carlo, cuando la variable aleatoria no es directamente el resultado de la simulación o tenemos relaciones entre variables es la siguiente:

- Diseñar el modelo lógico de decisión.
- Especificar distribuciones de probabilidad para las variables aleatorias relevantes.
- Incluir posibles dependencias entre variables.
- Muestrear valores de las variables aleatorias.
- Calcular el resultado del modelo según los valores del muestreo (iteración) y registrar el resultado.
- Repetir el proceso hasta tener una muestra estadísticamente representativa.
- Obtener la distribución de frecuencias del resultado de las iteraciones.
- Calcular media y desviación estándar.
- Analizar los resultados

Las principales características a tener en cuenta para la implementación o utilización del algoritmo son:

- El sistema debe ser descrito por una o más funciones de distribución de probabilidad.
- Generador de números aleatorios: como se generan los números aleatorios es importante para evitar que se produzca correlación entre los valores muestrales.
- Iterar tantas veces como muestras se requieran.
- Establecer límites y reglas de muestreo para las funciones de probabilidad: se sabe que valores pueden adoptar las variables.
- Definir un valor base: cuando un valor aleatorio tiene o no sentido para el modelo a simular.

En esta tesis el método de Monte-Carlo es utilizado para determinar la condición inicial de la Red Neuronal, después de que esta ya ha sido entrenada y se requiere de un pronóstico a largo plazo. En la simulación de Monte-Carlo se utiliza una distribución normal de 0.24 de media y desviación estándar de 0.14. La implementación de este algoritmo se realiza en base a la librería MCS-libre para el lenguaje C [Williams 2002].

En la Figura 3.16 se ilustra el histograma de frecuencias para la serie de tiempo, el área bajo la línea que cruza a través de la gráfica representa la distribución normal generada, la cual es utilizada en la simulación de Monte-Carlo.

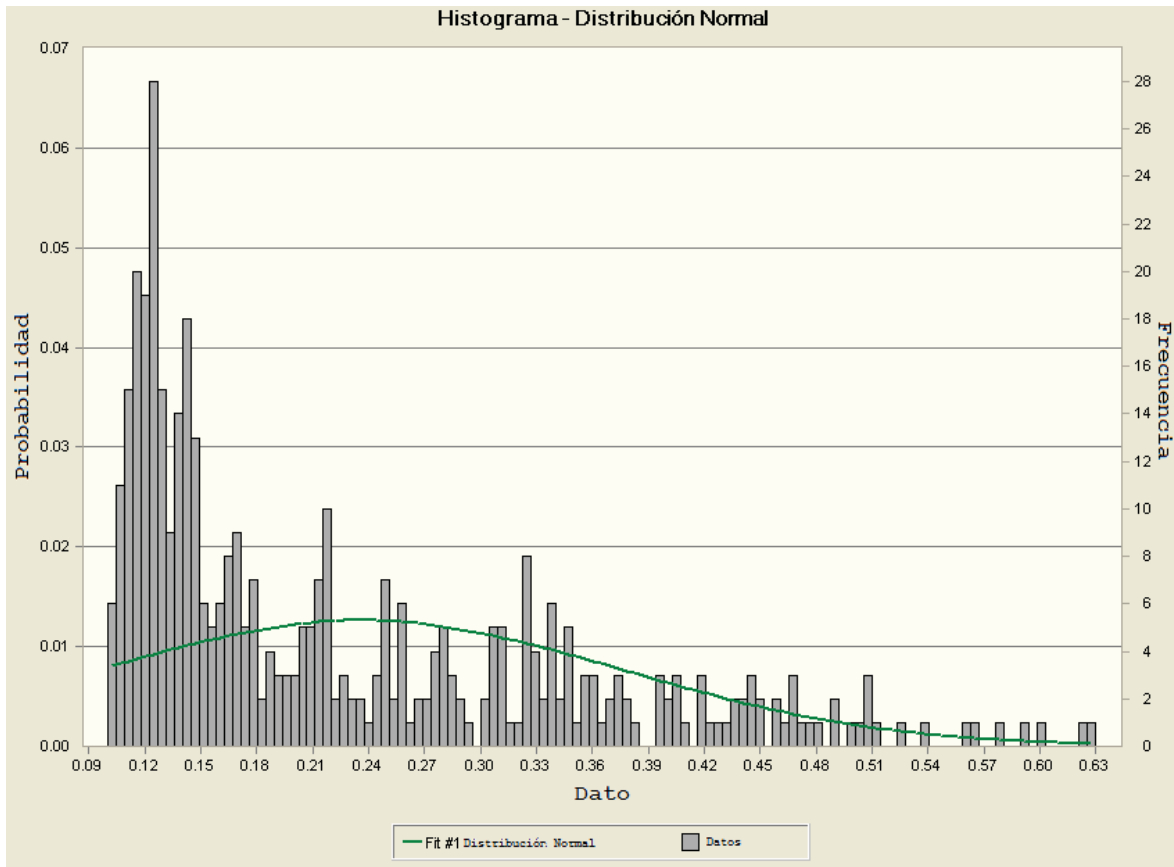


Figura 3.16. Histograma de la Serie de Tiempo en la Simulación Monte-Carlo.

Se realizaron 10,000 iteraciones de la Simulación de Monte-Carlo, obteniéndose en cada iteración el valor correspondiente para cada número aleatorio generado, al final de cada iteración se cálculo el nuevo valor de la media y la desviación estándar, así como el nuevo histograma obtenido. La gráfica con los resultados obtenidos después de 10,000 iteraciones se puede observar en la Figura 3.17. El dato 0.25 tiene la mayor frecuencia en el histograma después de haber realizado la simulación Monte-Carlo, por lo que este es el dato que se utilizará como condición inicial para la Red Neuronal.

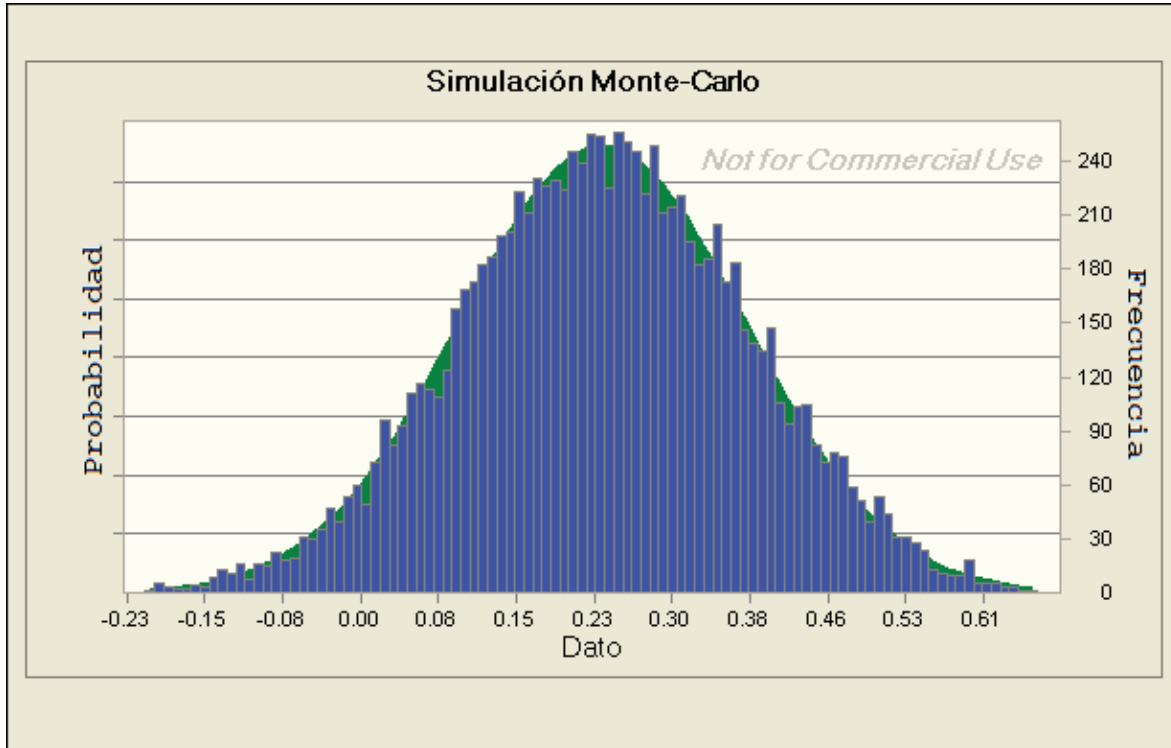


Figura 3.17. Gráfica de la Simulación Monte-Carlo.

Utilizando las condiciones iniciales por medio del método de Monte-Carlo se realizó un pronóstico de 100 puntos a partir del último dato contenido en la serie de tiempo, por medio de la Red Neuronal. La gráfica que representa el pronóstico obtenido es ilustrada en la Figura 3.18. Se puede observar que conforme avanza el tiempo de pronóstico los datos obtenidos decrecen en magnitud. A partir del punto 450 el pronóstico ya no es confiable debido a que presenta una forma irregular con respecto a la serie de tiempo original; después del punto 465 la red neuronal pronostica un valor constante de 0.1756.

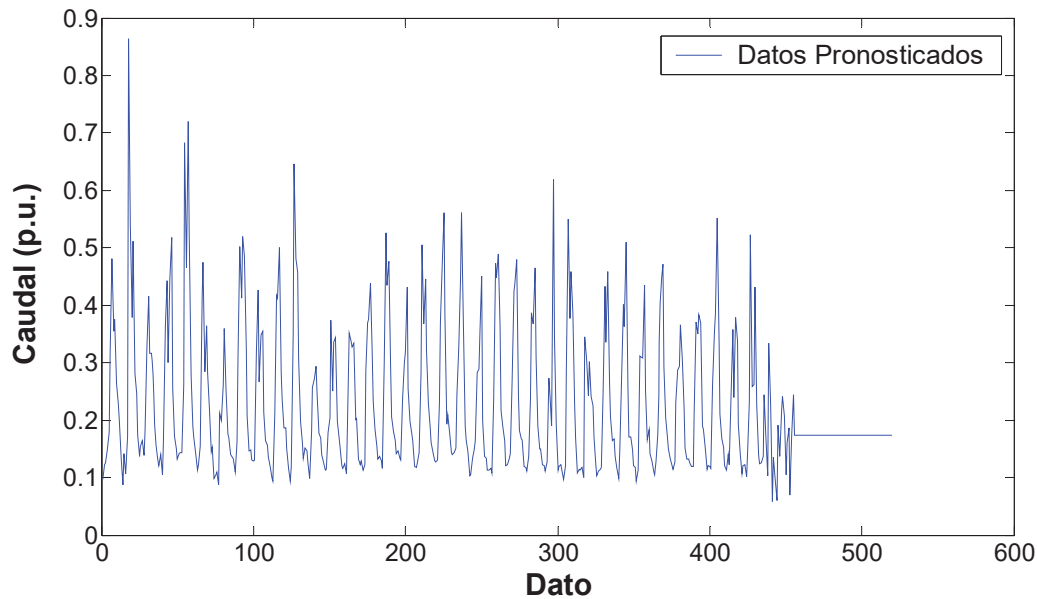


Figura 3.18. Pronóstico a Largo Plazo por Medio de la Red Neuronal y Monte-Carlo.

La Tabla 3.6 muestra 50 datos pronosticados mediante la red neuronal tomando como condición inicial el método de Monte-Carlo, estos datos son comparados con los datos pronosticados por la red neuronal sin las condiciones iniciales obtenidas en la simulación de Monte-Carlo.

Tabla 3.6. Datos Obtenidos por la Red Neuronal Utilizando Simulaciones Monte-Carlo.							
Sin Monte-Carlo				Monte-Carlo			
Dato	Valor	Dato	Valor	Dato	Valor	Dato	Valor
1	0.1209	26	0.1449	1	0.1210	26	0.1368
2	0.1131	27	0.1365	2	0.1132	27	0.2441
3	0.1390	28	0.1090	3	0.1396	28	0.1661
4	0.1237	29	0.2010	4	0.1232	29	0.1032
5	0.2349	30	0.1549	5	0.2355	30	0.3333
6	0.3586	31	0.1514	6	0.3575	31	0.2282

7	0.2404	32	0.1094	7	0.2397	32	0.0584
8	0.3802	33	0.1068	8	0.3791	33	0.1351
9	0.3388	34	0.0696	9	0.3382	34	0.0981
10	0.1917	35	0.0992	10	0.1932	35	0.0604
11	0.1483	36	0.1198	11	0.1415	36	0.1916
12	0.1131	37	0.1095	12	0.1057	37	0.1362
13	0.1080	38	0.1669	13	0.1206	38	0.2189
14	0.1174	39	0.1772	14	0.1223	39	0.2404
15	0.0949	40	0.1990	15	0.1017	40	0.2073
16	0.1353	41	0.1943	16	0.1433	41	0.1049
17	0.1358	42	0.1758	17	0.2330	42	0.1608
18	0.2885	43	0.1758	18	0.5229	43	0.1871
19	0.1686	44	0.1758	19	0.2589	44	0.0690
20	0.2461	45	0.1758	20	0.2616	45	0.1764
21	0.2430	46	0.1758	21	0.4323	46	0.2449
22	0.1450	47	0.1758	22	0.2264	47	0.1745
23	0.1619	48	0.1758	23	0.1378	48	0.1745
24	0.1162	49	0.1758	24	0.1246	49	0.1745
25	0.1145	50	0.1758	25	0.1259	50	0.1745

La gráfica comparativa de los datos contenidos en la Tabla 3.6 se puede observar en la Figura 3.19. Los primeros 15 datos representan los últimos datos contenidos en la serie de tiempo; es por ello que su valor en ambos estudios es muy parecido debido a que el valor de la condición inicial obtenida por el método de Monte-Carlo ($163.011 \text{ m}^3/\text{seg}$) es mayor al tomado originalmente ($73.475 \text{ m}^3/\text{seg}$). Los datos nuevos pronosticados tienden a tener un mayor valor decreciendo hasta llegar a un valor constante, valor en el cual la red neuronal ya no es capaz de realizar pronóstico alguno. Con la aplicación del método de Monte-Carlo en encontrar la mejor condición inicial para la Red Neuronal entrenada se mejora la confiabilidad del pronóstico obtenido ya que se selecciona un valor con cierta probabilidad y con esto se soluciona el problema de utilizar el último dato de la serie de

tiempo como condición inicial. Esto debido a que este último dato puede corresponder a un valor de un año de sequía extremo o el caso contrario, puede corresponder a un valor de un año de mucha lluvia, sin embargo la aplicación de este método es recomendable cuando se cuenta con otros datos que influyen en las variaciones de caudal como lo es series de tiempo de temperatura, lluvias, etc.

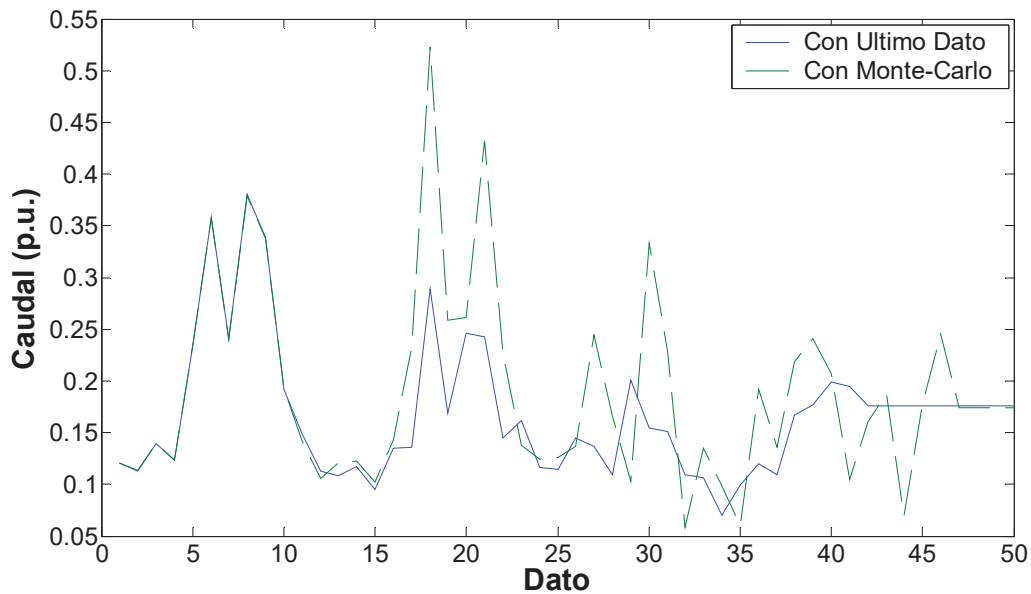


Figura 3.19. Datos Comparativos para la Condición Inicial en la Red Neuronal.

3.6. Resultados

Las metodologías ARIMA son comúnmente utilizadas para el pronóstico de series de tiempo. Para el caso particular de series de tiempo de caudal, las técnicas de inteligencia artificial representan una alternativa más viable para resolver el problema de pronóstico, ya que estas ofrecen una mayor precisión en los valores pronosticados. Sin embargo, el tiempo de computo utilizado para encontrar los parámetros de un modelo ARIMA es mucho menor al tiempo requerido para entrenar una red neuronal, mientras que para el caso del programa ECSID se requiere de un excesivo tiempo (días) encontrar un modelo adecuado que represente a la serie de tiempo bajo estudio.

Para determinar el gasto a instalar Q_i , es decir, aquel para el cual se diseñan las turbinas del sistema mini-hidráulico, se requiere conocer el factor de planta ($f.p.$), es decir el factor al cual la planta trabajará.

El factor de planta típico para este tipo de plantas hidráulicas es de 0.70 a 0.85 [Khennas 2000]. En base a la selección del factor de la planta y de los resultados arrojados por los estudios realizados a la serie de tiempo, es posible calcular el gasto a ser instalado mediante:

$$Q_i = \frac{Q_m}{f.p.} \quad (3.2)$$

Donde

- $f.p$ Factor de planta.
 Q_m Gasto medio mensual.
 Q_i Gasto de diseño.

En la Tabla 3.7 se resumen los datos obtenidos en cada caso de estudio, así como los valores de gasto a ser instalado con factores de planta típicos.

Tabla 3.7. Resumen de los Datos Obtenidos por los Modelos Estudiados.							
Caso de Estudio	Gasto Máximo	Gasto Mínimo	Gasto Medio Mensual	Gasto de Diseño			
				Factor de Planta			
				0.70	0.75	0.80	0.85
Serie Original	856.921	2.879	147.894	211.278	197.192	184.868	173.993
ARIMA	856.921	-37.41	141.449	202.07	188.598	176.811	166.410
Box-Cox	856.921	2.879	147.772	211.102	197.029	184.715	173.849
Red Neuronal	856.921	-29.57	142.189	203.127	189.585	177.736	167.281
GEP	856.921	-93.064	131.648	188.069	175.531	164.560	154.880
Monte-Carlo	856.921	-32-396	143.893	205.561	191.857	179.866	169.285

*Los datos son en $1 \times 10^5 \text{ m}^3$ de agua.

Debido a que la precisión obtenida por medio de la red neuronal en relación a los métodos ARIMA es mayor y que el tiempo de computo utilizado en realizar un pronóstico confiable de la serie de tiempo de caudal Cardel es menor que el tiempo utilizado por el programa ECSID, de la Tabla 3.7 se utilizarán los datos obtenidos por medio de la red neuronal, para en base a ellos realizar los cálculos y selección del equipo electro-mecánico, estudios que son presentados en el Capítulo 4 de este trabajo de tesis.

3.7. Conclusiones

En el desarrollo del presente capítulo se presentaron y estudiaron diferentes modelos para el pronóstico basadas en series de tiempo, tales como los métodos ARIMA, Redes Neuronales y Programación Genética por medio del software ECSID. En particular, los métodos anteriores se aplicaron al pronóstico de caudal de caudal, ya que en las plantas hidráulicas constituye el agua la materia prima, por lo que es indispensable conocer su comportamiento a lo largo del tiempo. Se implementó el método de Monte-Carlo para determinar las condiciones iniciales de la Red Neuronal propuesta.

Además se describió una metodología general para analizar la factibilidad de implantación de plantas mini-hidráulicas de generación distribuida, tomando como base los resultados obtenidos por los métodos de pronóstico de series de tiempo.

La serie de tiempo analizada, corresponde al caudal de agua del Río La Antigua. Los datos fueron tomados de la estación Hidrométrica Cardel en el Estado de Veracruz. Los resultados obtenidos en este capítulo son la base para el capítulo 4 de la presente tesis.

La elección de un algoritmo de pronóstico se da en base a las características de la serie de tiempo, pero es importante mencionar que la experiencia es la que determina en la mayoría de los casos cual será el mejor método a ser utilizado. En el caso particular de esta tesis, fueron probados varios métodos para ver su comportamiento ante la serie de tiempo bajo estudio y de los resultados obtenidos se descartó el método o se profundizó en su estudio.

Capítulo 4

Diseño de Micro-redes Hidráulicas de Generación.

4.1. Introducción

En el presente Capítulo se describe una metodología para el diseño o selección de los componentes del sistema mini-hidráulico bajo estudio. La base principal de los cálculos es el caudal de diseño obtenido en la sección anterior, en este caso se ha seleccionado un factor de planta de 0.75 y un caudal de diseño de 189.585 m^3 mensuales.

La potencia a instalar se determina en base a los gastos que se obtuvieron de la serie de tiempo, esto mediante la ecuación:

$$P_m = 9.81 Q_m H \eta \gamma \quad (4.1)$$

Donde:

H	Caída en metros.
η	Eficiencia total en p.u.
9.81	Factor de conversión de kgf.m/s a W.
γ	Peso específico del agua, $1\,000 \text{ kg/m}^3$.
Q_m	Gasto medio mensual.

Para el cálculo de la generación media anual del sistema (*GMA*), se determina mediante la Ecuación (4.2).

$$GMA = \frac{9.81 Q_i H \eta 8760 f.p.}{1 \times 10^6} \quad (4.2)$$

En donde:

- 8760 Número de horas del año.
 1×10^6 Factor de conversión de kW a GW.
 Q_i Gasto de diseño.

Para el caso de estudio, se tiene una diferencia de alturas previa a la estación Hidrométrica Cardel que varía de 5 m a 15 m dependiendo de la zona que se elija para la construcción de la obra civil [CSVA 2005]. Es importante mencionar que para tener la caída exacta de agua es necesario ir al lugar y medir la diferencia de alturas con algún método conocido como es un altímetro.

Además, las ecuaciones anteriores se consideran con el propósito de obtener la generación teórica total del sistema, por lo que el factor η incluye los efectos de las pérdidas en todo el sistema. En el caso analizado como primera aproximación se ha considerado una eficiencia de 1.0 *p.u.*

En conclusión, utilizando los datos obtenidos del análisis de la serie de tiempo Cardel (Tabla 3.6), se tiene que:

$$P_m = (9.81)(7.314 \text{ m}^3 / \text{s})(10 \text{ m})(1 \text{ p.u.})(1000 \text{ kg} / \text{m}^3) = 717.503 \text{ kW} \quad (4.3)$$

$$GMA = \frac{(9.81)(7.314 \text{ m}^3 / \text{s})(10 \text{ m})(1 \text{ p.u.})8760(0.75 \text{ p.u.})}{1 \times 10^6} = 4.714 \text{ GW} \quad (4.4)$$

Tabla 4.1. Potencia y Generación Media Anual Obtenida en Diferentes Alturas.			
	5 m	10 m	15 m
<i>P_m</i>	358.751 KW	717.503 KW	1.076 MW
<i>GMA</i>	2.356 GW	4.714 GW	7.070 GW

De la Tabla 4.1 se puede observar que la altura ideal para ser considerada en el diseño y selección de los componentes de la mini-central hidráulica es entre 10 a 15 metros. Para este caso de estudio se considera una capacidad aprovechable de 1 MW, tomando en cuenta que es un valor típico dentro de la selección del equipo electro-mecánico (generador, turbina, etc.). Este valor de capacidad corresponde a utilizar aproximadamente el valor máximo de altura disponible (15 m). Si se considera una altura menor a 10 m, la planta hidráulica bajo estudio caería dentro de la categoría de micro-central hidráulica (ver Tabla 1.1).

4.2. Tipos de Centrales Micro y Mini-hidráulicas

Existen dos tipos básicos de mini-hidráulicas [RETScreen 2004]:

- Centrales de agua fluyente.
- Centrales a pie de presa.

En la Figura 4.1 (a) se ilustra un esquema general de una central a pie de presa, en este tipo de central el flujo de agua se encuentra regulado por medio de una presa. Por otro lado en la Figura 4.1 (b) se puede observar el esquema general de una central de agua fluyente, el agua que circula a través de la turbina es captada del cauce del río por medio de una obra de toma, una vez que el agua ha sido utilizada es devuelta al río en un punto distinto a la captación.

Generalmente el esquema de central con agua fluyente es más económico, ya que solo se requiere de la construcción de un azud para desviar el agua a un canal de derivación, esto en comparación a la presa que se debe de diseñar y construir en el esquema de central a pie de presa.

Para el caso de estudio propuesto, se puede utilizar indistintamente cualquiera de los dos esquemas, considerando los siguientes aspectos:

- Con un esquema de central a pie de presa se tendrá una mejor regulación en el flujo de agua, con la desventaja del aumento en el precio de la inversión por el proyecto.
- Con el esquema de agua fluyente, disminuyen los gastos por concepto de la obra civil, con la desventaja que en época de estiaje la mayor parte del agua será desviada al canal de derivación para satisfacer los requisitos mínimos de operación de las turbinas, provocando disminución considerable en los niveles de agua a lo largo de la zona donde el agua es desviada.
- En la mayoría de los casos el presupuesto para el diseño y construcción de la obra civil y el uso final de la energía eléctrica generada, determinan que esquema se ha de utilizar en específico. En esta tesis se considera el esquema de agua fluyente.

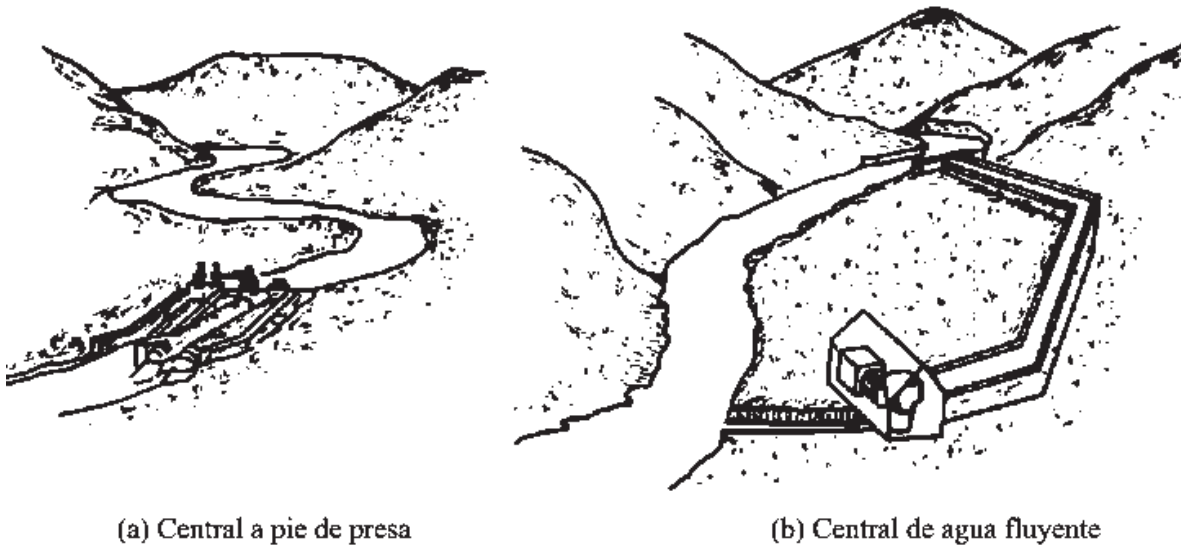


Figura 4.1. Esquemas de Mini-centrales Hidráulicas.

Una central mini-hidráulica se encuentra constituida por diversos componentes y equipos que pueden clasificarse en tres grandes grupos:

- Obra civil.
- Equipamiento electro-mecánico.
- Equipos auxiliares.

4.3. Obra Civil

La obra civil engloba aquellas obras o instalaciones necesarias para derivar, conducir y restituir el agua utilizada en la generación de energía eléctrica, así como de albergar y proteger los equipos electro-mecánicos. Son parte de la obra civil los siguientes elementos:

- a) Azudes y presas.
- b) Obra de toma.
- c) Canal de derivación.
- d) Cámara de carga.
- e) Tubería de Presión.
- f) Edificio o casa de máquinas.
- g) Canal de salida.

En la Figura 4.2 se pueden observar los elementos que conforman la obra civil.

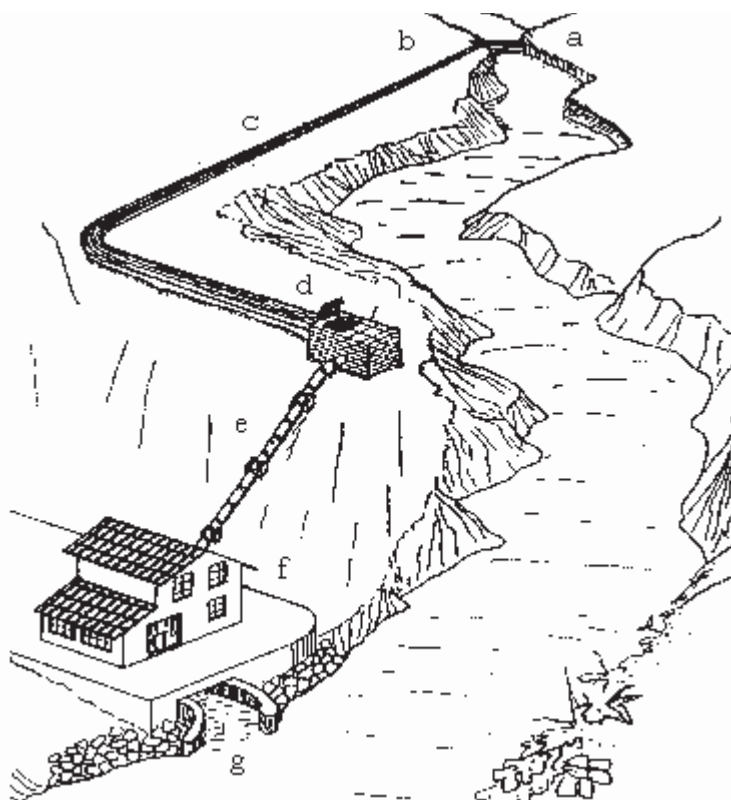


Figura 4.2. Componentes de la Obra Civil de un Sistema Mini-hidráulico.

Para el diseño y selección de cada uno de estos componentes es necesario tener en cuenta una serie de factores esenciales [HIDRORED 2003]:

a) Sedimento

El agua del río acarrea pequeñas partículas de material duro y abrasivo (sedimento) que pueden ocasionar daños considerables a la turbina, así como un rápido desgaste, si estas no son extraídas antes de que el agua ingrese a la tubería de presión. El sedimento además puede producir el bloqueo de la toma en caso de que la presa y el ingreso al canal no se encuentren correctamente ubicados.

b) Caudal Adecuado

El caudal del río varía durante el año, pero la minicentral debe estar diseñada para captar un caudal constante. Si ocurriera una sobrecarga en el canal inevitablemente este se dañaría, por lo que el azud o presa deben derivar el caudal adecuado hacia el canal, sin importar la cantidad de agua que el río lleve. La función principal de la presa es asegurar que el caudal del canal se mantenga constante, incluso en época de estiaje. Por otro lado, la función principal del azud es regular el caudal dentro de límites razonables cuando el río tenga un volumen considerable de agua.

c) Avenidas

Las avenidas requieren de especial atención en el diseño de la micro o mini-central, ya que las aguas que bajan por las avenidas acarrearán una gran cantidad de material e incluso arrastran grandes piedras que ruedan a lo largo del lecho del río. Todo ello puede dañar la presa, la estructura de la toma del canal y los muros del encauce, si es que estos no han sido cuidadosamente diseñados.

d) Turbulencia

Otro aspecto importante que requiere atención es el efecto de la turbulencia en el flujo de agua. En todas las secciones de conducción de agua, incluyendo el canal y la bocatoma, los cambios bruscos en la dirección del agua crearán turbulencia que erosionará las estructuras, ocasionando pérdidas de energía y acarreo de sedimentos.

e) Pérdidas del Salto

Dado que la potencia desarrollada por la turbina depende en gran medida de la presión del agua a la entrada de ésta, es claro que el canal no debe perder “salto” indebidamente. Además, la tubería de presión deberá estar dimensionada de tal manera que las pérdidas por fricción no reduzcan considerablemente el salto.

f) Golpe de Ariete

Si el flujo de agua en la tubería se detiene bruscamente (por ejemplo a causa de un bloqueo repentino cerca de la turbina), se originarán sobre-presiones muy altas llamadas golpe de ariete. La tubería debe de ser lo suficientemente fuerte como para no romperse cuando esto suceda. Por otro lado, tales presiones harán que la tubería se mueva, lo que ocasionará daños si los anclajes no son resistentes.

4.3.1. Azudes y Presas

Son obras que se construyen en el curso de agua, transversalmente al mismo, para la retención y desviación del flujo de agua hacia la toma del caudal que se deriva hacia las turbinas.

En los azudes se produce una retención de agua sin que haya una variación importante del nivel de agua. En las presas, el muro se construye para elevar la superficie libre del curso de agua creando un embalse.

4.3.1.1. Diseño de un Azud o Presa Vertedora

Para el caso de estudio propuesto del Río La Antigua se desarrolla el diseño de un azud o presa vertedora, se considera los siguientes datos [CSVA 2005]:

- Geología del río: afloramiento rocoso.
- Caudal del río:
 $Q_{\text{máx}} = 33.060 \text{ m}^3/\text{s}$
 $Q_{\text{min}} = 1.110 \text{ m}^3/\text{s}$
 $Q_i = 7.314 \text{ m}^3/\text{s}$
- Pendiente local del río: 1.5 %
- Ancho local del río (b): 10 m
- Cresta del azud ($H = 0.5 \text{ m}$)

Generalmente el tirante del agua es mayor que la altura del azud, y el parámetro o perfil de este corresponde a la trayectoria seguida por la lámina vertiente o perfil de Creager. En la Figura 4.3 se ilustra el diagrama de un azud simple, se puede observar que la altura de carga (h) debe de ser estimada, esto se realiza a partir de la velocidad de flujo del agua y del caudal máximo a través del río.

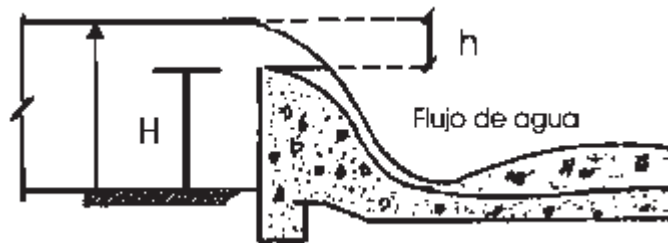


Figura 4.3. Diagrama de un Azud.

Para calcular la altura de carga, se emplea la ecuación del vertedero [ITDG 1996], ya que esta toma en consideración la velocidad de acercamiento del agua del río al azud.

$$Q = \frac{2}{3} \mu b \sqrt{2g} \left[\left(h + \frac{V^2}{2g} \right)^{3/2} - \left(\frac{V^2}{2g} \right)^{3/2} \right] \quad (4.5)$$

Donde:

- Q Caudal máximo del río ($Q = Q_{\text{máx}}$)
 μ Coeficiente del vertedero según la forma de la cresta, en este caso, perfil de Creager $\mu = 0.75$
 h Altura de carga hidráulica o tirante de agua sobre la cresta del vertedero
 V Velocidad de acercamiento del río, en este caso 2.5 m/s
 b Ancho del río

Sustituyendo valores, tenemos que:

$$h = 1.168 \text{ m}$$

La velocidad del agua sobre la cresta del azud esta dada por:

$$Q = AV \tag{4.6}$$

Donde

A Área del azud

$$V = \frac{33.060 \text{ m}^3 / \text{s}}{(10\text{m})(1.168\text{m})} = 2.83 \text{ m/s} \tag{4.7}$$

El azud puede ser construido en mampostería revestida de hormigón en masa, o de concreto, para determinar el ancho del azud se requiere de un estudio de análisis de estabilidad de fuerzas que actúan sobre él.

4.3.2. Obra de Toma

Las obras de toma o bocatomas derivan el agua hacia los canales que la transportarán a la mini-central. Generalmente, en la toma se instala una reja, para impedir el paso de peces y material sólido.

En la Figura 4.4 se ilustra el esquema de una obra de toma, como se observa la obra de toma se coloca en un tramo del río, desviando el agua por un lado del azud, aprovechando la fuerza de gravedad. La ubicación más apropiada para una obra de toma es en los tramos rectos y estables del río, dependiendo de la topografía, la geología, el comportamiento de los suelos y principalmente de las variaciones hidrológicas del lugar. Es muy importante señalar que las condiciones naturales, en lo posible deben ser preservadas.

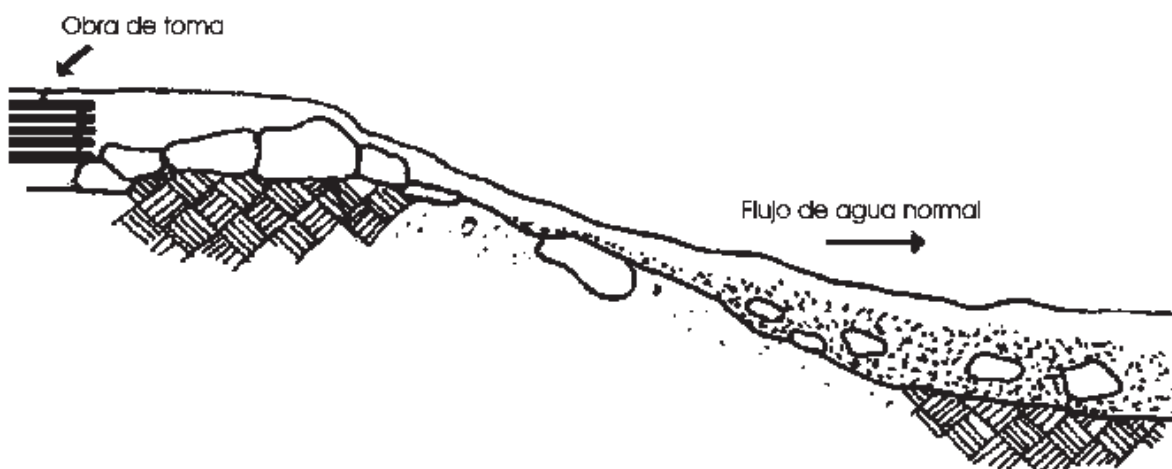


Figura 4.4. Esquema de una Obra de Toma.

Las obras de toma deben cumplir las siguientes funciones:

- Garantizar la captación de una cantidad constante de agua, especialmente en épocas de sequía.
- Impedir, hasta donde sea posible, el ingreso de materiales sólidos y flotantes, haciendo que estos sigan el curso del río o facilitando la limpieza.
- Proteger el resto del sistema hidráulico del ingreso de avenidas o embalses que pudieran producirse en épocas de lluviosas.

4.3.2.1. Criterios de Diseño para una Obra de Toma

El diseño de una obra de toma depende de los siguientes parámetros [ITDG 1996]:

1. Curso del río (tramo curvo o recto).
2. Configuración del terreno (pendiente del cause, ancho del valle).
3. Caudal del río, caudal a derivarse y ángulo de desvió.
4. Régimen del río, nivel de aguas mínimas y máximas ordinarias, nivel de aguas mínimas y máximas extraordinarias.
5. Acarreo de materiales (frecuencia de acarreo, tamaño de materiales acarreados, materiales de fondo y materiales en suspensión).
6. Geología del lugar. Presencia de fallas, arcillas y calizas en las zonas consideradas para la bocatomas.
7. Geotecnia del lugar de emplazamiento, capacidad portante de los suelos.
8. Importancia de la obra, disponibilidad presupuestal.

4.3.2.2. Diseño de una Obra de Toma

Para el caso de estudio propuesto, se selecciona una obra de toma que consta de:

- a) Un bocal con vertedor de entrada.
- b) Ventana reguladora.
- c) Vertedor de excedentes situado aguas más abajo.
- d) Entre el bocal de entrada y la ventana reguladora existe un canal corto de 3 m de longitud, que a su vez, tiene una compuerta hacia el río para vaciar sedimentos que se encuentren en ese tramo. Cuando la compuerta del canal se abre, este funciona como un canal de limpieza.
- e) El canal desde la ventana reguladora hasta el desarenador (contenido en el canal de derivación) será un canal trapezoidal. Este canal debe tener una velocidad que evite la sedimentación, por lo menos hasta que el agua llegue al desarenador.

En época de estiaje la toma debe garantizar la captación de $1.110 \text{ m}^3/\text{s}$ de caudal mínimo. La ventaja que proporciona el tipo de toma con vertedor de entrada, es que obstaculiza el ingreso de materiales de arrastre desde el río al canal.

Para el cálculo de la longitud de la obra de toma y del vertedor de entrada se toma una cota de 0.3 m a la cresta del vertedor de ingreso, se dispone de una carga hidráulica de 0.2 m , esto debido a que se tiene una cresta de azud de 0.5 m y el tirante de aguas mínimas sobre el azud es prácticamente cero.

Empleando la ecuación del vertedor, con $h = 0.2 \text{ m}$ y $\mu = 0.5 \text{ m}$:

$$Q = \frac{2}{3} \mu L \sqrt{2gh^3} \quad (4.8)$$

Donde

L Longitud de la obra de toma.

$$L = \frac{Q}{\frac{2\mu\sqrt{2gh^3}}{3}} = \frac{1.110}{\frac{2(0.5)\sqrt{(2)(9.8)(0.2^3)}}{3}} = 8.4 \quad (4.9)$$

Por seguridad se asume $L = 8.5 \text{ m}$.

4.3.3. Canal de Derivación

Es el canal que transporta el agua que se deriva hacia la mini-central desde la toma hasta la cámara de carga. A lo largo del canal, dependiendo de su longitud, puede haber varias compuertas para limpieza y vaciado del canal en caso necesario.

Al final del canal, antes de la cámara de carga, suelen instalarse una reja de orificios más finos con su correspondiente máquina limpia-rejas, así como una compuerta de seguridad.

En una determinada instalación se pueden adecuar diferentes tipos de canales, los cuales son ilustrados en la Figura 4.5:

- a) Canal de mampostería o concreto.
- b) Canal de tierra con sello o revestimiento.
- c) Canal de tierra sin revestimiento.

El sellado o revestimiento se refiere a la aplicación de una capa delgada de material que no agrega resistencia estructural, pero sirve para reducir la filtración y la fricción.

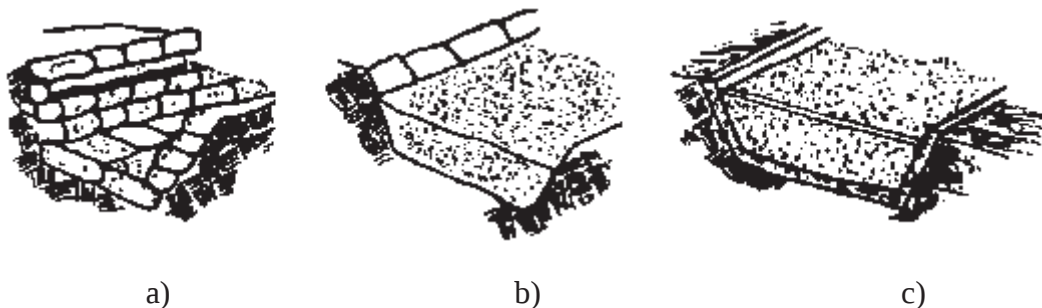


Figura 4.5. Tipos de Canales.

El tipo y material del canal determinan las características principales del canal como son:

- Sección y Ángulo del Talud del Canal.
- Velocidad del Agua.
- Rugosidad.
- Borde Libre.
- Perímetro Mojado.
- Radio hidráulico.

En la Sección 4.3.3.7 de la tesis se realiza el diseño de un canal para el caso de estudio propuesto, tomando en consideración cada una de las características principales descritas a continuación.

4.3.3.1. Sección y Ángulo del Talud del Canal

El flujo de agua en un canal hecho de material suelto (como suelo arenoso) hará que las paredes se desmoronen hacia adentro, a menos que los lados estén ligeramente inclinados y el ancho del canal este en relación a su profundidad. La ventaja de revestir los canales es que resultan más angostos para el mismo caudal. De allí que no se requiere de una gran excavación horizontal en una ladera angosta. La Tabla 4.2 da algunos valores recomendados para diferentes materiales [ITDG 1996].

Tabla 4.2. Talud Recomendado para Canales de Sección Trapezoidal.	
Material	Talud ($Z = \text{Atan } \theta$)
Arena	3.0
Arena y greda	2.0
Greda	1.5
Greda y arcilla	1.0
Arcilla	0.58
Concreto	0.58

4.3.3.2. Velocidad del Agua v

Un flujo de agua excesivamente rápido erosionará las paredes de un canal, mientras que velocidades demasiado bajas permitirán el depósito de sedimento y la obstrucción del mismo. La Tabla 4.3 proporciona las velocidades recomendadas para canales de diferentes materiales [Penche 1998].

Tabla 4.3. Velocidad Máxima del Agua Recomendada.		
Material	Velocidad Máxima	
	Menos de 0.3 m de profundidad (m/s)	Menos de 1.0 m de profundidad (m/s)
Arena	0.3	0.5

Greda Arenosa	0.4	0.7
Greda	0.5	0.8
Greda de Arcilla	0.6	0.9
Arcilla	0.8	2.0
Mampostería	1.5	2.0
Concreto	1.5	2.0

4.3.3.3. Rugosidad n

Cuando el agua pasa por el canal, pierde energía en el proceso de deslizarse por las paredes y el lecho. Mientras más rugoso es el material del canal, hay más pérdida por fricción y mayor será la pendiente o nivel que se requerirá entre la entrada y la salida del canal.

La Tabla 4.4 da los valores del coeficiente de rugosidad n para distintos materiales [Penche 1998]. Si se reviste un canal de tierra, la rugosidad del material de revestimiento determinará el grado de pérdida por fricción.

Tabla 4.4. Coeficiente de Rugosidad n .	
Canales de tierra	
Arcilla	0.0130
Material sólido, suave	0.0167
Arena con algo de arcilla o roca partida	0.0200
Fondo de arena y grava, con lados empedrados	0.0213
Grava fina de unos 10/20/30 mm	0.0222
Grava regular de unos 20/40/60 mm	0.0250
Grava gruesa, de unos 50/100/150 mm	0.0286
Greda con terrones	0.0333
Revestido con piedras	0.0370

Arena, greda, grava y hierbas	0.0455
Canales en roca	
Roca medianamente irregular	0.0370
Roca irregular	0.0455
Roca muy irregular con varias salientes	0.0588
Mampostería de piedra con cemento	0.0200
Paredes de mampostería con base de arena y grava	0.0213
Canales de concreto	
Buen acabado con cemento (enlucido)	0.0100
Acabado con yeso o concreto suave con alto contenido de cemento	0.0118
Concreto no enlucido	0.0149
Concreto con superficie suave	0.0161
Revestimiento de concreto irregular	0.0200
Superficies de concreto irregular	0.0200
Canales de madera	
Tablas cepilladas y bien unidas	0.0111
Tablas sin cepillar	0.0125
Canales viejos de madera	0.0149
Cursos Naturales de agua	
Lecho natural de río con fondo sólido, sin irregularidades	0.0244
Lecho natural de río, con hierbas	0.0313
Lecho natural de río con piedras e irregularidades	0.0333
Torrente con piedras irregulares grandes, lecho sedimentado	0.0385
Torrente con piedras gruesas, con bastante sedimento	0.0500

4.3.3.4. Borde Libre

El borde libre es la distancia vertical que hay entre el nivel normal del agua al extremo superior de las paredes del canal. Su objetivo es evitar que el canal se rebase cuando ingrese mayor cantidad de agua que la proyectada, ya que por ello podría producir daños en la ladera del cerro sobre el que ha sido construido. El borde libre es normalmente un tercio del tirante de agua ó 1.5 m, escogiéndose el mayor de ambos por cuestiones de seguridad.

4.3.3.5. Perímetro Mojado

El perímetro mojado es la longitud en que la sección transversal moja el lecho y los lados del canal, esto puede observar en la Figura 4.6.

$$P = P_1 + P_2 + P_3 \quad (4.9)$$

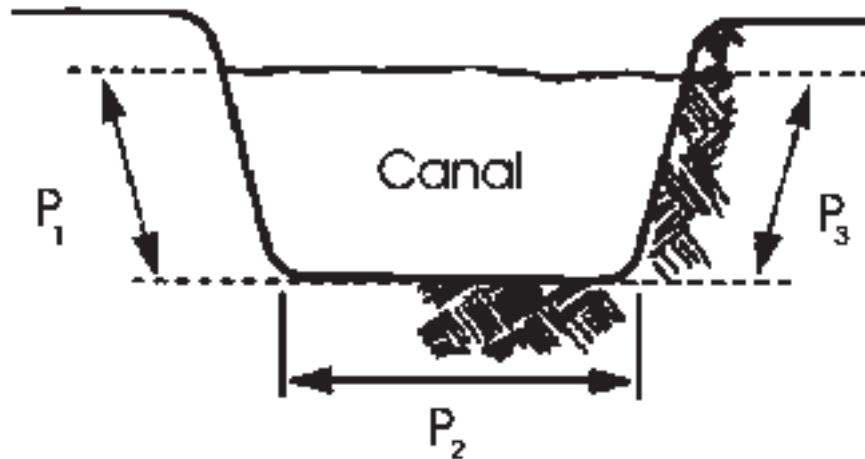


Figura 4.6. Perímetro Mojado.

4.3.3.6. Radio Hidráulico

El radio hidráulico ($R = A/P$) es una cantidad que describe la eficiencia del canal. Si el canal tiene una gran área de sección transversal y un perímetro mojado relativamente

pequeño, entonces con un borde libre normal implica que es eficiente y que el agua tendrá la velocidad requerida con una pérdida relativamente pequeña. El perfil más eficiente es un semicírculo, por lo que la sección trapezoidal es la mejor aproximación a éste.

4.3.3.7. Pasos a Seguir para el Cálculo de un Canal

A continuación se describen los pasos para calcular un canal de derivación, también se selecciona un canal para el caso estudio propuesto. Se tiene como datos:

- Caudal del canal, $Q = 7.314 \text{ m}^3/\text{s}$
- Longitud total del canal, $L = 1,600 \text{ m}$
- Tipo de suelo: con revestimiento de concreto

1. Seleccionar una velocidad adecuada (v). No excediendo las velocidades máximas recomendadas.

De la Tabla 4.3, se selecciona para una profundidad de menos de 1 m una velocidad máxima de 2.0 m/s.

2. De la Tabla 4.2 encontrar el ángulo de talud del canal. Para canales rectangulares usar $Z = 0$, que implica un canal con un ancho que es de dos veces su altura. De la Tabla 4.4 escoger la rugosidad de las superficies mojadas (n) y calcular la sección transversal a partir de la ecuación:

$$A = \frac{Q}{V} \quad (4.10)$$

En este caso se selecciona el valor de $Z = 0.58$, que corresponde a un canal revestido con concreto. El valor de rugosidad seleccionado es para concreto no enlucido $n = 0.0149$.

$$A = \frac{7.314}{2.2} = 3.32 \text{ m}^2$$

3. Calcular la altura (H), el ancho de la plantilla del canal (B), y el ancho de la lámina de agua (W) de la sección más eficiente del canal.

$$H = \sqrt{\frac{A}{2\sqrt{1+Z^2} - Z}} \quad (4.11)$$

$$B = H(2\sqrt{1+Z^2} - 2Z) \quad (4.12)$$

$$W = B + 2HZ \quad (4.13)$$

$$W = 2H\sqrt{1+Z^2} \quad (4.14)$$

Obsérvese que para secciones rectangulares, $Z = 0$, con lo que las Ecuaciones (4.11) a (4.14) se reducen a:

$$H = \sqrt{\frac{A}{2}} \quad (4.15)$$

$$B = 2H \quad (4.16)$$

$$W = B = 2H \quad (4.17)$$

El canal seleccionado es del tipo trapezoidal, por lo que

$$H = 1.38 \text{ m}$$

$$B = 1.58 \text{ m}$$

$$W = 3.18 \text{ m}$$

4. Utilizando la Figura 4.6, calcular el perímetro mojado (P) y calcular el radio hidráulico a partir de la ecuación.

$$R = \frac{A}{P} \quad (4.18)$$

La pendiente S se calcula mediante:

$$S = \left(\frac{nV}{R^{\frac{2}{3}}} \right)^2 \quad (4.19)$$

Ahora es posible construir la sección del canal con la pendiente y las dimensiones requeridas por la sección transversal. Observar primero que el desnivel a lo largo del canal (L) es la longitud por la pendiente del canal.

$$\text{Desnivel del Canal} = L S \quad (4.20)$$

Se selecciona como valor de borde mojado 0.15 m por cuestiones de seguridad. Además de que:

$$P = 4.76 \text{ m}$$

$$R = 0.697 \text{ m}$$

$$S = 0.00145$$

$$\text{Desnivel del Canal} = 2.32 \text{ m}$$

5. Seguir los pasos 1- 4 para cualquier otra sección del canal.
6. Sumar todos los desniveles del canal para cada una de las secciones a fin de obtener el desnivel total. Si este es demasiado grande o demasiado pequeño, repetir todos los pasos pero con una velocidad diferente.

4.3.4. Aliviaderos

Un aliviadero es un tipo de vertedor. Se llama vertedor a un dispositivo hidráulico que consiste en un corte a través del canal sobre el cual se hace circular agua. Los aliviaderos son estructuras de regulación y de protección que sirven para evacuar caudales

de demasías o caudales superiores a los de diseño. Si estas aguas excedentes ingresaran a las diferentes obras que componen el sistema, podrían ocasionar daños de imprevisibles consecuencias.

Su diseño define básicamente tres características: largo, altura y tipo de cresta que es definida por un coeficiente de descarga. En la Figura 4.7 se puede observar un aliviadero de avenidas junto con las compuertas de control de caudal y de vaciado del canal.

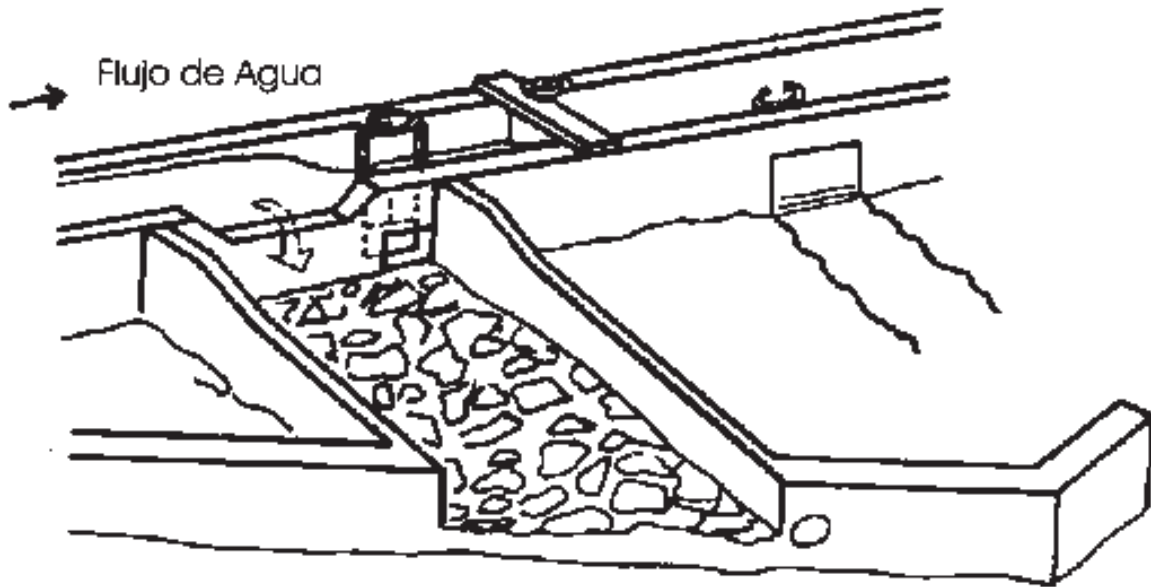


Figura 4.7. Esquema de un Aliviadero.

El aliviadero se combina con las compuertas de control para el desagüe del mismo. En ciertos casos, es necesario detener rápidamente el ingreso de agua al canal, por lo que es conveniente contar con este tipo de mecanismos para cortar el paso de agua a través del canal.

4.3.4.1. Diseño de un Aliviadero

Con las dimensiones previamente calculadas para el canal trapezoidal de derivación que son de 1.38 m de altura, 1.58 m de base inferior y 3.18 m de base superior, con un

caudal de diseño de $7.314 \text{ m}^3/\text{s}$ y circulando a una velocidad de 2.5 m/s , en época de estiaje. Se debe de calcular las dimensiones de un aliviadero para época de lluvias, en la cuál el caudal aumenta a $33.060 \text{ m}^3/\text{s}$, representando un 463% de aumento en el flujo de caudal.

Mediante la ecuación (4.21) se calcula el tirante de agua (d) para el flujo de diseño y para el flujo máximo de caudal, esto es:

$$d = \frac{Q}{Vb} \quad (4.21)$$

Donde

b es la base inferior del canal.

$$d_1 = \frac{7.314}{(2.5)(1.58)} = 1.85 \text{ m}$$

$$d_2 = \frac{33.060}{(2.5)(1.58)} = 8.36 \text{ m}$$

La carga del vertedero es $d_2 - d_1$, mientras que $Q = Q_2 - Q_1$. Se sustituyen estos valores en la formula de vertedero

$$Q = C_w L_v h_c^{\frac{3}{2}} \quad (4.22)$$

Donde

C_w Es el coeficiente de descarga, valor típico 1.6

h_c Carga del vertedero

L_v Longitud del vertedero

Sustituyendo valores y resolviendo la Ecuación (4.22) para L_v

$$L_v = 0.968 \text{ m}$$

En la práctica es conveniente aumentar la longitud obtenida del aliviadero, ya que su construcción no demanda mayores gastos y por el contrario garantiza un mejor funcionamiento.

4.3.5. Cámara de Carga y Desarenador

La cámara de carga consiste en un depósito situado al final del canal de derivación, es de donde parte la tubería forzada. Esta cámara es necesaria para evitar la entrada de aire en la tubería forzada, que provocaría sobre-presiones.

El agua captada del río y conducida a la turbina transporta pequeñas partículas de materia sólida en suspensión compuesta de materiales abrasivos (como arena) que ocasionan un rápido desgaste de los alabes de la turbina. Para eliminar este material se usan los desarenadores. En ellos la velocidad del agua es reducida con el objeto de que las partículas de arena o piedras se asienten el fondo de donde podrán ser removidas oportunamente. Es necesario que el sedimento se asiente tanto a la entrada del canal como a la entrada de la tubería o cámara de carga.

En la Figura 4.8 se puede observar un diseño simple de una cámara de carga, con un desarenador a la entrada del canal y la salida conectada a la tubería forzada o de presión.

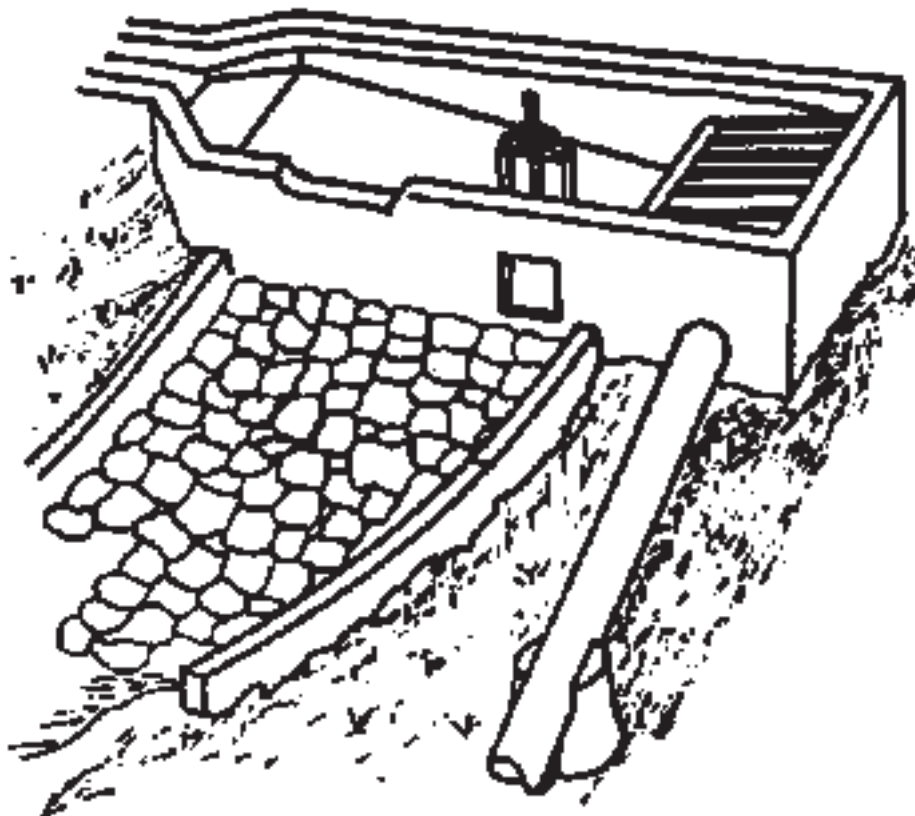


Figura 4.8. Esquema de Cámara de Carga con Desarenador.

El desarenador debe cumplir los siguientes principios importantes [ITDG 1996]:

- Deben de tener una longitud y un ancho adecuados para que los sedimentos se depositen, sin ser demasiado voluminosos o caros.
- Deben permitir una fácil eliminación de los depósitos.
- La eliminación de sedimentos a través de la compuerta debe hacerse cuidadosamente para evitar la erosión del suelo que rodea y soporta la base de la tubería y del depósito. Es mejor construir una superficie empedrada similar al canal de desagüe del aliviadero.
- Se debe impedir la turbulencia del agua causada por cambios de área o recodos que harían que los sedimentos pasen hacia la tubería de presión.
- Tener capacidad suficiente para permitir la acumulación de sedimentos.

La longitud total de la cámara de carga se divide en tres partes: entrada (L_e), decantación (L_d) y salida (L_s). La longitud de decantación se puede calcular como:

$$L_d = \frac{V_h}{V_d} d_d f \quad (4.23)$$

Donde:

- f Es el factor de seguridad; para este tipo de mini o micro-centrales se recomienda un valor de 2 a 3.
- V_h Es la velocidad horizontal del agua; para diseñar el desarenador se recomienda elegir un valor de 0.2 m/s.
- V_d Es la velocidad vertical de partículas suspendidas en el agua; en la mayoría de las mini o micro-centrales es suficiente con eliminar partículas que tengan más de 0.3 mm de diámetro, las cuales tienen velocidades de decantación mayores de 0.03 m/s. En la Tabla 4.5 se ilustran valores típicos de velocidad de decantación para partículas de arena [ITDG 1996].
- d_d Es la profundidad de decantación; se recomienda no seleccionar valores mayores a 1 m para fines de diseño.

Tabla 4.5. Velocidad de Decantación de las Partículas de Arena.	
Tamaño de partícula (mm)	Velocidad (m/s)
0.1	0.01
0.3	0.03
0.5	0.05
1.0	0.10

4.3.5.1. Diseño de una Cámara de Carga con Desarenador

Para el caso de estudio propuesto, se requiere diseñar la longitud de una cámara de carga con desarenador, se consideran los siguientes factores:

- Factor de seguridad de 2.
- Se considera el paso de partículas de arena de 0.3 mm de diámetro.
- La velocidad horizontal del agua a través del desarenador es de 0.2 m/s.
- Como profundidad de decantación se selecciona un valor de 1 m.

$$W = \frac{Q_{min}}{Vh d_d} \quad (4.24)$$

Donde:

W Ancho del desarenador.

Por lo que de las ecuaciones (4.23) y (4.24) obtenemos las características de la cámara de carga con desarenador:

$$W = 5.55 \text{ m}$$

$$L_d = 13.33 \text{ m}$$

4.3.6. Tubería de Presión

La tubería forzada o de presión conduce el agua desde la cámara de carga hasta la turbina. Generalmente la tubería es de acero. Al inicio de la tubería se instala un órgano de cierre que permite evitar el paso de agua y vaciar la tubería poco a poco. Los principales componentes de una estructura de tubería de presión pueden ser observados en la Figura 4.9.

Debido a que el costo de esta tubería puede representar gran parte del presupuesto de toda la mini-central, es prioritario optimizar su diseño para reducir no sólo los costos de mantenimiento sino de la inversión inicial.

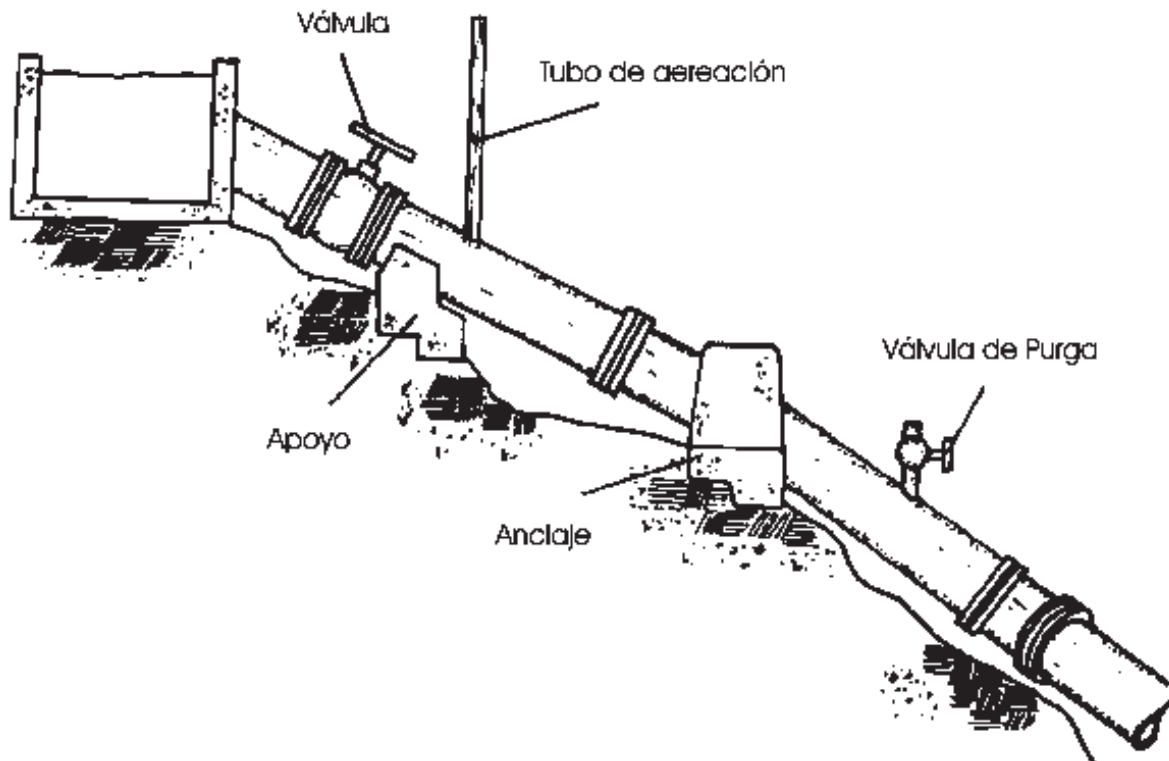


Figura 4.9. Componentes Principales de una Tubería de Presión.

Para que los costos de mantenimiento sean bajos es necesario colocar soportes y anclajes en la tubería en pendientes estables y encontrar buenos cimientos. Deberá procurarse que no exista peligro de erosión por desprendimientos en la laderas, pero sí un acceso seguro para hacer los trabajos de mantenimiento y reparación.

En resumen se tienen las siguientes pautas para seleccionar una tubería de presión [Penche 1998]:

1. Considerar las diferentes clases de material disponible, tipos de uniones; comparar formas y costos de mantenimiento. Anotar los diámetros de tubería y los espesores de pared disponibles.
2. Calcular la pérdida de altura por fricción del 4-10%, para una serie de materiales y diámetros. Tabular los resultados.
3. Calcular la probable presión adicional por golpe de ariete en caso de un cierre brusco del paso de agua a la tubería, y sumarla a la presión estática. Calcular espesores de pared adecuados para los tamaños de tubería.
4. Diseñar los soportes, anclajes y uniones para la tubería de presión.
5. Preparar una tabla de opciones calculando el costo total de cada una y ver si los componentes están disponibles en el mercado.
6. La selección del diámetro se hará tratando de obtener el menor costo y las menores pérdidas de energía.

Al decidir que material se empleará para un proyecto tienen que ser considerados los siguientes factores:

- Presión de diseño.
- Tipo de unión.
- Diámetro y pérdida de fricción.
- Peso y grado de dificultad de la instalación.
- Accesibilidad al sitio.
- Terreno y tipo de suelo.
- Mantenimiento y vida esperada de la instalación.
- Condiciones climáticas.
- Disponibilidad.
- Costo relativo.

Dentro de los materiales comúnmente usados en proyectos mini-hidráulicos para la tubería de presión, tenemos:

- Acero comercial.
- Policloruro de vinilo (PVC).
- Polietileno de alta densidad.
- Hierro dúctil centrifugado.
- Asbesto-cemento.
- Resina poliéster con fibra de vidrio reforzado.

La Tabla 4.6 ilustra cada una de sus características relativas, tomando como escala Malo = 1 y Excelente = 5 [ITDG 1996].

Tabla 4.6. Comparación de los Diferentes Materiales para Tuberías de Presión.					
Material	Pérdida por Fricción	Peso	Corrosión	Costo	Presión de Trabajo
Hierro dúctil	4	3	2	1	5
Asbesto cemento	3	3	4	4	4
PVC	5	5	4	4	4
Acero comercial	3	3	3	2	5
Polietileno	5	5	5	3	4

Para el caso de estudio propuesto se selecciona una tubería de presión hecha de acero comercial, ya que presenta una excelente respuesta a la presión de trabajo, con la desventaja que incrementa el costo de la inversión inicial del proyecto.

4.3.6.1. Diseño y Selección de la Tubería de Presión

Para el caso de estudio analizado, la tubería de presión tendrá una longitud de 550 m. En cuanto a su diámetro, éste puede pre-dimensionarse teniendo en cuenta la limitación de la velocidad del agua que debe existir a la entrada de la válvula de guarda de la turbina.

Típicamente en centrales micro y mini-hidráulicas se considera

- Para válvulas de mariposa: $V \leq 4 \text{ m/s}$
- Para válvulas esféricas: $V \leq 7 \text{ m/s}$

Aunque no debe adoptarse como criterio definitivo, en saltos inferiores a 50 m suelen instalarse válvulas de mariposa y en saltos superiores a 200 m, esféricas.

Conocidos el caudal de diseño de la turbina y la máxima velocidad permitida a la entrada de la válvula de guarda de turbina puede obtenerse la sección de esta válvula y por tanto, su diámetro:

$$S = \frac{Q}{V} \quad (4.25)$$

Donde:

- Q Caudal en m^3/s
V Velocidad en m/s
S Sección en m^2

El diámetro de la válvula da idea del diámetro de tubería a instalar, aunque hay que tener en cuenta que es conveniente que éste sea mayor, con el objeto de disminuir las pérdidas de carga.

Para este caso de estudio, se instalará una válvula de mariposa automática. Donde el diámetro de la válvula es $D = 2.29 \text{ cm}$. La tubería de presión se dimensiona buscando conseguir el mayor salto neto posible, es decir, las menores pérdidas de carga. En este caso

propuesto, la tubería forzada será de acero al carbono, para poder aislar en caso necesario la cámara de carga de la tubería, se instalará al inicio de ésta una válvula.

4.3.7. Edificio

Generalmente se construye un solo edificio cuyas dimensiones son adecuadas para albergar todo el equipo electro-mecánico de la micro o mini-central. Dimensiones típicas para este tipo de construcciones son de 5 a 10 *m* de altura, con dimensiones interiores de 15 *m* a 20 *m* de longitud, con una anchura de la mitad de la longitud seleccionada.

4.3.8. Canal de Salida

Es el canal por el cuál se restituye el agua al cauce del río después de haber pasado por la turbina hidráulica. Generalmente es un canal de longitud pequeña, cuyas características son similares a las propuestas en el canal de derivación.

4.4. Equipamiento Electro-mecánico

Dentro del equipamiento electro-mecánico se considera los siguientes componentes fundamentales

- Turbinas
- Generadores
- Elementos de regulación
- Transformadores
- Celdas y cuadros eléctricos
- Línea eléctrica de interconexión (transmisión o distribución)

4.4.1. Turbinas Hidráulicas

Son máquinas capaces de transformar la energía hidráulica en energía mecánica en su eje de salida. Su acoplamiento mediante un eje a un generador permite, finalmente, la generación de energía eléctrica.

La Tabla 4.7 resume las características de las turbinas comúnmente utilizadas en sistemas hidráulicos [Sánchez 2000].

Tabla 4.7. Características Principales de Turbinas Hidráulicas.						
Turbina		N_s (rpm, HP, m)	Q (m ³ /s)	H (m)	P (kW)	$\eta_{m\acute{a}x}$ (%)
Acción	Pelton	30 - 70	0.05 - 50	30 - 1,800	2 - 300,000	91
	Turgo	60 - 260	0.025 - 10	15 - 300	5 - 8,000	85
	Michell - Banki	40 - 160	0.025 - 5	1 - 50	1 - 750	82
Reacción	Bomba Rotodinámica	30 - 170	0.05 - 0.25	10 - 250	5 - 500	80
	Francis	L: 60 - 150 N: 150 - 250 R: 250 - 400	1 - 500	2 - 750	2 - 750000	92
	Deriaz	60 - 400	500	30 - 130	100,000	92
	Kaplan y de Hélice	300 - 800	1000	5 - 80	2 - 200,000	93
	Axiales: -Tubular -Bulbo -Generador Periférico	300 - 800	600	5 - 30	100,000	93

Donde:

N_s Velocidad específica.

L Lento.

N Normal.

R Rápida.

La potencia generada en una turbina se obtiene de las siguientes ecuaciones [ITDG 1996]:

$$P_E = P\eta_{TR}\eta_G \quad (4.26)$$

$$P = \frac{pgQH\eta}{K} = \frac{P_E}{\eta_{TR}\eta_G} = \frac{QH\eta}{102} \quad (4.27)$$

$$\eta_{GR} = \eta\eta_{TR}\eta_G \quad (4.28)$$

Donde:

P_E	potencia eléctrica en los bornes del generador, kW
P	potencia del eje de la turbina, kW
Q	caudal de la turbina, m^3/s
H	salto neto, m
ρ	densidad del agua, $1,000 \text{ kg}/m^3$
η	eficiencia de la turbina, adimensional
η_{TR}	eficiencia de la transmisión, adimensional
η_G	eficiencia del generador, adimensional
η_{GR}	eficiencia del grupo de generación, adimensional
K	constante: $K = 1000 \text{ W}/kW$
g	fuerza de gravedad

En caso de no tener información directa de las eficiencias de la turbina o del generador, pueden utilizarse los valores de la Tabla 4.7 para las eficiencias de la turbina y de la Tabla 4.8 para las eficiencias del grupo de generación.

Tabla 4.8. Eficiencia del Grupo de Generación (η_{GR}) [ONUDI 1981].				
Potencia (kW)	Tipo de Turbina			
	Pelton	Michell - Banki	Francis	Axial
<50	58 – 65 %	54 – 62 %	59 – 65 %	58 – 66 %
51 – 500	65 – 69 %	62 – 65 %	66 – 70 %	66 – 70 %
501 - 5000	69 – 73 %	65*	70 – 74 %	70 – 74 %

* Limitación por potencia de 1000 kW.

4.4.1.1. Selección Rápida de la Turbina

Se puede realizar una selección rápida de la turbina para una mini-central hidráulica, utilizando el diagrama de la Figura 4.10 en la que aparecen las diversas turbinas que se usan en la actualidad, ubicadas por zonas de aplicación referidas al salto neto, caudal, potencia y una eficiencia promedio [PEMH 2005].

El Diagrama se basa en la ecuación:

$$P = \frac{\rho g Q H \eta}{K} = \frac{P_E}{\eta_{TR} \eta_G} = \frac{Q H \eta}{102} \quad (4.29)$$

de la cual se despeja el salto neto, de modo que:

$$H = \frac{P}{\rho g \eta} \frac{1}{Q} \quad (4.30)$$

Tomando logaritmos:

$$\log H = \log \left(\frac{P}{\rho g \eta} \right) - \log Q \quad (4.31)$$

Asumiendo una eficiencia promedio se obtiene una relación lineal ente H y Q para una potencia constante P en coordenadas logarítmicas.

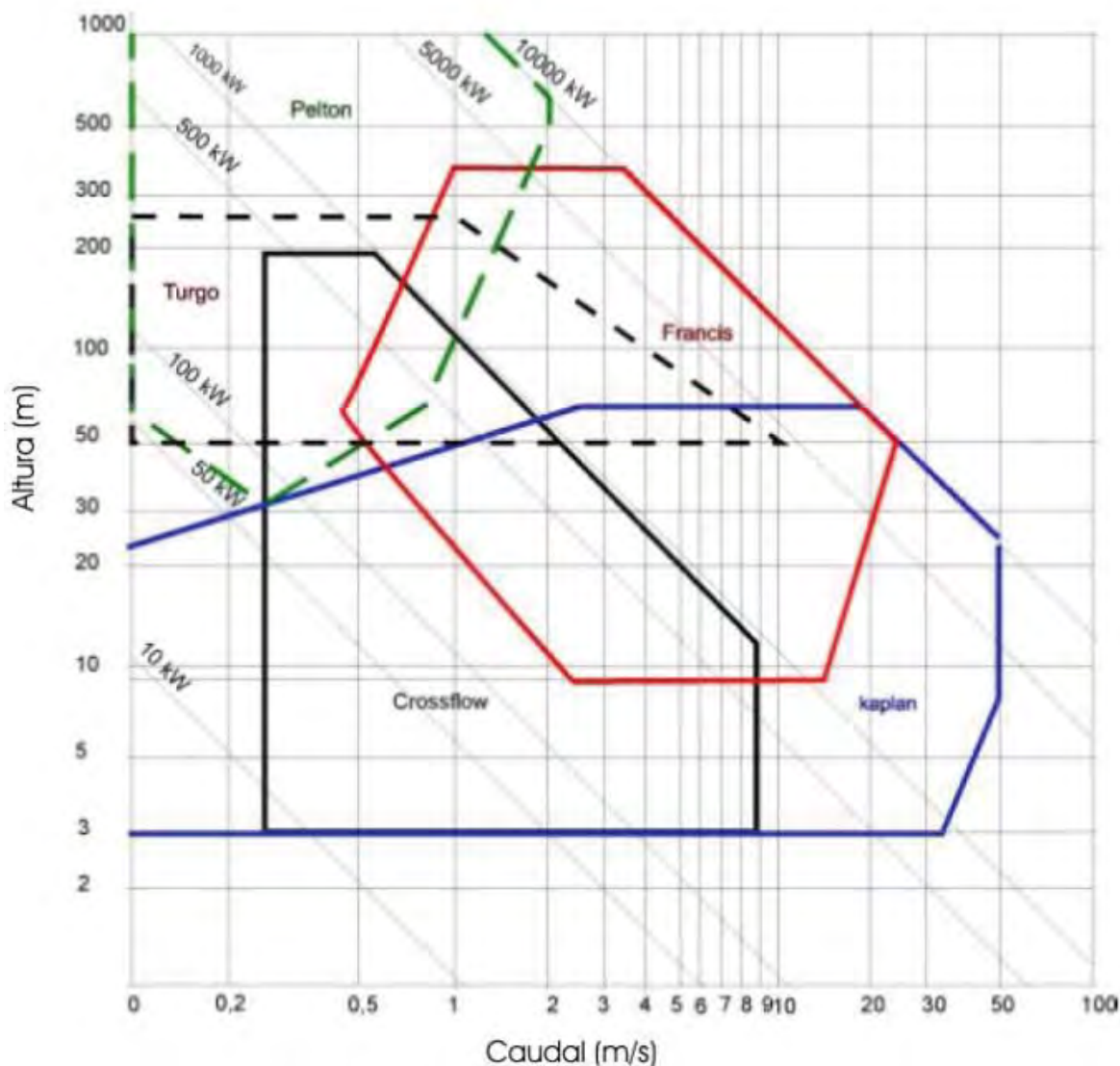


Figura 4.10. Diagrama de Funcionamiento de Turbinas Hidráulicas.

Para este caso de estudio propuesto, se tiene un flujo de diseño de $7.314 \text{ m}^3/\text{s}$, con una altura aprovechable de 15 m , de la gráfica de la Figura 4.10 se puede observar que para los datos propuestos de diseño se puede elegir entre una turbina Francis, Kaplan o de Flujo Cruzado.

Para conocer las características específicas de la turbina seleccionada, es necesario tener las tablas de tipos y características del fabricante de turbinas. En la página de la compañía Alstom se puede acceder a un programa que selecciona y presenta las características para equipo electro-mecánico especial utilizado en centrales micro y mini-hidráulicas [Alstom 2005].

Proporcionando los datos de caudal y altura, el programa Mini Aqua Configurator despliega una gráfica con el tipo de turbinas disponibles, esta gráfica es ilustrada en la Figura 4.11, se puede observar la posición exacta del tipo de turbina seleccionada (cuadro en la parte central de la gráfica).

El tipo de turbina seleccionada el caso de estudio considerado es Kaplan o Francis. Se recomienda el uso de la turbina Kaplan ya que generalmente es más económica. La potencia estimada por el programa para la turbina es de 0.97 MW.

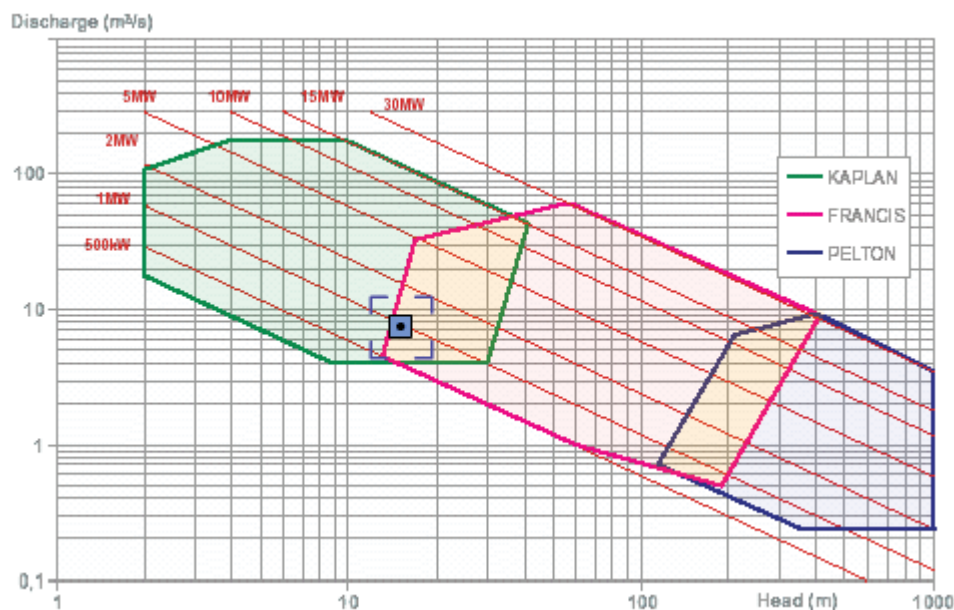


Figura 4.11. Diagrama de Turbinas Disponibles en Alstom para Centrales Mini-hidráulicas.

Para la Turbina Kaplan se tienen las siguientes características:

- Marca de la turbina: Alstom
- Potencia: 0.97 MW
- Velocidad de trabajo: 720 rpm
- Eficiencia: 88%
- Diámetro de la cabeza de la turbina: 1,060 mm
- Válvula de entrada a la tubería de presión del tipo mariposa, se abre por medio de un servo-motor a presión de aceite y se cierra por medio de un contrapeso.

- Esta compuesta por 5 a 6 alabes, alimentados por 16 inyectores de agua. Los alabes son movibles por medio de un servomotor para garantizar una máxima eficiencia ante cambios en el flujo de agua.
- Incluye gobernador hidráulico automático para limitar el flujo de agua y mantener la velocidad de trabajo constante.
- Acoplamiento con el generador eléctrico por medio de 5 anillos deslizantes contenidos en la flecha.

Por otro lado la Turbina Francis tiene las siguientes características:

- Marca de la turbina: Alstom
- Potencia: 0.97 MW
- Velocidad de trabajo: 500 *rpm*
- Eficiencia: 89%
- Diámetro de la cabeza de la turbina: T3 (7 cm)
- Válvula de entrada a la tubería de presión del tipo mariposa, se abre por medio de un servo-motor a presión de aceite y se cierra por medio de un contrapeso.
- El numero de alabes esta definido por las características del sitio en el cual se instalara y considerando la altura y caudal de diseño, alimentados por 12 inyectores de agua.
- Incluye gobernador hidráulico automático para limitar el flujo de agua y mantener la velocidad de trabajo constante.
- Acoplamiento con el generador eléctrico por medio de un acoplamiento semi-elástico contenido en la flecha.

Para el caso de estudio propuesto se utilizará una turbina Kaplan, esto para reducir la inversión inicial del proyecto.

4.4.2. Generadores

El generador tiene la misión de transformar la energía mecánica de rotación que suministran las turbinas en energía eléctrica en sus terminales. Pueden ser de dos tipos: síncronos y asíncronos.

Los generadores síncronos se encuentran equipados con un sistema de excitación de Corriente Directa (rotatorio o estático) asociado a un regulador de voltaje para que generen energía eléctrica con el mismo voltaje, frecuencia y ángulo de fase de la red a la que se conecten, así como la energía reactiva requerida por el sistema una vez conectados. Los generadores síncronos pueden funcionar aislados de la red ya que su excitación no depende de una red externa. Los generadores síncronos suelen emplearse en centrales con potencia superior a 2.000 kVA conectadas a la red, o en centrales de pequeña potencia que funcionan en forma aislada.

Los generadores asíncronos, simples motores de inducción con rotor en jaula de ardilla, sin posibilidad de regulación de voltaje, giran a una velocidad directamente relacionada con la frecuencia de la red a la que están conectados. Este tipo de generadores extraen su corriente de excitación de la red a la que se encuentran conectados y de ella absorben la energía reactiva necesaria para su propia magnetización. Esta energía reactiva puede compensarse, si se estima conveniente, mediante bancos de condensadores. No pueden generar energía eléctrica cuando están desconectados de la red ya que son incapaces de suministrar su propia corriente de excitación. Es usual emplearlos en centrales de menos de 500 kVA, siempre acoplados a la red.

Para centrales con potencia de entre 500 y 2.000 kVA la elección de un generador síncrono o asíncrono, depende de la valoración económica del proyecto, del funcionamiento del sistema y de los condicionantes técnicos exigidos por la compañía eléctrica.

Los generadores síncronos son más costosos que los asíncronos, pero la eficiencia de los generadores síncronos es de un 2% a 4% mayor a los asíncronos.

El voltaje de generación viene determinado por la potencia del generador. Lo normal es generar a 380 V para capacidades de hasta 1,400 kVA. La generación a 380 V tiene la ventaja de poder emplear transformadores de distribución, y de poder extraer del

secundario la potencia necesaria para los servicios auxiliares de la central. Cuando se genera en alto voltaje, la potencia para los servicios auxiliares se extrae de la línea a través de un transformador reductor de voltaje.

Los generadores pueden ser de eje horizontal o de eje vertical, independientemente del tipo y configuración de turbina utilizada, pero por regla general los generadores adoptan la misma configuración que la turbina.

Para el caso de micro-generadores, su refrigeración es por medio de un sistema abierto de enfriamiento por aire y cuando son mayores, se refrigeran con intercambiadores de calor en base a agua-aire.

4.4.2.1. Sistema de Excitación

La corriente de excitación necesaria para que funcione el generador síncrono, puede ser suministrada por un pequeño generador de corriente directa, conocido como excitador, el cuál se encuentra montado a la flecha principal. La potencia absorbida por este generador de corriente directa representa entre el 0,5% al 1% de la potencia útil del generador. Aunque la tendencia es a utilizar excitadores estáticos que reemplacen a los generadores de corriente directa, aún existen muchos tipos de excitadores rotatorios.

- Excitadores giratorios: Los devanados de campo tanto del generador como del excitador se encuentran colocados en la flecha principal. El excitador es arrancado por medio del campo magnético residual del generador.
- Excitador de corriente alterna sin escobillas: Se utiliza un generador pequeño de corriente alterna cuyo devanado de campo va montado en el rotor del generador principal. La corriente que produce este pequeño generador se rectifica mediante un circuito rectificador, con esto se elimina el problema de mantenimiento de las escobillas. El voltaje en terminales del generador principal se regula mediante un equipo electrónico que actúa sobre la corriente de campo del sistema de excitación.

- **Excitador estático:** La corriente de excitación se extrae de las terminales del generador principal, mediante un transformador. Esta corriente se rectifica por medio de un equipo electrónico y se inyecta en los devanados de campo del generador que se encuentra en el rotor; esto gracias a un sistema de escobillas y anillos deslizantes. Cuando el generador arranca no hay voltaje en sus terminales y por lo tanto no se dispone de corriente de excitación. El magnetismo remanente del generador principal, ayudado si es necesario por una batería, permiten iniciar el funcionamiento, que se normaliza inmediatamente en cuanto el voltaje en sus terminales alcanza un valor considerable. Estos equipos exigen menos mantenimiento, tienen buen rendimiento y alta velocidad de respuesta del generador ante oscilaciones de voltaje.

4.4.2.2. Selección del Micro-generador

La elección del micro-generador en una central mini o micro-hidráulica se realiza principalmente en base a las características seleccionadas de la turbina hidráulica. Es decir, para el caso de estudio propuesto se utilizará un generador síncrono de 0.97 MW de potencia eléctrica, con un voltaje de generación de 380 volts.

El programa desarrollado en Alstom recomienda el uso de su conjunto turbina-generador. Para la turbina seleccionada el micro-generador recomendado y que se utilizará en esta tesis, consta de las siguientes características:

- Generador marca Alstom.
- Disposición Horizontal.
- Factor de potencia: 0.9
- Potencia nominal: 1 MW, 1.5 MVA.
- Velocidad de giro: 720 rpm.
- Voltaje de generación: 380 V a 60 Hz.
- El estator es de acero, con núcleo de alta permeabilidad, bajas pérdidas por ruido y herméticamente sujetado para reducir ruido y vibración. Cuenta con pequeños

huecos con fines de enfriamiento. Sus devanados se encuentran conectados en estrella y proporcionan alta resistencia a aumentos bruscos en el voltaje y tensión mecánica cuando se encuentran operando en condiciones de falla.

- El rotor es devanado de polos salientes.
- Cuenta con un sistema de excitación que cumple con la norma IEC 34-3 (Internacional Engineering Consortium) [IEC 2006]. Es del tipo auto-excitado directo, en el cual la potencia de excitación se toma de las terminales del generador a través de un transformador, conectado a un puente rectificador controlado directamente por la corriente de excitación del generador.
- Es enfriado por aire.

4.4.3. Elementos de Regulación

Son aquellos elementos que regulan los componentes móviles de las turbinas y pueden ser de dos tipos: hidráulicos y electrónicos. Su función es conseguir adecuar la turbina a las circunstancias existentes en cada momento (flujo de caudal que pasa a través de la turbina, velocidad de giro de la turbina, demanda eléctrica, etc.) para que pueda trabajar con el mejor rendimiento energético posible en cada circunstancia.

La turbina hidráulica seleccionada para el caso de estudio propuesto es controlada por medio de un gobernador hidráulico electrónico, el cual cuenta con las siguientes características [Alstom-Control 2005]:

- Modelo: Governor Cubicle Neyrpic ALSPA-SLG.
- Consta de sensores electrónicos de caudal y velocidad; en base a las mediciones obtenidas regula la apertura de los distribuidores reduciendo o aumentando de esa manera, la cantidad de agua utilizada en los alabes de la turbina y por lo tanto regulando la velocidad de giro de la misma.
- De rápido arranque y control en paralelo de los distribuidores.
- Control estable de la velocidad para garantizar una alta calidad de la energía en la red eléctrica.

- Control fino de la generación de potencia para evitar inestabilidad en el sistema.

4.4.4. Transformadores

Son máquinas destinadas a convertir un voltaje de entrada en otro distinto de salida, conservando la potencia constante. El objeto del transformador es elevar el voltaje de generación eléctrica para reducir en lo posible las pérdidas de transmisión en la línea.

Para la central mini-hidráulica propuesta se plantea la utilización de tres transformadores; dos transformadores elevador-reductor de una capacidad nominal de 1.5 MVA y un transformador de 45 kVA para servicios propios en la mini-central. Los transformadores propuestos tienen las siguientes características:

- Transformador trifásico marca Westinghouse.
- Tipo de conexión: delta-estrella aterrizada para el transformador elevador y estrella-estrella aterrizada para el transformador reductor.
- Elevador o reductor con una relación de transformación de 380 V / 13.2 kV.
- Frecuencia de trabajo, 60 Hz.
- El enfriamiento de los devanados se produce por ranuras horizontales, que permiten la circulación de aceite entre las bobinas o por ranuras axiales colocadas en la parte anterior y posterior de los devanados.
- El núcleo del transformador esta compuesto por laminaciones magnéticas con cristales orientados aislados con material denominado carlita.
- El enfriamiento del transformador (aceite y devanado) se realiza mediante la utilización de dos intercambiadores de calor con circulación forzada de aceite y agua.

4.4.5. Celdas y Cuadros Eléctricos

Suelen instalarse generalmente en el interior de la minicentral y están constituidos por diversos componentes eléctricos de regulación, control, protección y medida.

Se propone la utilización de una gaveta de control marca Alstom denominada AQUA, la cuál incluye los controles y sensores necesarios para el funcionamiento correcto del sistema mini-hidráulico como lo es; control de válvulas, gobernador hidráulico, turbina, flecha, generador y sus controles.

El programa incluido en este sistema controla las siguientes funciones de la planta mini-hidráulica:

- Unidad de inicio y apagado de procesos.
- Regulación de la velocidad de la turbina, control de la inclinación de los alabes y del flujo de agua a través de los distribuidores.
- Regulador automático de voltaje (AVR), incluyendo control del factor de potencia y de la potencia reactiva.
- Sincronización y acoplado del generador.
- Protecciones eléctricas de la unidad de generación (voltaje, corriente y frecuencia).
- Monitorio de los estados de funcionamiento de la planta por medio de diagramas.
- Alarmas y manejo de eventos.
- Resguardo periódico de reportes y eventos.
- Control remoto del equipo y modulo.
- Control de funciones auxiliares, como aire acondicionado, puertas, alumbrado, etc.

4.4.6. Línea Eléctrica de Interconexión

Las redes eléctricas de transmisión y distribución, son el último eslabón de la cadena generación-utilización de energía eléctrica. En sistemas de generación distribuida, se utilizan redes de distribución debido al nivel de voltaje al cual se transmite la energía eléctrica a la carga. Los sistemas de distribución pueden clasificarse como:

Industriales: estos sistemas, representan grandes consumidores de energía eléctrica como lo son plantas petroquímicas, siderúrgicas, papeleras, etc.

Comerciales: estos sistemas son los que se desarrollan para grandes complejos comerciales o municipales como Bancos, Aeropuertos, Hospitales, Centros Comerciales, entre otros.

Parques Industriales: son áreas ubicadas generalmente afuera de las ciudades para la instalación de pequeñas o medianas industrias.

Centros Urbanos y Residenciales: son áreas destinadas para la ubicación de casas y generalmente son responsabilidad de las compañías suministradoras de energía eléctrica.

Distribución Rural: Son sistemas con cargas pequeñas dispersamente distribuidas, por lo que representan una baja densidad de carga.

Los tipos de redes de distribución más frecuentemente utilizadas para la electrificación de áreas urbanas, residenciales y parques industriales son:

- Alto y bajo voltaje aéreo.
- Alto voltaje aéreo sin secundario.
- Alto voltaje aéreo con cable secundario múltiple.
- Alto voltaje aéreo con bajo voltaje subterráneo.
- Alto y bajo voltaje subterráneo.

En las normas de construcción de CFE, se clasifican los sistemas primarios de distribución de la siguiente forma [CFE 1995]:

Sistema A. Sistema de 3 Fases a 4 Hilos (3F-4H), conexión estrella, con el neutro sólidamente conectado a tierra en la subestación; neutro corrido desde la subestación y multi-aterrizado.

Sistema B. Sistema de 3 Fases a 3 Hilos (3F-3H), conexión estrella, con el neutro sólidamente conectado a tierra en la subestación.

Sistema C. Sistema de 3 Fases a 3 Hilos (3F-3H), conexión estrella, con el neutro conectado a tierra a través de un reactor en la subestación.

Sistema D. Sistema 3 Fases a 3 Hilos (3F-3H), conexión delta.

Los sistemas C y D, no son recomendados por la CFE para su utilización. Por lo que para el sistema propuesto se utilizará un sistema del tipo B, con un calibre de conductor del tipo 1/0 AWG. Se considerara una distancia de 14 km hasta la carga, se utilizará un poste tipo cruceta sencilla (TS) para la línea de distribución, ver Figura 4.12.

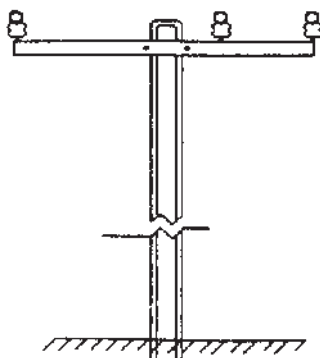


Figura 4.12. Poste con Cruceta Sencilla.

4.5. Equipos Auxiliares

Estos equipos son también necesarios para el correcto funcionamiento de una mini-central. Entre los más comunes están:

- Compuertas
- Reja y máquina limpia-rejas
- Grúa para movimiento de máquinas
- Sistema contra-incendios
- Alumbrado
- Medidores de Caudal

Para el caso de estudio de la mini-central propuesta no se realiza una selección en específico de cada uno de estos componentes, debido a que se requiere la consideración de factores adicionales en la selección de cada uno de ellos como lo es localización exacta de la casa de maquinas, planos de construcción de la misma, presupuesto disponible, etc.

4.6. Conclusiones

En este Capítulo se han descrito de manera general algunas de las recomendaciones más generales en el diseño y selección de los componentes y equipos de una planta mini-hidráulica.

Se plantea la selección o diseño de los componentes más importantes de la obra civil de la mini-central hidráulica propuesta en el río La Antigua, todo ello tomando como base los resultados obtenidos en el Capítulo anterior en el análisis de la serie de tiempo de caudal del río.

Se ha hecho la elección de los componentes electro-mecánicos para la planta mini-hidráulica como lo es: turbina hidráulica, generador, transformadores, línea de distribución, entre otros componentes.

Un aspecto importante asociado con la obra civil y el diseño o selección de cada uno de los componentes del sistema hidráulico-civil, es el conocer de forma física las características geográficas y geológicas de la extensión de terreno destinada para la construcción de la planta mini-hidráulica. Ya que esto proporciona datos más precisos de los componentes anteriormente mencionados. En particular, se han descrito y elegido los componentes de la obra civil para la planta mini-hidráulica propuesta.

En cuanto a la selección del equipo eléctrico (generador, turbina, etc.) generalmente se tiene un cálculo estimado de la capacidad de cada uno de los componentes, pero es en base a las tablas del fabricante que se selecciona el equipo más próximo a las características calculadas inicialmente.

Capítulo 5

Operación en Estado Estacionario y Estado Transitorio de la Micro-red Hidráulica de Generación.

5.1. Introducción

Una parte importante en el análisis de un sistema eléctrico es su estudio en estado estacionario y transitorio. Para el análisis en estado transitorio, el problema consiste en determinar los voltajes y corrientes en presencia de diversos tipos de fallas. En este tipo de sistemas, las fallas se dividen en fallas trifásicas balanceadas y fallas desbalanceadas, tales como; falla de línea a tierra, falla de línea a línea y falla de doble línea a tierra.

La información que se obtiene de las fallas trifásicas balanceadas es utilizada para seleccionar y ajustar relevadores de fase, mientras que de una falla de línea a tierra se obtiene información para la selección y ajuste de los relevadores de tierra. De este tipo de estudios también se obtiene información útil para la selección de otros componentes del sistema de protección como lo son cortacircuitos fusibles, interruptores, etc. También este tipo de estudios es una parte importante de la planeación de la operación de sistemas eléctricos.

La magnitud de las corrientes producidas en una falla depende de la impedancia interna del generador y de la impedancia equivalente de cada uno de los elementos que

intervienen en el circuito. Para el estudio de fallas aplicadas a una microrred de Generación Distribuida se considerarán tres periodos de tiempo:

- *Periodo sub-transitorio*: comprendido por 30 ciclos antes de que ocurra la falla.
- *Periodo transitorio*: que es el periodo de tiempo en el cual se encuentra presente la falla.
- *Periodo de estado estacionario*: que es el periodo de tiempo después de que la falla ha sido liberada y las formas de onda de corrientes y voltajes se restablecen a su condición de pre-falla.

5.2. Micro-generadores Hidráulicos en PSCAD/EMTDC

Una manera de entender el funcionamiento de los sistemas eléctricos es el estudio de su respuesta cuando está sujeto a disturbios y variaciones diversas. La simulación por medio de software es una manera sencilla y económica de producir estas respuestas, las cuales pueden ser estudiadas observando sus valores instantáneos en el dominio del tiempo y sus valores RMS o las componentes de frecuencia fundamental de las señales que se estén estudiando ante tal respuesta.

El programa Electromagnetic Transients including DC (EMTDC por sus siglas en Inglés), es un software adecuado para representar mediante simulación digital las respuestas dinámicas instantáneas en el dominio del tiempo de sistemas eléctricos. PSCAD es la interfaz gráfica de EMTDC, que permite al usuario ensamblar gráficamente un circuito eléctrico, ejecutar la simulación, analizar interactivamente los resultados y manejar los datos obtenidos en este proceso de una manera más sencilla, todo en un ambiente gráfico integrado.

Uno de los modelos contenidos para redes de generación distribuida, es el modelo del generador hidráulico, modelo que puede ser adaptado a micro-generadores hidráulicos

sintonizando cada uno de sus parámetros internos, el cual se encuentra compuesto de los siguientes elementos [PSCAD 2003]:

- Generador síncrono.
- Excitador de CA.
- Modelo de una flecha de torsión.
- Turbina hidráulica.
- Gobernador hidráulico.

La Figura 5.1 ilustra el icono del modelo del generador síncrono, que se encuentra incluido en el modelo de generador hidráulico dentro de PSCAD.

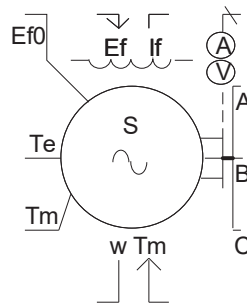


Figura 5.1 Icono del Modelo del Generador Síncrono.

donde:

E_f voltaje de campo.

E_{f0} voltaje de campo remanente del generador.

I_f corriente de campo.

T_e par eléctrico.

T_m par mecánico.

ω velocidad de giro del generador.

V/I voltaje RMS y corriente RMS en terminales del generador.

A, B, C terminales para la conexión eléctrica.

Para el excitador del generador síncrono se utiliza el modelo que se ilustra en la Figura 5.2, que es un excitador de CA, el cual se encuentra desarrollado en base al modelo presentado en el Apéndice B de la tesis y cuyo diagrama de bloques se encuentra ilustrado en la Figura B1.

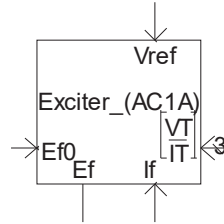


Figura 5.2. Icono del Modelo del Excitador de CA.

donde:

$Ef0$ voltaje de campo remanente del generador.

Ef voltaje de campo.

If corriente de campo.

VT/IT voltaje RMS y corriente RMS en terminales del generador.

$Vref$ voltaje de referencia en terminales del generador síncrono.

Un componente que simula los efectos dinámicos de la flecha rotatoria que conecta a la turbina con el generador es el modelo de la flecha de torsión, ilustrado en la Figura 5.3. Además incluye un sistema del estabilizador de potencia que puede ser activado por medio de un menú. El modelo se encuentra desarrollado en base al diagrama de bloques de la Figura B2, ilustrado en el Apéndice B de la tesis. Este componente es importante cuando se realizan estudios de control de velocidad en el sistema hidráulico.

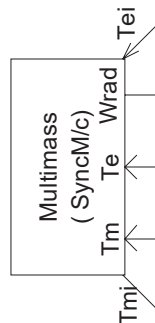


Figura 5.3. Icono del Modelo de la Flecha de Torsión.

donde:

T_e par eléctrico.

T_m par mecánico.

W_{rad} velocidad aplicada al generador.

El modelo de turbina hidráulica contenido en PSCAD se encuentra desarrollado en base a los diagramas de bloques presentados en Apéndice B de este trabajo, ver Figuras B3, B4, B5 y B6. Por medio de menús desplazables se puede seleccionar las características y tipo de la turbina. El icono para la turbina se ilustra en la Figura 5.4.

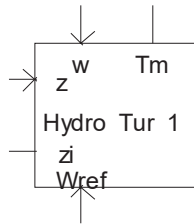


Figura 5.4. Icono del Modelo de la Turbina Hidráulica.

donde:

T_m par mecánico.

W_{ref} velocidad de referencia.

ω velocidad de giro de la turbina.

z posición de apertura de la válvula.

z_i posición inicial de apertura de la válvula.

En la Figura 5.5 se ilustra el icono del gobernador hidráulico contenido en PSCAD; este modelo contiene varios tipos de controladores desarrollados en base a los diagramas de bloques de la Figura B7, los cuales son seleccionables dentro de las características del modelo.

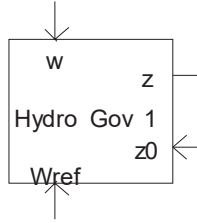


Figura 5.5. Icono del Modelo del Gobernador Hidráulico.

donde:

- w_{ref} velocidad de referencia.
 ω velocidad de giro de la turbina.
 z posición de apertura de la válvula.
 z_i posición inicial de apertura de la válvula.

5.3. Casos de Estudio

La micro-red de generación distribuida que se ilustra en la Figura 5.6 representa el sistema de generación mini-hidráulico propuesto en el Capítulo 4 de esta tesis. Es el modelo representado en PSCAD/EMTDC de cada uno de los componentes del sistema propuesto para la serie de tiempo Cardel. Este sistema es utilizado para propósitos de análisis de una micro-red hidráulica en su estado de operación estacionario; además se analizará su comportamiento transitorio aplicándole diversos disturbios.

El modelo contiene un generador síncrono de una capacidad de 1 MW (1.5 MVA) de 380 Volts a 60 Hz, su primo motor es una turbina del tipo Kaplan de eje horizontal, con un gasto de diseño de 7,314 lps a una velocidad síncrona de 720 rpm. La unidad de generación se encuentra conectada a un transformador trifásico cuyo voltaje en el devanado primario es de 380 V y de 13.2 kV en el secundario; la línea de distribución tiene una longitud de 14 km, de un conductor de 3 hilos c/u del tipo 1/0 AWG, en su extremo de recepción se encuentra conectado un transformador trifásico reductor, de relación 13.2/0.24 kV, el cual alimenta a una carga balanceada de 0.8 MW (1.0 MVA) conectada en configuración estrella. Los datos de este sistema de prueba se detallan en el Apéndice C.

El diagrama unifilar para el sistema de generación distribuida propuesto es ilustrado en la Figura 5.7.

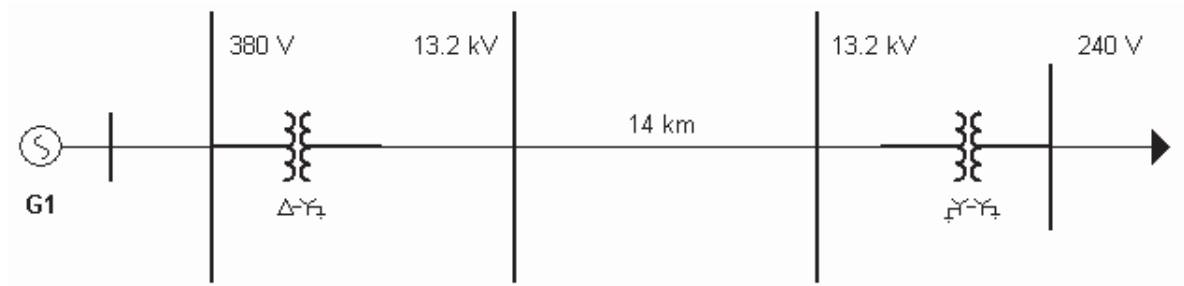


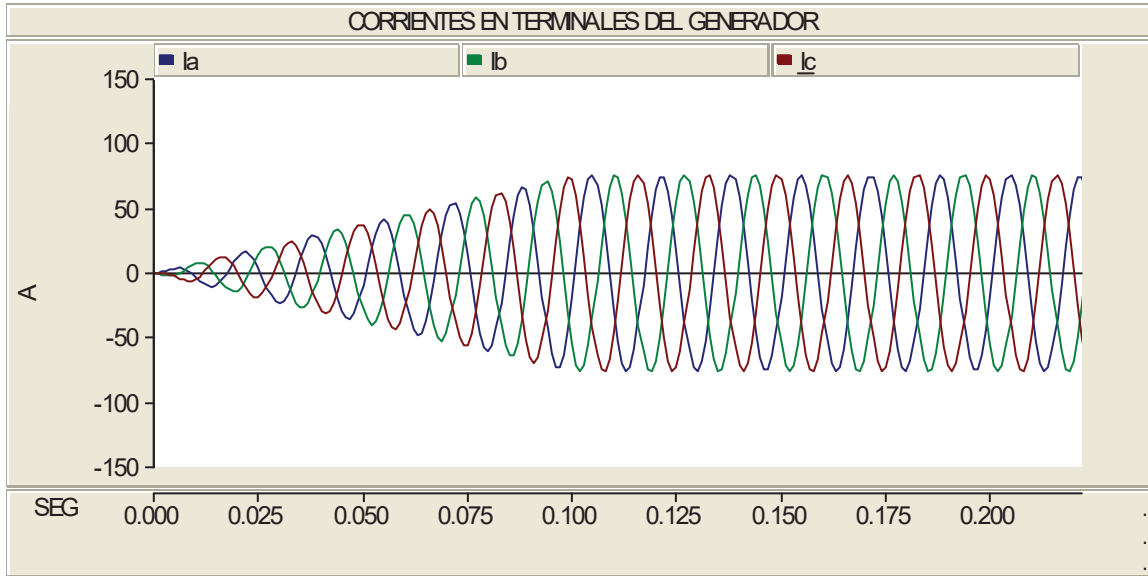
Figura 5.7. Diagrama Unifilar del Sistema de Generación Propuesto.

5.3.1. Operación en Estado Estacionario

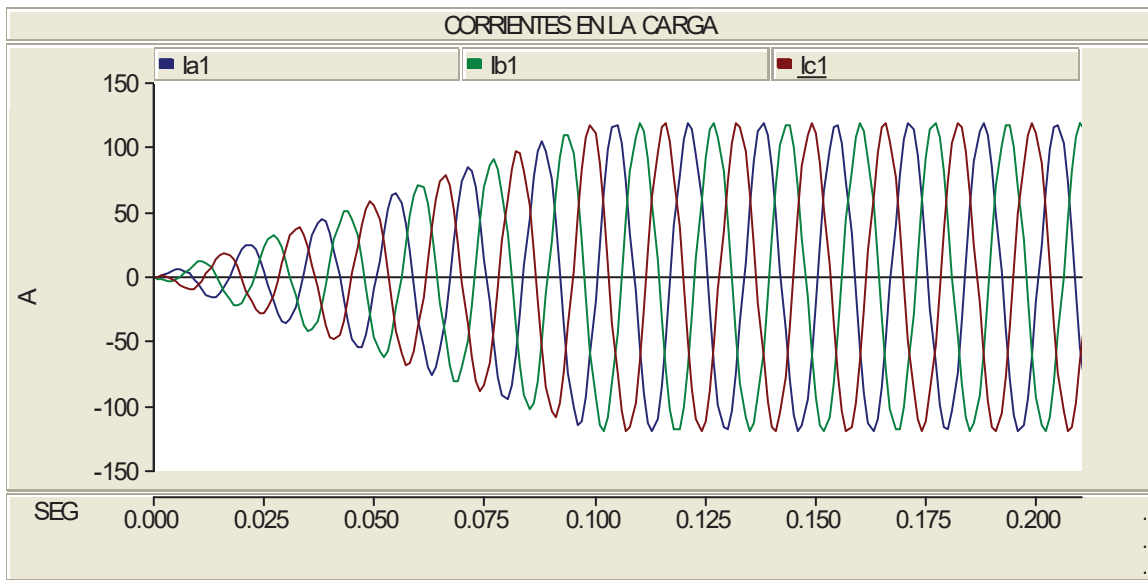
En este caso de estudio se analiza el comportamiento de las corrientes y voltajes en elementos y terminales seleccionadas del sistema. En específico: en terminales del generador y en la carga del sistema bajo estudio. Se considera que el flujo de agua es constante con una carga de 7,134 *lps* y que el generador parte del reposo hasta que alcanza su velocidad síncrona de trabajo.

En la Figura 5.8 (a) se puede observar que cuando el micro-generador se encuentra en estado de reposo no hay corriente alguna en sus terminales. Después de que inicia el flujo de agua a través de la turbina hidráulica, el micro-generador síncrono empieza a girar hasta que alcanza una velocidad de 720 *rpm*, que es su velocidad síncrona de trabajo; a esta velocidad la amplitud de la onda de corriente ha aumentado a 75.68 A y se mantiene constante. El micro-generador alcanza su estado estacionario balanceado de operación en 0.11 segundos.

Así mismo en la Figura 5.8 (b) se muestra el comportamiento de las corrientes suministradas a la carga por medio del transformador reductor; en este caso las corrientes presentan una amplitud máxima de 118.23 A en estado estacionario



(a)



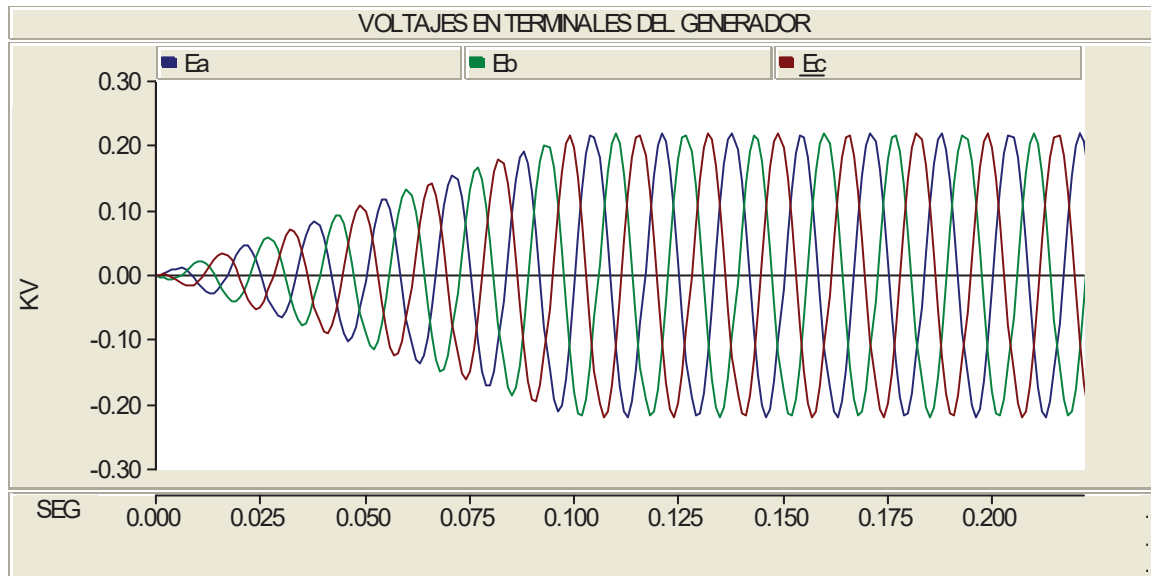
(b)

Figura 5.8. Corrientes de Estado Estacionario. (a) Corrientes en Terminales del Generador, (b) Corrientes en la Carga.

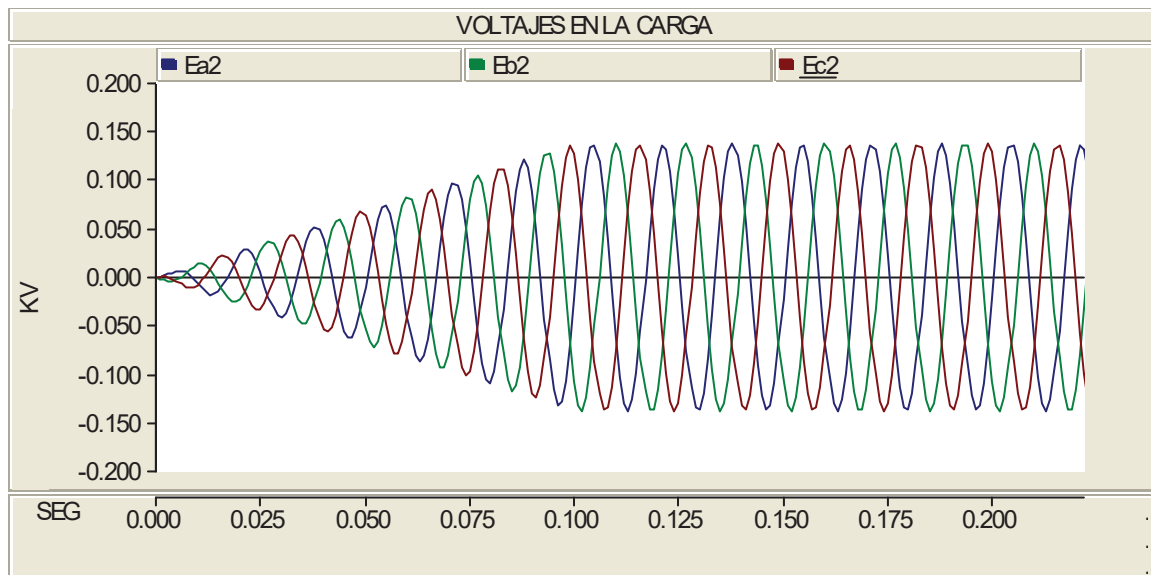
La forma de onda y amplitud de los voltajes obtenidos en terminales del micro-generador hidráulico se muestran en la Figura 5.9 (a). Al igual que en la Figura anterior se observa que el micro-generador síncrono alcanza el estado estacionario de operación en un tiempo de 0.11 segundos después de iniciado el flujo de agua a través de la turbina

hidráulica, generando un voltaje senoidal de salida en sus terminales de 0.219 kV de amplitud.

De igual manera, en la Figura 5.9 (b) se ilustra el comportamiento de los voltajes en la carga del sistema. Nótese que los voltajes de fase a tierra tienen una amplitud de 0.138 kV debido a la acción del transformador reductor de distribución.



(a)



(b)

Figura 5.9. Voltajes de Estado Estacionario. (a) Voltajes en Terminales del Generador, (b) Voltajes en la Carga.

5.3.1.1. Regulación de Voltaje en la Línea de Distribución

La *regulación de voltaje* consiste en determinar el rango de variaciones o caídas de voltaje permisibles a lo largo de la línea de distribución para garantizar su adecuada operación. Es importante mantener el voltaje lo más constante posible, ya que si existen variaciones frecuentes de voltaje en una red de distribución se originan los siguientes problemas [UBIOBIO 2004]:

- La vida útil de los equipos se deteriora, produciéndose en algunos casos daños irreparables.
- Un voltaje muy elevado puede dañar el aislamiento de los equipos o saturar los transformadores.
- Un voltaje bajo puede producir malfuncionamiento de los equipos o provocar fallas prematuras en estos.

La manera más sencilla de regular el voltaje es localmente, en los diversos centros de consumo. Se dispone para ello de los siguientes métodos:

- Inyección de potencia reactiva.
- Modificación de la Reactancia.
- Regulación de voltaje por medio de variación de taps en el transformador.

El medio más sencillo de obtener la regulación de voltaje es variando la relación de vueltas entre el primario y secundario de un transformador o auto-transformador. Con este objeto los transformadores van provistos de derivaciones en sus bobinados y de un dispositivo cambiador de derivaciones.

El cambio de derivaciones puede hacerse en vacío o bajo carga. El cambio de derivaciones en vacío, exige la desconexión previa del transformador y su operación es siempre manual. El cambio de taps por el control remoto mediante algún mecanismo o motor eléctrico, se emplea para ajustar el voltaje en algunos procesos que permiten la interrupción del suministro de energía eléctrica por algunos segundos.

Desde hace algunos años se han desarrollado mecanismos y dispositivos que permiten hacer el cambio de derivaciones manual o automáticamente en un transformador sin necesidad de desenergizar el transformador y desconectar la carga, permitiendo así la regulación de voltaje en grandes bloques de potencia, sin interrupción de la energía a la carga. El cambio de derivaciones bajo carga permite mantener un voltaje secundario constante con voltaje primario variable, controlar el voltaje secundario para carga variable, controlar el flujo de potencia reactiva entre dos ramas de una red en anillo cerrado, etc. El mecanismo con que se hace el cambio de taps recibe el nombre de *cambiador de derivaciones bajo carga (Load Tap Changer)*.

En nuestro país, el porcentaje de regulación de voltaje para líneas de distribución debe ser menor al 5% [CFE 1995]. En el caso de estudio propuesto se obtuvo el voltaje en el nodo de envío de la línea de distribución, así como en el nodo de recepción y por medio de la Ecuación (5.1) se obtuvo la regulación de voltaje para la línea de distribución propuesta.

$$\Delta V = \frac{V_e - V_r}{V_e} \times 100\% \quad (5.1)$$

Donde:

- ΔV Regulación de voltaje.
- V_e Voltaje en el nodo de envío (7.56 kV).
- V_r Voltaje en el nodo de recepción (7.31 kV).

Entonces:

$$\Delta V = \frac{7.56kV - 7.31kV}{7.56kV} \times 100 = 3.30\%$$

5.3.2. Operación en Estado Transitorio

Para el estudio en estado transitorio se considera la aplicación de una falla trifásica y de fase a tierra, respectivamente, en el extremo de recepción de la línea de distribución,

observándose el comportamiento de los voltajes y corrientes en cada caso. Las fallas son aplicadas en un tiempo de simulación de 3 segundos, tiempo en que el sistema ya encuentra operando en su estado estacionario, la falla se sostiene por 0.25 segundos y después se libera. Cuando la falla en el sistema ha sido liberada, el estado estacionario del sistema es determinado cuando dos periodos consecutivos de la forma de onda tiene una variación en magnitud entre ellos menor a 0.01 volts. En todos los casos la falla se aplica en el punto A del sistema, en el extremo de recepción de la línea de distribución, como es ilustrado en el diagrama unifilar de la Figura 5.10.

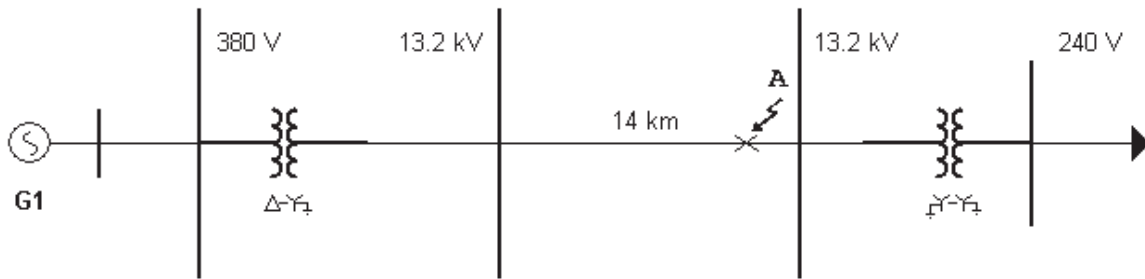


Figura 5.10. Falla en Sistema de Generación Propuesto.

5.3.2.1. Falla Trifásica a Tierra en la Línea de Distribución

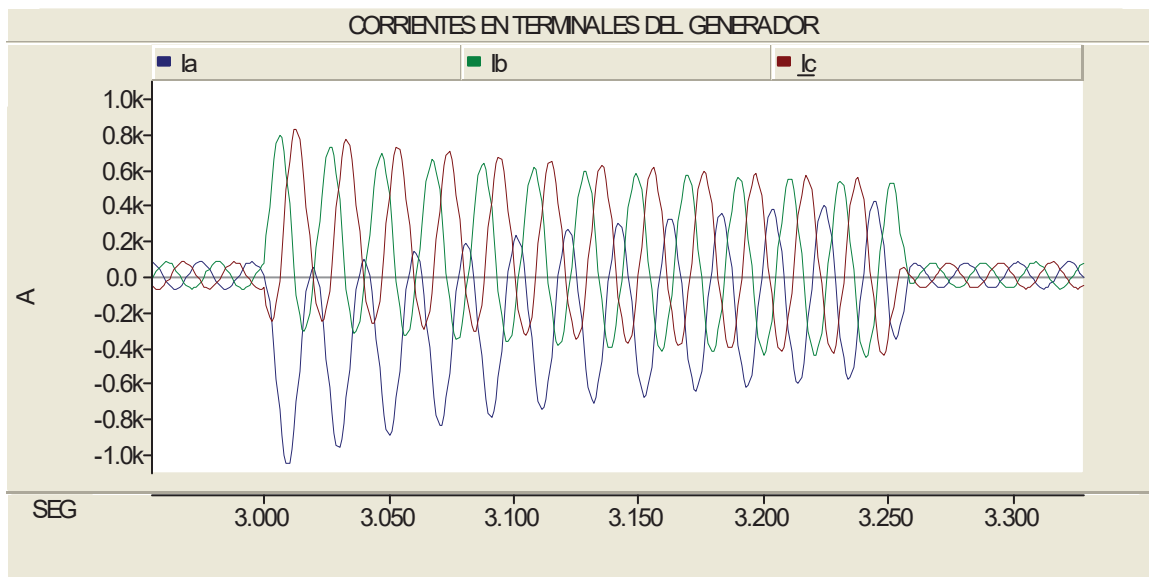
La falla más severa simulada en el sistema eléctrico de potencia propuesto es un cortocircuito trifásico, ya que involucra considerables esfuerzos mecánicos y eléctricos; si la falla permaneciera presente por un tiempo prolongado esta podría dañar severamente el equipo eléctrico cercano al punto de falla. En este caso de estudio se analiza el comportamiento de las corrientes y voltajes ante una falla trifásica a tierra en el extremo de recepción de la línea de distribución.

En la Figura 5.11 (a) se ilustra el comportamiento de las corrientes en terminales del generador. Previo a la ocurrencia de la falla las corrientes tienen una amplitud de 75.68 A; al ocurrir la falla en un tiempo de simulación de 3 segundos, la corriente en cada una de las fases se eleva; en la fase A alcanza un pico máximo de 1.12 kA, en la fase B de 0.79 kA y en la fase C de 0.82 kA, permanece en ese estado hasta que la falla es liberada 0.25

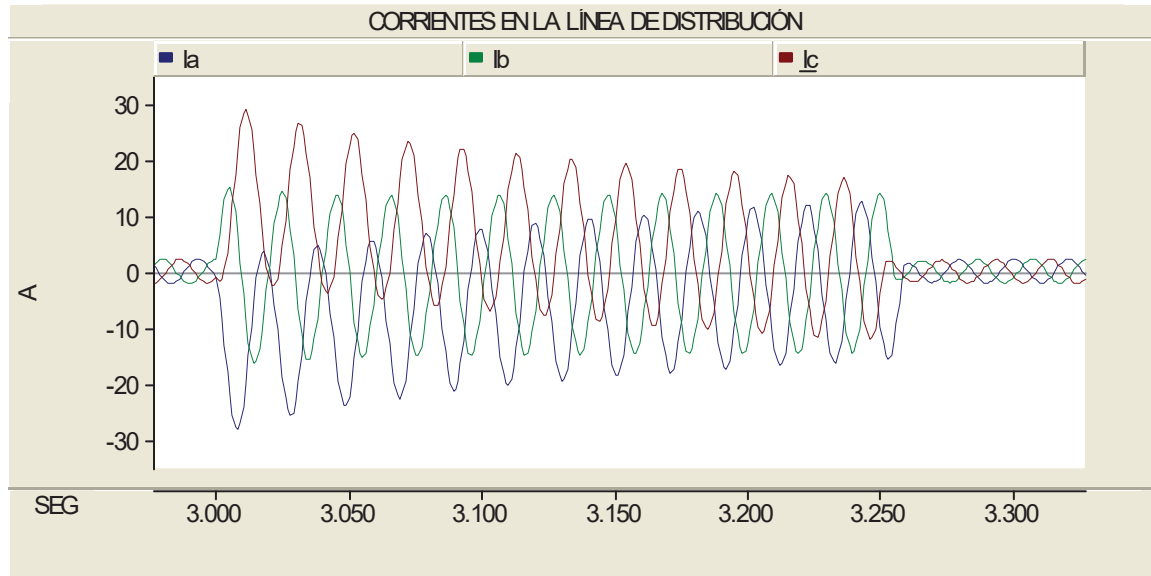
segundos después de su ocurrencia; la corriente en cada una de las fases oscila aproximadamente 1.78 segundos antes de volver a su estado de operación estacionario.

La Figura 5.11 (b) ilustra el transitorio en las corrientes en la línea de distribución durante el tiempo en que la falla esta sostenida. La amplitud en las formas de onda de corriente de fase se incrementa en aproximadamente 5.5 veces su valor de pre-falla. Cuando es liberada la falla su amplitud disminuye hasta alcanzar su valor de pre-falla en estado estacionario, en $t = 5.03$ segundos (no ilustrado en la Figura).

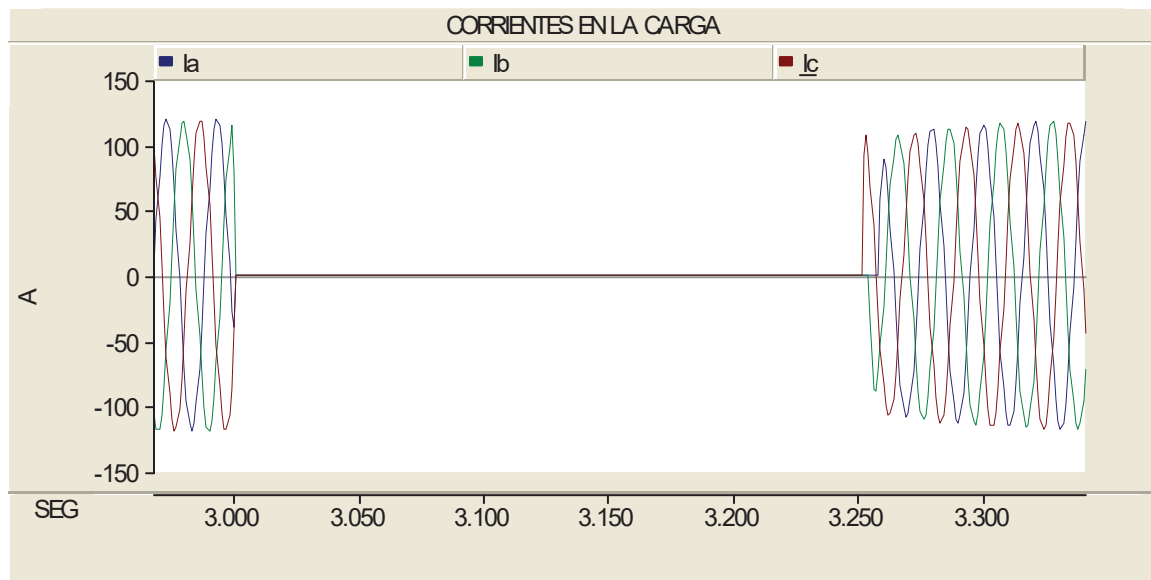
Las formas de onda de corrientes en la carga ilustradas en la Figura 5.11 (c), presentan una amplitud en cada fase en estado estacionario de 118.23 A. Desde el momento en que se presenta la falla en el sistema y mientras está sostenida, no hay corriente en ninguna de las fases que alimentan a la carga, esto debido a que la corriente del generador se encuentra alimentando la falla trifásica en la línea de distribución y por lo tanto la carga se encuentra aislada del sistema. Al liberarse la falla las corrientes de fase regresan nuevamente a su estado estacionario de pre-falla, en $t = 5.03$ segundos (no ilustrado en la Figura).



(a)



(b)



(c)

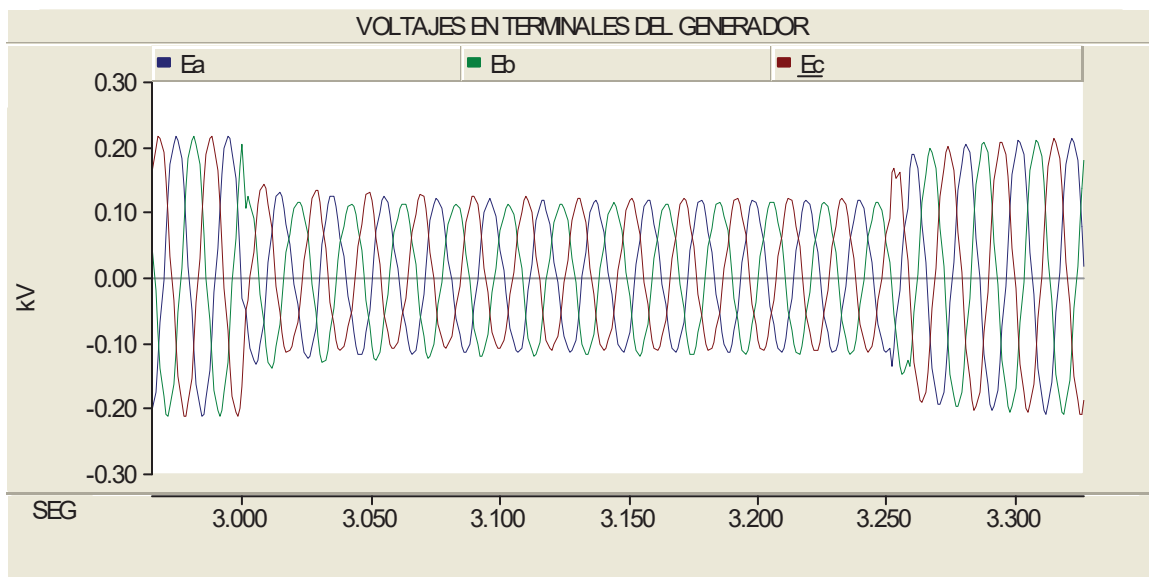
Figura 5.11. Comportamiento de las Corrientes ante una Falla Trifásica a Tierra en la Línea de Distribución. (a) Corrientes en Terminales del Generador, (b) Corrientes en la Línea de Distribución, (c) Corrientes en la Carga.

En la Figura 5.12 (a) se muestra el comportamiento de los voltajes en terminales del generador, los cuales tienen una amplitud de pre-falla de 0.219 kV. Al establecerse la falla, el voltaje en cada una de las fases disminuye a una amplitud máxima de 0.12 kV aproximadamente, manteniéndose en este valor durante el tiempo en que el disturbio se

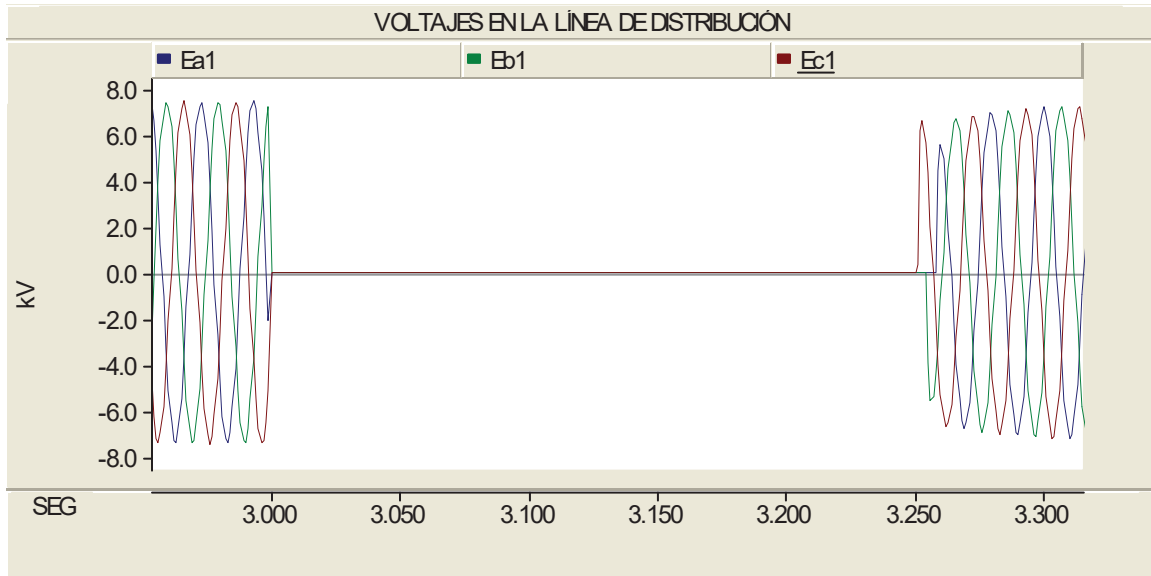
encuentra presente (0.25 segundos). Los voltajes regresan a su estado estacionario de pre-falla 1.78 segundos después de liberada la falla.

En la Figura 5.12 (b) se observa el comportamiento del voltaje en cada una de las fases de la línea de distribución; la amplitud de voltaje de fase en estado estacionario es de 7.56 kV; los voltajes en la línea se abaten a 1.8 volts durante la falla. Al liberarse la falla los voltajes regresan a sus valores de pre-falla en estado estacionario en aproximadamente 1.78 segundos.

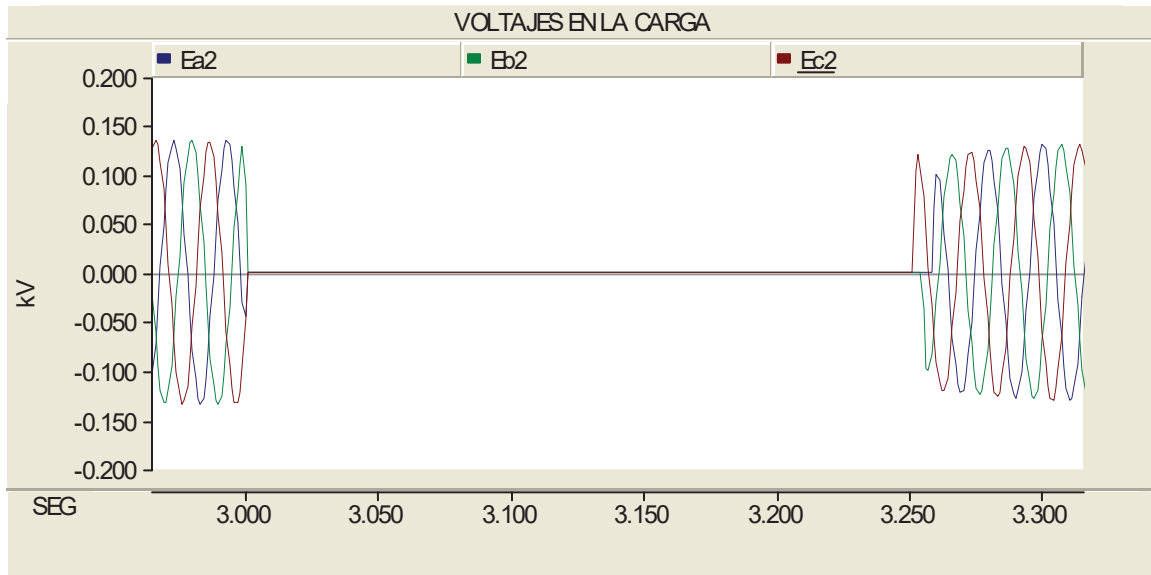
La Figura 5.12 (c) ilustra el comportamiento de los voltajes en la carga, que tienen una amplitud en su forma de onda de pre-falla de 0.138 kV. Durante el disturbio el voltaje en cada fase decrece a 0.53 volts. Al liberarse la falla, las formas de onda de voltaje regresan a su valor de pre-falla en $t = 5.03$ segundos (no ilustrado en la Figura).



(a)



(b)



(c)

Figura 5.12. Comportamiento de los Voltajes ante una Falla Trifásica a Tierra en la Línea de Distribución. (a) Voltajes en Terminales del Generador, (b) Voltajes en la Línea de Distribución, (c) Voltajes en la Carga.

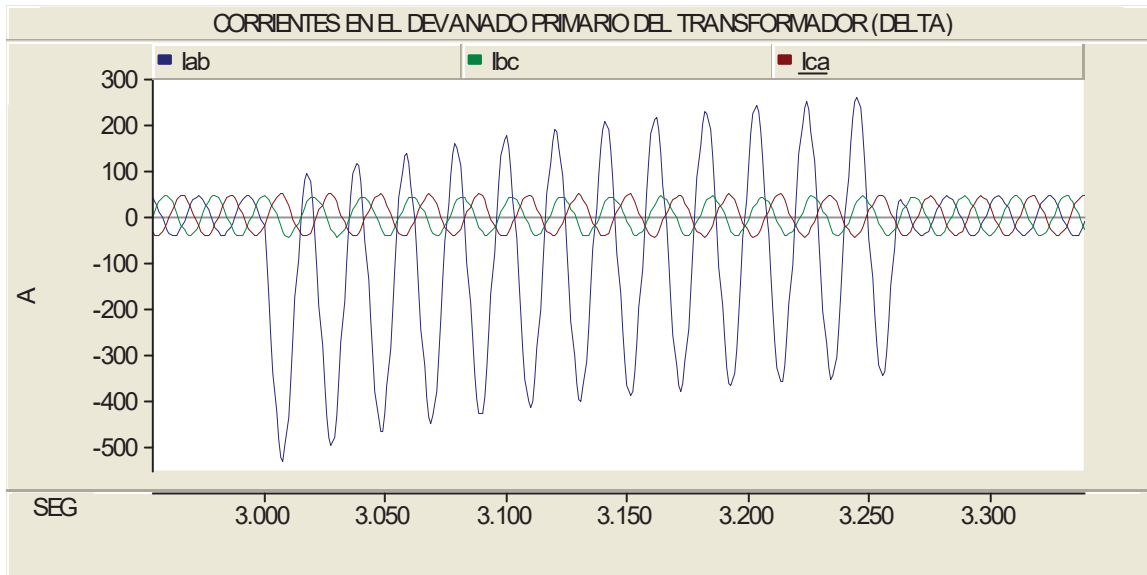
5.3.2.2. Falla Monofásica a Tierra en la Línea de Distribución

En este caso de estudio se analiza una falla frecuente en líneas de distribución y transmisión, es decir, una falla de una línea a tierra, la cual puede ocurrir por caída de árboles o ramas en una de las líneas, efecto del viento, etc. La falla ocurre por un cortocircuito en el extremo de recepción de la línea de distribución, es decir cercana al transformador reductor, en la fase A del sistema de distribución.

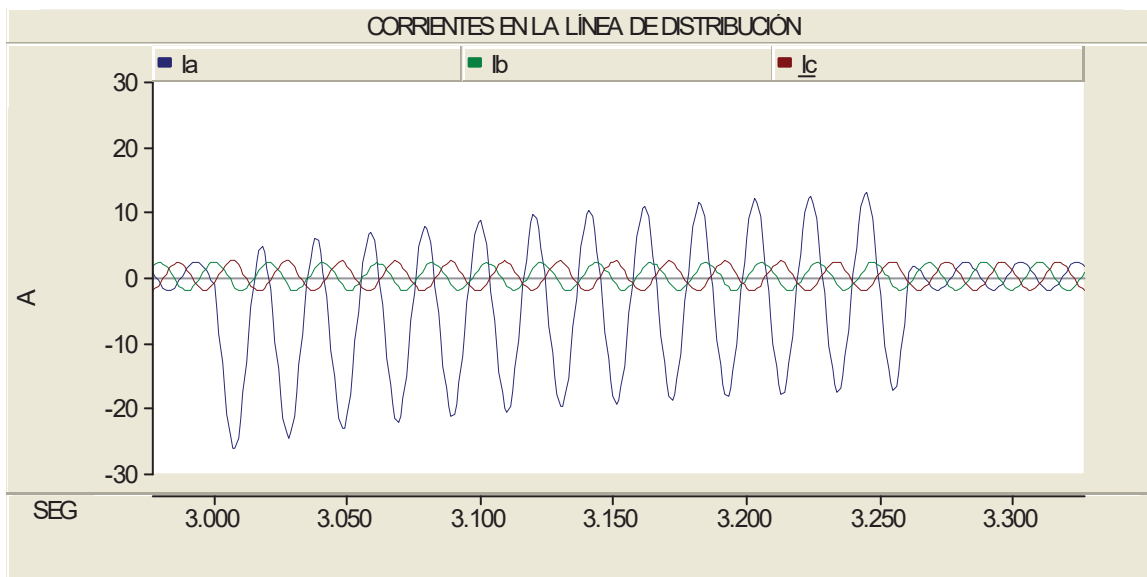
En la Figura 5.13 (a) se observa el comportamiento de las corrientes en el devanado primario del transformador elevador; su valor de pre-falla en estado estacionario es de 42.85 A. Al ocurrir la falla la amplitud de la corriente en la fase A aumenta en 5 veces su valor de pre-falla; nótese que por otro lado las fases B y C son prácticamente inmunes a la falla. La fase A regresa a su estado estacionario de pre-falla 1.78 segundos después de liberada la falla, en $t = 5.03$ segundos (no ilustrado en la Figura).

La Figura 5.13 (b) ilustra el comportamiento de las corrientes en la línea de distribución. El valor de la amplitud de la corriente en estado estacionario es de 2.25 A, al ocurrir la falla en la fase A del sistema, el transitorio en la fase fallada tiene una amplitud máxima de 27.61 A, las fases B y C presentan un cambio mínimo. Al liberarse el cortocircuito de la fase A en $t = 3.25$ segundos, las corrientes regresan a su estado estacionario en $t = 5.03$ segundos (no ilustrado en la Figura).

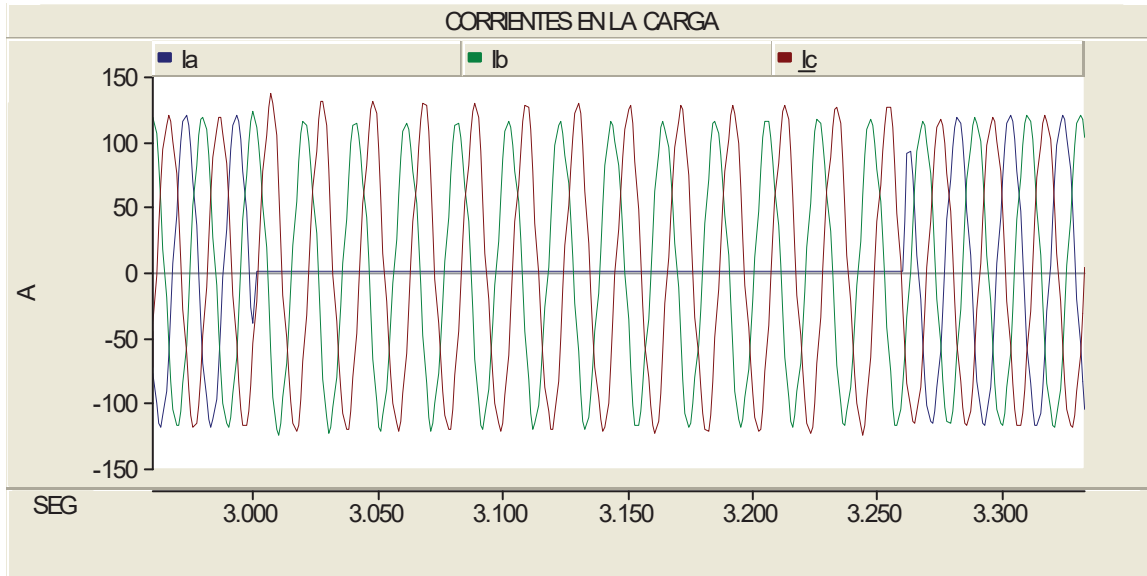
Debido a la presencia de la falla monofásica a tierra en la fase A de la línea de distribución, la corriente en esta fase es drenada a tierra en el punto de falla, por lo que en la fase A de la carga no hay corriente por ser este un elemento pasivo y no se cuenta con otra fuente de alimentación de energía eléctrica; este comportamiento puede ser observado en la Figura 5.13 (c).



(a)



(b)



(c)

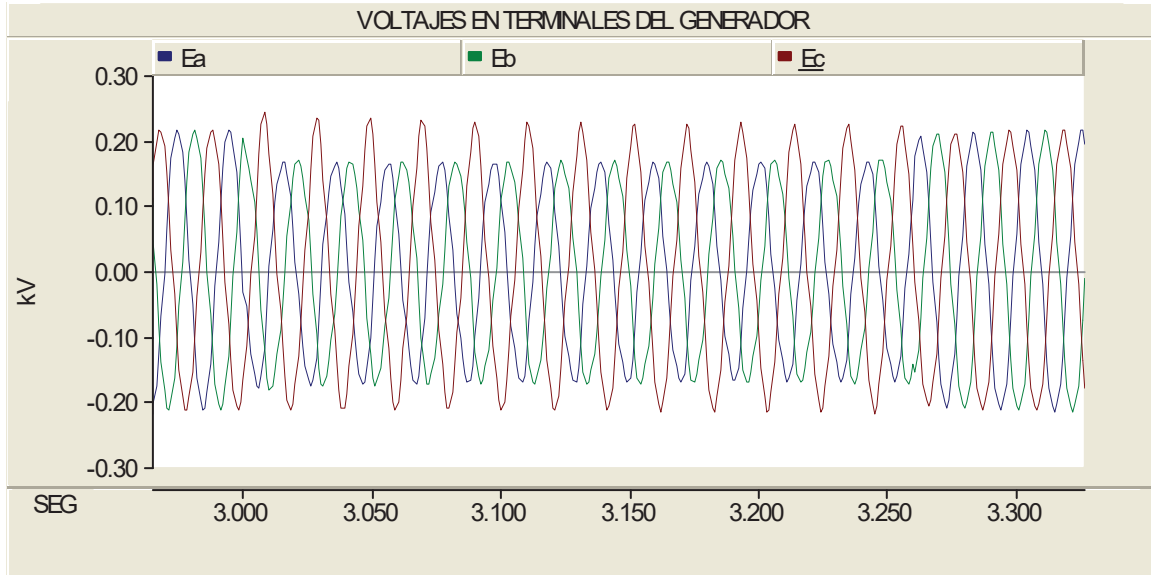
Figura 5.13. Comportamiento de las Corrientes ante una Falla Monofásica a Tierra en la Línea de Distribución. (a) Corrientes en Terminales del Generador, (b) Corrientes en la Línea de Distribución, (c) Corrientes en la Carga.

En la Figura 5.14 (a) se observa el transitorio en los voltajes en terminales del generador hidráulico en el instante en que se presenta una falla monofásica a tierra en la fase A de la línea de distribución. En condiciones de pre-falla la amplitud de voltaje en terminales del generador es de 0.219 kV. Durante la presencia de la falla, la amplitud máxima de la onda de voltaje de la fase C es de 0.242 kV, mientras que en las fases A y B su amplitud disminuye a 0.165 kV. Después de liberada la falla los voltajes regresan a su estado de pre-falla en un tiempo de simulación $t = 5.03$ segundos (no ilustrado en la Figura).

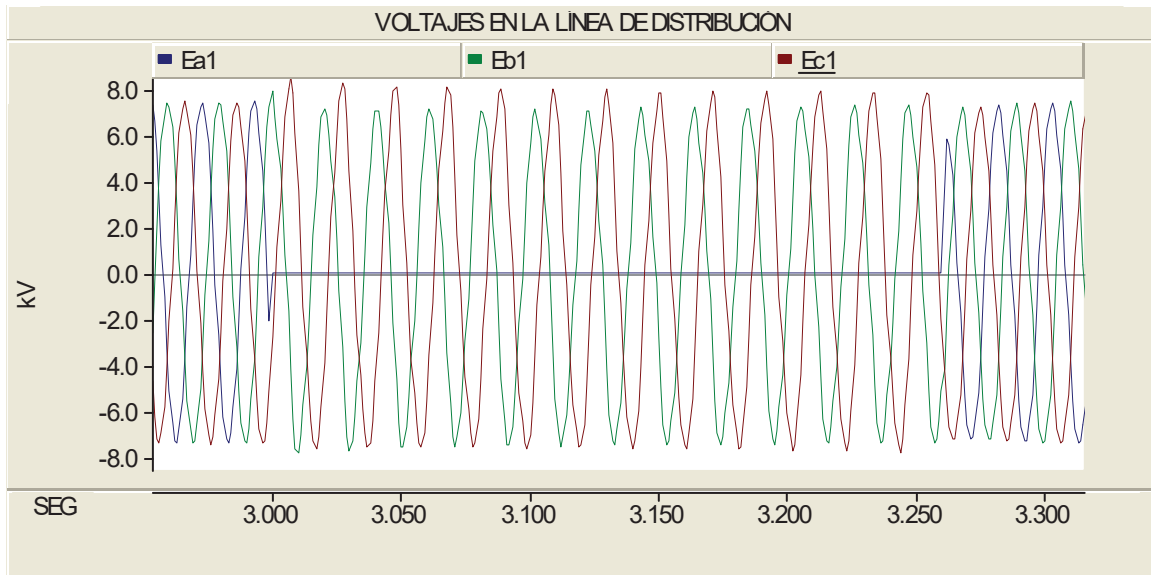
La Figura 5.14 (b) ilustra las formas de onda de voltajes en la línea de distribución; la amplitud de pre-falla es de 7.56 kV, al ocurrir la falla, el voltaje de la fase A se abate a 2.1 V, el voltaje de la fase B disminuye ligeramente a 7.26 kV y el de la fase C aumenta a 8.12 kV. Cuando la falla es liberada en $t = 3.25$ segundos, los voltajes de fase vuelven a su estado estacionario de pre-falla en 1.78 segundos.

La Figura 5.14 (c) ilustra el comportamiento de los voltajes de la carga en estado estacionario, siendo su amplitud de 0.138 kV. Durante la presencia de la falla; los voltajes

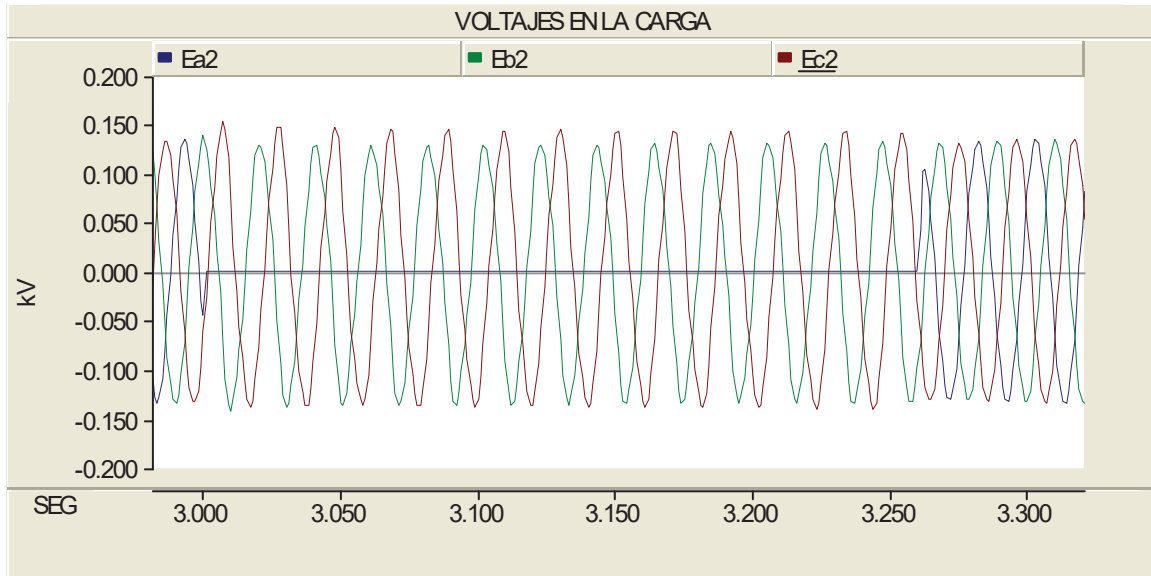
de las fases A y B disminuyen a una amplitud máxima de 1.63 V y 112 V respectivamente, mientras que el voltaje de la fase B aumenta a 151 V.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.14. Comportamiento de los Voltajes ante una Falla Monofásica a Tierra en la Línea de Distribución. (a) Voltajes en el Devanado Primario Transformador Elevador (b) Voltajes en la Línea de Distribución, (c) Voltajes en la Carga.

5.3.3. Selección de Protecciones

Además de las protecciones particulares con la que el generador debe de contar, la red de distribución debe contar con protecciones contra sobre-voltajes y contra sobre-corrientes en el lado de 13.2 kV y en algunos casos contra sobre-corrientes en el lado de bajo voltaje, como se indica en el diagrama unifilar de la Figura 5.15.

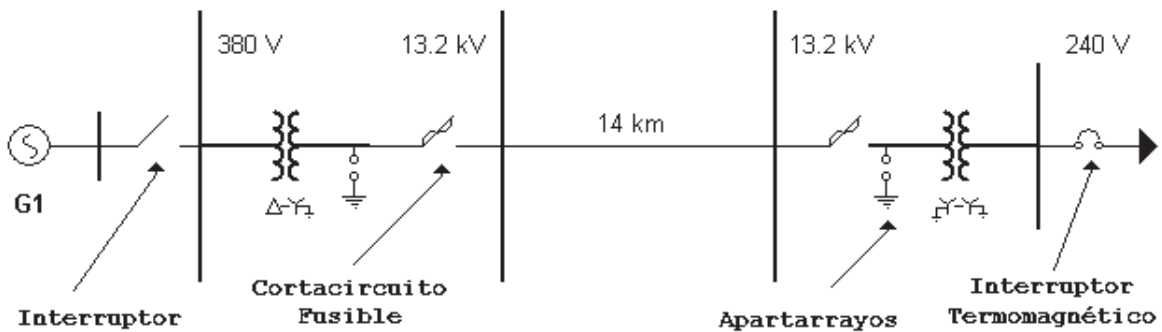


Figura 5.15. Diagrama Unifilar de la Selección de Protecciones.

El interruptor colocado en el lado primario del transformador elevador es del tipo en gran volumen de aceite con una corriente nominal de operación de 110 A. La protección de los transformadores es realizada por medio de apartarrayos autovalvulares o de Oxido de Zinc, los cuales se seleccionan en función del voltaje de línea a tierra y del tipo de sistema, para este caso de estudio se cuenta con un apartarrayos de 10 kV de capacidad nominal de trabajo. La protección contra sobre-corrientes en el lado de 13.2 kV se realiza por medio de corta-circuitos fusibles. Para seleccionarlos adecuadamente se deben de considerar los siguientes puntos [Westinghouse 1964]:

- Deber ser capaces de soportar sin quemarse la corriente nominal, incrementada en un margen de seguridad que permita sobrecargas controladas o que asegure la posibilidad de aumentar la capacidad de transformación mediante ventilación adicional. Se puede decir que en general deben de ser capaces de soportar 1.5 veces la corriente nominal.
- Deben de ser capaces de soportar sin quemarse, la corriente de magnetización (in-rush) durante al menos 0.1 segundo. Esta corriente es del orden de 8 a 10 veces la corriente nominal del transformador.

Para el caso de estudio propuesto se seleccionan dos cortacircuitos fusible de 3.5 A de corriente nominal de funcionamiento. En el lado de bajo voltaje (240 volts), se protege contra sobre-corrientes con un interruptor termomagnético cuando el valor de la corriente de un corto-circuito de fase a neutro al final de la carga es menor a dos veces la corriente nominal del fusible. Por lo general, todos los transformadores autoprotegidos cuentan con esta protección. En nuestro caso de estudio se selecciona un interruptor termomagnético de 175 A.

5.3.4. Operación Conectada a un Bus Infinito

En este caso de estudio se analiza el comportamiento de las corrientes y voltajes en terminales del micro-generador hidráulico cuando el sistema mini-hidráulico se encuentra conectado a un bus infinito. Se considera un flujo de agua constante en todo instante de tiempo y que el micro-generador ya se encuentra sincronizado con la Red Eléctrica.

En la Figura 5.16 se ilustra el modelo en PSCAD/EMTDC de la red eléctrica propuesta; el micro-generador eléctrico se encuentra conectado a un sistema eléctrico por medio de un transformador elevador de 1.5 MVA de potencia nominal, en conexión delta-estrella. El bus infinito o sistema eléctrico externo, es simulado por medio de una fuente de voltaje constante de una potencia grande (150 MVA), además, el sistema se encuentra alimentando a una carga balanceada en conexión estrella, cuyo consumo es de 20 MW.

Para estudiar la respuesta transitoria del micro-generador ante un disturbio se aplica una falla trifásica a tierra en sus terminales en un tiempo de simulación de 5 segundos, la falla es mantenida por 0.15 segundos y después es liberada.

En la Figura 5.17 se observa el comportamiento de los voltajes en terminales del micro-generador hidráulico. Los voltajes presentan una amplitud de estado estacionario de 0.219 kV; cuando se encuentra presente la falla el voltaje en cada una de las fases decrece en amplitud a 0.187 kV. Después de que la falla ha sido liberada, los voltajes regresan a su estado estacionario de pre-falla en $t = 8.48$ segundos (no ilustrado en la Figura).

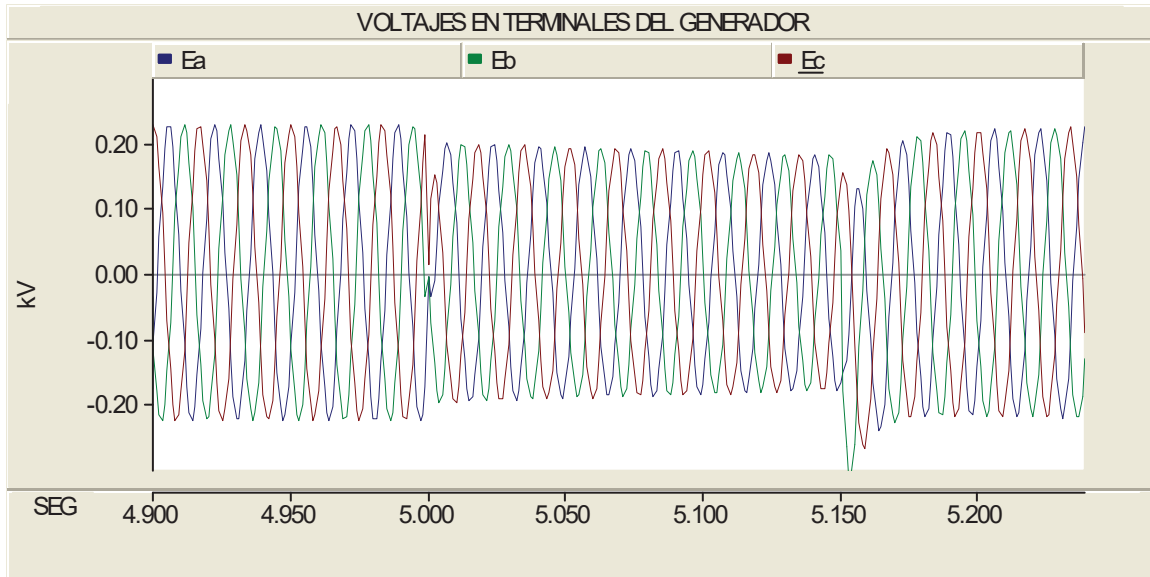


Figura 5.17. Comportamiento de los Voltajes en Terminales del Generador ante una Falla Trifásica en Terminales del Micro-Generador Hidráulico.

El comportamiento de las corrientes en el devanado primario del transformador elevador es ilustrado en la Figura 5.18. Se puede observar que las corrientes presentan una amplitud de estado estacionario de 42.85 A. En el instante en que ocurre la falla trifásica en terminales del micro-generador hidráulico, la amplitud de las corrientes aumenta a 115.35 A, amplitud que aumenta gradualmente mientras la falla se encuentra presente; cuando la falla es liberada la corriente en cada una de las fases regresa a su estado estacionario de operación 3.33 segundos después de que la falla ha sido liberada, en $t = 8.48$ segundos (no ilustrado en la Figura).

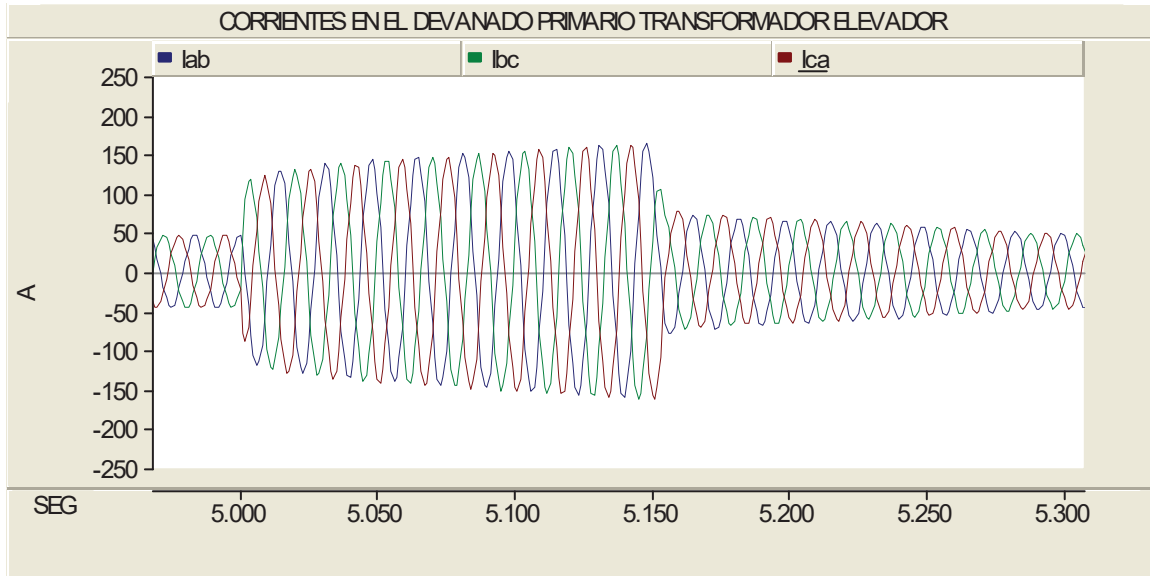


Figura 5.18. Comportamiento de las Corrientes en el Devanado Primario del Transformador Elevador ante una Falla Trifásica en Terminales del Micro-Generador Hidráulico.

5.4. Conclusiones

En este capítulo se ilustró el comportamiento en estado transitorio y estado estacionario de la micro-red hidráulica de generación propuesta en el Capítulo 4. Se considero su operación aislada, así como conectada al sistema eléctrico,

Para el estudio y análisis del sistema ante condiciones de falla se utilizó el software de simulación PSCAD/EMTDC. Se analizaron varios casos de estudio para el sistema mini-hidráulico propuesto para el Río La Antigua, Veracruz. En particular se observó el comportamiento de las formas de onda de voltajes y corrientes en puntos específicos del sistema, tales como las terminales del generador, la línea de distribución y la carga respectivamente. De los dos tipos de fallas simulados la falla trifásica es la más severa, ya que la corriente se eleva considerablemente, en aproximadamente 5.5 veces su valor en estado estacionario, mientras que en el caso de una falla en alguna de las fases en la línea de distribución, esta no afecta de manera sensible las otras dos fases en los puntos del sistema considerados, a excepción de aquel en que se produce la falla, mientras que la carga

se ve afectada drásticamente al quedar sin suministro de energía en las fases falladas y a la falta de un suministro de energía de respaldo.

Se ilustra la operación del micro-generador hidráulico conectado a un bus infinito, así como su comportamiento transitorio cuando una falla trifásica es aplicada en sus terminales.

Los estudios realizados en el presente capítulo, pueden ser utilizados para el diseño y selección de la coordinación de protecciones del sistema, el tiempo de respuesta y el tipo de protección que el sistema requiera.

Capítulo 6

Conclusiones Generales

En esta tesis se analizó una alternativa viable para la generación de energía eléctrica en base a fuentes renovables de energía en nuestro país, que es la Generación Distribuida. Previo a ello, se detallaron las tecnologías disponibles dentro de la Generación Distribuida, así como los modelos que describen cada uno de estos elementos. Un esquema dentro de la generación distribuida son las centrales Mini-hidroeléctricas de generación, que fueron objeto de un estudio más detallado, debido a la factibilidad que existe en nuestro país para su implantación.

Se implementaron metodologías generales para el diseño y selección de cada uno de los componentes de una planta mini-hidráulica, tomando como base estudios previos realizados a series de tiempo de caudal, para poder determinar si es posible instalar una pequeña planta hidráulica en un río o caída de agua en específico. Además de poder conocer la capacidad y características de cada uno de los componentes electro-mecánicos de la planta mini-hidráulica propuesta.

Para esto se aplicaron técnicas de análisis y pronóstico de series de tiempo y otros métodos comúnmente utilizados en el problema de pronóstico, tales como técnicas de inteligencia artificial basadas en redes neuronales y programación genética y algoritmos que permiten identificar sistemas en base a los valores de sus variables pasadas, como lo son las metodologías ARIMA.

Además se utilizó el software PSCAD/EMTDC, el cuál es una herramienta poderosa que nos permite un análisis muy completo de sistemas eléctricos de potencia y permite simular las condiciones en las cuales trabaja una determinada red eléctrica ante situaciones

determinadas de operación. Para el caso de Generación Distribuida se utilizó la versión 4 de este simulador, el cuál incluye nuevos modelos de generadores, turbinas hidráulicas y eólicas, controladores y algunos otros componentes que se encuentran contenidos en este tipo de redes.

Se analizó el comportamiento aislado en estado estacionario y estado transitorio de la micro-red propuesta de Generación Distribuida basada en un micro-generador hidráulico, pudiéndose observar en ambos casos el comportamiento dinámico del sistema bajo condiciones de disturbio.

La conexión e instalación de este tipo de fuentes de energía renovables, y de una manera más general de generación distribuida, es de gran interés desde cualquier punto de vista e implica también la consideración de las restricciones técnicas para proporcionar a los usuarios en general, a la industria y comercio en particular, una energía eléctrica confiable y de calidad. Estas restricciones son una parte obligada que hace que actualmente sean objeto de numerosos estudios y vienen a constituir un primer plano de preocupación.

Los problemas no se podrán resolver sin un esfuerzo de investigación y desarrollo con cambios estructurales en las redes actuales. Las inversiones relativas a los equipos adicionales necesarios para la Generación Distribuida, probablemente se den en forma más fluida en un mercado des-regulado de energía eléctrica. Como se permite el desarrollo de fuentes de energía renovables y de la co-generación de calidad, es necesario disponer de mecanismos de financiamiento. Es importante, desde esta óptica, estudiar de manera exhaustiva y a profundidad los efectos sobre las redes eléctricas de la incorporación de la generación distribuida, de manera que se puedan identificar los problemas a resolver y evaluar costos de inversión a realizar para la mejoría de las redes.

De los casos de estudio de esta tesis se desprenden una serie de problemas operativos y de condiciones dinámicas que requieren de estudios detallados, que en general caen dentro de las metodologías convencionales de flujos de potencia, corto-circuito, confiabilidad, transitorios electromagnéticos, análisis de armónicos, etc., pero también se requieren hacer consideraciones respecto a las condiciones operativas, de acuerdo a las curvas de demanda del sistema al que se conecta la generación distribuida, de las condiciones dinámicas que se deben de satisfacer, de la selección y ajuste de protecciones, entre otras.

6.1. Aportaciones

Las aportaciones realizadas en esta tesis son las siguientes.

1. Se analizó la factibilidad de implantación y capacidad de un sistema de generación distribuida basada en micro-generación hidráulica, esto en base al pronóstico de series de tiempo de caudal.
2. Para el pronóstico de series de tiempo se implementaron y compararon metodologías comúnmente utilizados en la resolución de este problema, como lo son; metodologías ARIMA, redes neuronales, programación genética por medio del programa ECSID y la utilización del Método de Monte-Carlo aplicado a encontrar la mejor condición inicial para la Red Neuronal.
3. Se integro una metodología general para la selección o diseño de los componentes más importantes de una micro-red hidráulica de generación (obra civil y equipo electro-mecánico).
4. Se aportaron casos de estudio de la operación en estado estacionario y transitorio de micro-redes de generación distribuida considerando su operación aislada y conectada a un sistema eléctrico externo, así como la selección de las protecciones para este tipo de sistemas.

6.2. Sugerencias para Trabajo de Investigación Futuro

El estudio de la generación distribuida en base a un tipo de tecnología en específico conlleva a una serie de problemas que requieren ser analizados y estudiados de una manera especifica y formal; a continuación se enlistan algunas sugerencias de trabajo de investigación posterior a realizar en el mismo campo del conocimiento:

- Factibilidad de implantación y diseño de sistemas de generación distribuida en base a generadores eólicos, fotovoltaicos, turbinas de gas, celdas combustibles e incluso sistemas híbridos.
- Diseño y simulación de sistemas de protección en el sistema de generación distribuida.
- Incorporación de micro-unidades de generación en el sistema eléctrico nacional, para cubrir demandas pico o demandas base.
- Calidad de la energía en sistemas de generación distribuida.
- Desarrollo de nuevos modelos de generación y estudio de nuevas tecnologías aplicables para mejora de la eficiencia y confiabilidad de los sistemas de generación distribuida.
- Desarrollo de modelos o algoritmos de inteligencia artificial más precisos en horizontes de pronóstico lejanos, para series de tiempo de caudal.
- Modelado dinámico de los componentes de un sistema de generación distribuida.
- Análisis en tiempo real de sistemas eléctricos conteniendo sistemas de generación distribuida.
- Análisis de estabilidad transitoria, dinámica, de voltaje y antes oscilaciones no-lineales en sistemas de generación distribuida conectados al sistema interconectado.

Apéndice A

Serie de Tiempo, Estación Hidrométrica Cardel, Veracruz.

TABLA A1. Estación Hidrométrica CARDEL (cuenca: río La Antigua, corriente: río La Antigua)
Escurrecimientos medios mensuales ($1 \times 10^5 m^3$), área drenada = $2,234 km^2$

AÑO	MESES												
	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Anual
1951	42.913	29.451	31.356	26.041	44.047	281.384	436.238	258.200	264.943	194.969	110.026	85.148	1804.716
1952	45.704	29.494	32.142	51.464	46.607	798.693	512.620	292.221	436.892	257.292	161.678	87.558	2752.365
1953	56.961	45.744	52.592	46.992	48.341	228.233	316.973	183.670	223.304	129.012	96.230	43.995	1472.047
1954	41.491	36.202	32.874	20.805	36.940	344.887	389.669	180.093	387.391	437.942	160.067	75.727	2144.088
1955	45.349	32.793	22.117	16.289	16.211	53.417	856.921	396.957	616.734	494.291	165.078	121.844	2838.001
1956	92.284	57.182	28.468	23.509	70.299	342.329	417.406	248.287	319.939	173.233	84.233	67.557	1924.726
1957	47.004	33.608	27.161	14.094	28.481	80.402	94.776	161.703	321.133	130.018	78.679	50.142	1067.201
1958	52.470	28.845	18.583	12.759	24.947	205.379	597.240	244.103	559.714	498.156	229.282	121.317	2592.795
1959	77.496	42.510	33.785	38.442	50.374	407.251	295.644	241.355	256.995	241.206	169.594	76.426	1931.078
1960	38.712	28.398	23.895	13.186	18.785	130.474	399.709	368.859	370.499	225.151	148.863	107.957	1874.488
1961	93.867	52.445	20.350	10.055	5.350	195.719	569.605	458.090	261.593	140.859	132.744	69.430	2010.107
1962	47.782	19.643	13.223	17.559	35.113	51.247	257.379	119.833	230.929	153.720	116.779	85.091	1148.298
1963	37.047	9.884	5.733	5.705	12.781	56.132	243.207	208.530	163.733	195.825	105.185	88.935	1132.697
1964	42.865	24.369	10.132	6.703	22.849	191.561	228.306	122.015	156.440	160.377	81.667	72.471	1119.755
1965	50.068	24.414	17.055	8.547	13.270	183.668	255.294	386.316	292.166	277.397	130.716	113.370	1752.281
1966	69.790	40.331	53.894	49.155	68.536	251.556	440.431	331.281	405.121	224.689	122.232	76.241	2133.257
1967	46.659	26.696	30.046	27.214	15.259	123.878	172.653	249.003	397.105	276.879	157.665	97.995	1621.052
1968	61.592	33.080	27.085	24.164	52.112	180.508	247.746	303.647	277.292	251.365	173.899	117.257	1749.747
1969	82.651	44.902	47.100	46.990	46.609	77.047	364.639	565.769	753.058	243.557	111.135	66.632	2450.089
1970	43.736	53.806	43.740	21.776	17.934	145.941	273.007	324.596	535.890	282.307	104.747	57.198	1904.678
1971	39.909	28.006	23.207	26.636	27.457	77.414	193.237	224.280	295.268	359.004	127.445	79.646	1501.509
1972	47.678	31.907	28.421	27.709	55.863	279.803	417.185	395.019	360.824	217.282	135.792	85.374	2082.857
1973	45.302	29.827	27.896	26.629	29.103	286.639	327.371	294.714	350.188	244.839	118.443	71.161	1852.112
1974	41.055	24.713	32.495	20.581	20.651	258.321	348.155	174.017	658.533	198.445	99.961	70.600	1947.527
1975	42.283	22.870	17.686	9.322	25.283	138.135	144.312	130.248	610.745	225.829	55.315	30.763	1452.791
1976	26.918	20.366	14.950	13.766	28.228	265.803	526.046	360.479	371.881	322.420	128.226	63.339	2142.422
1977	40.501	33.646	25.217	18.999	20.637	157.096	127.995	138.128	188.879	220.570	115.193	61.100	1147.961
1978	30.514	21.613	21.153	16.332	28.341	266.969	173.661	239.562	434.594	267.915	124.115	84.212	1708.981

Apéndice A: Serie de Tiempo, Estación Hidrométrica Cardel, Veracruz

1979	67.185	21.969	11.971	10.767	46.060	118.082	195.224	326.760	430.043	113.332	83.413	74.089	1498.895
1980	54.400	20.903	10.048	6.491	14.876	122.643	164.014	301.804	374.921	188.554	128.534	86.436	1473.624
1981	50.582	31.174	25.567	21.373	32.730	199.98	330.14	268.76	373.15	240.92	122.56	77.762	1774.697
1982	45.762	27.108	23.738	15.608	63.783	78.354	128.013	136.831	166.578	231.659	100.258	50.630	1068.322
1983	31.661	19.796	11.434	9.018	2.879	69.784	376.415	245.550	340.761	169.376	116.073	67.255	1460.002
1984	38.587	34.135	20.777	9.128	41.326	190.777	470.845	299.335	669.521	199.804	96.015	63.542	2133.792
1985	51.611	29.255	23.948	34.255	33.482	159.817	262.880	226.509	203.532	244.208	103.807	73.475	1446.779
Media	50.583	31.174	25.424	21.373	32.730	199.981	330.142	268.758	373.151	240.926	122.733	77.762	1774.735
Máx	93.867	57.182	53.894	51.464	70.299	798.693	856.921	565.769	753.058	498.156	229.282	121.844	2838.001
Mín	26.918	9.884	5.733	5.705	2.879	51.247	94.776	119.833	156.440	113.332	55.315	30.763	1067.201
Qmed	1.888	1.288	0.949	0.824	1.222	7.715	12.326	10.034	14.396	8.995	4.735	2.903	5.627

Apéndice B.

Diagramas de Bloques de Componentes Hidráulicos en PSCAD/EMTDC

B-1. Excitador

En la Figura B1 se muestra el diagrama de bloques que representa a un sistema excitador en base a un alternador de ca con un puente rectificador de SCR en su salida.

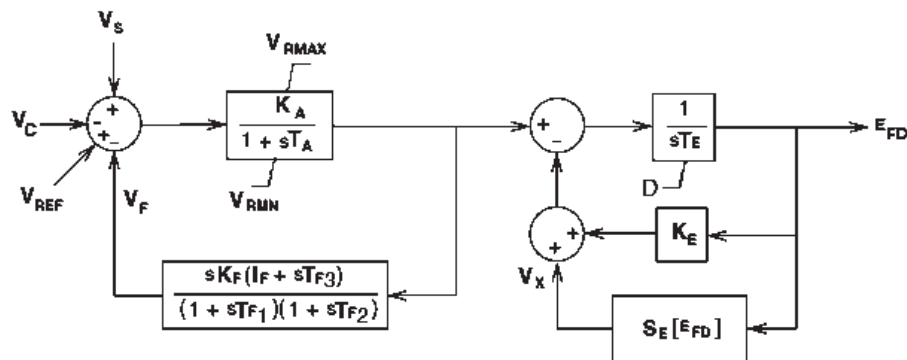


Figura B1. Modelo de un Sistema Excitador en Base a un Alternador de ca Rectificada.

donde:

- VC salida de voltaje de la terminal de un transductor y elementos compensadores de carga (p.u.).
- VREF voltaje de referencia (determinado a partir de condiciones iniciales del sistema en p.u.).
- VS voltaje de referencia del sistema estabilizador de potencia (p.u.).

V_F	voltaje de salida del sistema de excitación (p.u.).
VR_{MAX}, VR_{MIN}	límites máximo y mínimo de salida del regulador de voltaje (p.u.).
KA	ganancia del regulador de voltaje (p.u.).
TA	constante de tiempo del regulador de voltaje (seg).
$TF1, TF2, TF3$	constantes de tiempo del sistema estabilizador de potencia (seg).
TE	constante de tiempo del excitador (seg).
KE	constante del excitador relacionada con el campo de autoexcitación (p.u.).
KF	ganancia del sistema estabilizador de potencia (p.u.).
VX	señal proporcional a la saturación del excitador (p.u.).
$SE[EFD]$	función de saturación del excitador (p.u.).
EFD	voltaje de salida del excitador.

B-2. Estabilizador de potencia

La Figura B2 ilustra el diagrama de bloques correspondiente a un sistema estabilizador de potencia recomendado por el IEEE para estudios de estabilidad en sistemas hidráulicos [IEEE 1992].

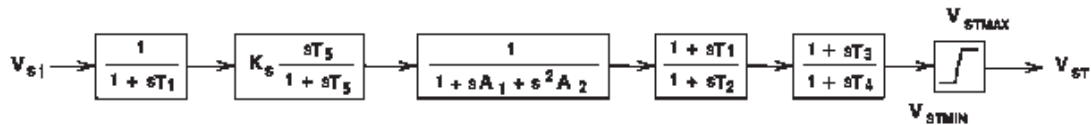


Figura B2. Modelo del Sistema Estabilizador de Potencia.

donde:

$A1, A2$	constantes de la señal de frecuencia del filtro.
KS	ganancia del sistema estabilizador de potencia (p.u.).
$T1, T3$	constantes de tiempo del sistema estabilizador de potencia (seg).
$T2, T4$	constantes de tiempo de compensación de retardos en el sistema estabilizador de potencia (seg).
$T5$	constante de tiempo de respuesta del sistema estabilizador de potencia (seg).

$VS1$	voltaje de entrada al sistema estabilizador de potencia (p.u).
$VSTMAX, VSTMIN$	límites máximo y mínimo de salida del sistema estabilizador de potencia (p.u.).
VST	voltaje de salida del sistema estabilizador de potencia (p.u.).

B-3. Turbina Hidráulica

Modelo de una turbina con columna de agua constante.

El diagrama que se muestra en la Figura B3 representa las características dinámicas de una turbina hidráulica simple, con canal de carga (“penstock”).

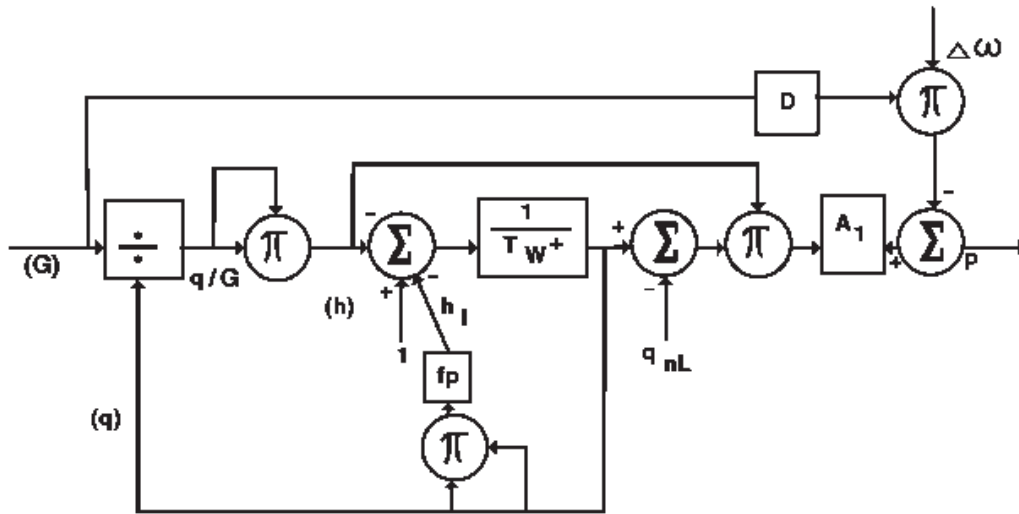


Figura B3. Modelo de una Turbina con Columna de Agua Constante.

Modelo de una turbina con columna de agua variable.

La Figura B4 ilustra el diagrama de bloques para una turbina incluyendo una columna de agua variable.

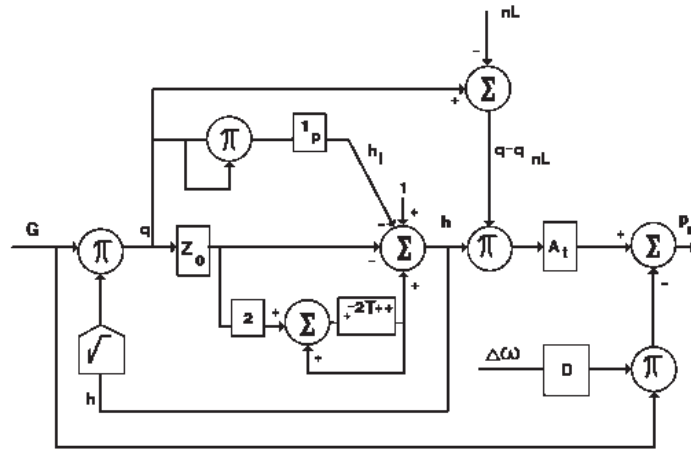


Figura B4. Modelo de una Turbina con Columna de Agua Variable.

Modelo de una turbina incluyendo el efecto de un tanque agitador y una columna de agua constante.

El modelo hidráulico que se muestra en la Figura B5 incluye la representación de:

- Efectos dinámicos en el canal de carga.
- Características dinámicas en el tanque agitador.
- Efectos dinámicos de la turbina.
- Pérdidas en el canal de carga, tanque agitador y orificio del tanque.

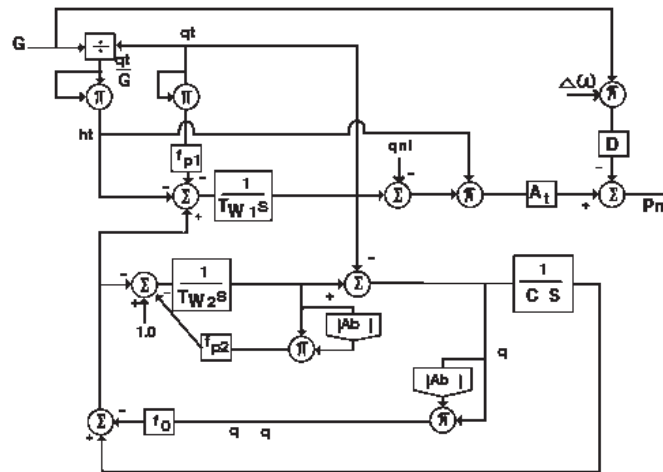


Figura B5. Modelo de una Turbina Incluyendo los Efectos de un Tanque Agitador y una Columna de Agua Constante.

Modelo de una turbina incluyendo los efectos del tanque agitador y una columna de agua variable.

En casos de estudio donde los efectos de una columna de agua variable a través del canal son importantes, el modelo de la Figura B5 es modificado para incluirlos obteniéndose el modelo de la Figura B6.

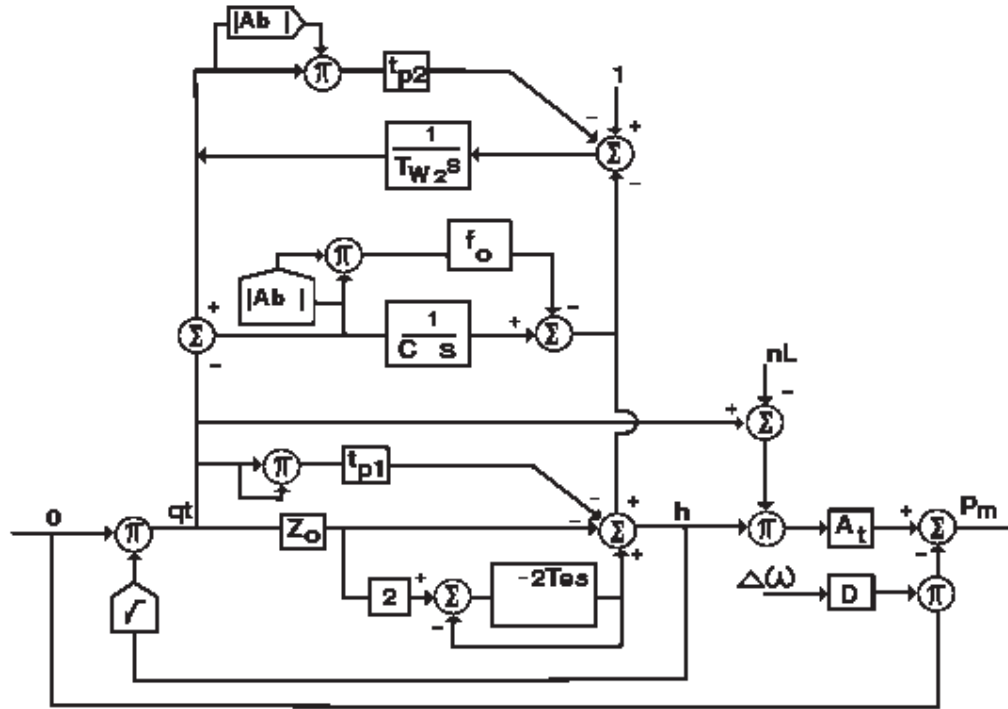


Figura B6. Modelo de una Turbina Incluyendo los Efectos del Tanque Agitador y una Columna de Agua Variable.

B-4. Modelo del Gobernador.

El modelo del gobernador que se describe en la Figura B7 tiene características que incluyen efectos de ganancias proporcionales, integrales y derivativas. Estas características pueden ser críticas para la correcta simulación y representación de rechazos de carga totales o parciales.

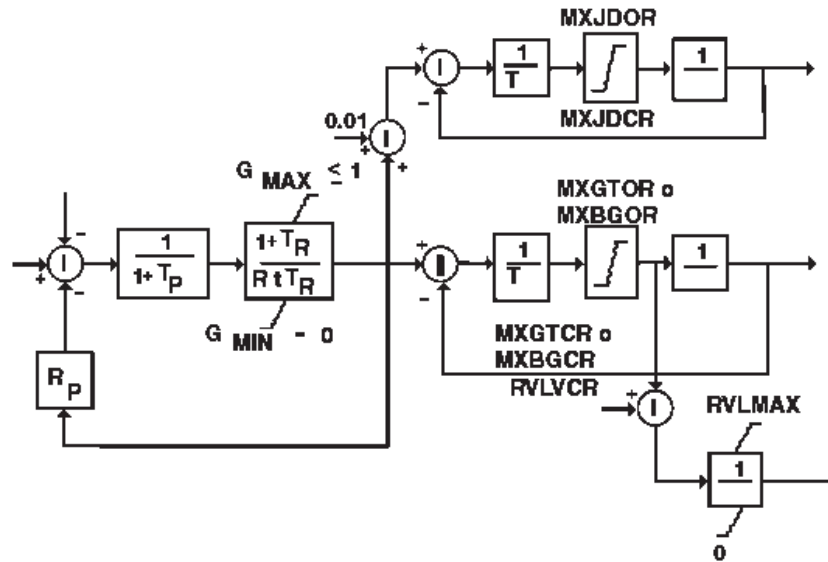


Figura B7. Modelo de un Gobernador Usado en Estudios de Rechazo de Carga.

donde:

R_p compensación de caída permanente.

Rt compensación de caída temporal.

TR constante de tiempo del amortiguador.

T_p constante de tiempo de la válvula piloto.

Tg constante de tiempo del servomecanismo de la compuerta.

$MXGTOP$ máxima apertura de la compuerta.

MXGTCR cerrado máximo de la compuerta.

MXBGOR máximo amortiguamiento en la apertura de la compuerta.

MXBGCR máximo amortiguamiento en el cerrado de la compuerta.

$GMAX$ límite máximo de la compuerta.

$GMIN$ límite mínimo de la compuerta.

RVLVCR porcentaje de apertura de la válvula de seguridad.

RVLMAX límite máximo de la válvula de seguridad.

MXJDOR máxima apertura del deflector de chorro.

MXJDCR máximo cerrado del deflector de chorro.

Apéndice C

Parámetros del Sistema de Prueba

C-1 Parámetros del micro-generador síncrono

Potencia Real Nominal = 1 MW.

Potencia Reactiva Nominal = 1.5 MVA.

Voltaje de Línea a Línea = 380 V.

Velocidad Síncrona = 720 rpm.

Frecuencia Nominal = 60 Hz.

Número de turbinas = 1.

Constante de inercia = 1.7 seg.

Resistencia de Armadura (R_a) = 0.002 p.u.

Constante de Tiempo en la Armadura (T_a) = 0.332 seg.

Reactancia de Dispersión (X_p) = 0.130 p.u.

Reactancia Síncrona de Eje Directo (X_d) = 0.920 p.u.

Reactancia Síncrona Transitoria de Eje Directo (X_d') = 0.920 p.u.

Reactancia Síncrona Subtransitoria de Eje Directo (X_d'') = 0.220 p.u.

Reactancia Síncrona de Eje de Cuadratura (X_q) = 0.510 p.u.

Reactancia Síncrona Transitoria de Eje de Cuadratura (X_q') = 0.228 p.u.

Reactancia Síncrona Subtransitoria de Eje de Cuadratura (X_q'') = 0.290 p.u.

Factor de Entrehierro = 1.0.

Tiempo Transitorio de Circuito Abierto en Eje Directo (T_{do}') = 5.2 seg.

Tiempo Subtransitorio de Circuito Abierto en Eje Directo (T_{do}'') = 0.029 seg.

Tiempo Transitorio de Circuito Abierto en Eje de Cuadratura (T_{qo}') = 0.85 seg.

Tiempo Subtransitorio de Circuito Abierto en Eje de Cuadratura (T_{qo}'') = 0.034 seg.

C-2 Parámetros de la turbina hidráulica

Coeficiente de Pérdidas al inicio de la Tubería Forzada (f_p) = 0.02 p.u.

Constante de Humedad de la Turbina (D) = 0.5

Posición de la Compuerta en Condiciones Nominales = 1.0 p.u.

Salida de Potencia en Condiciones Nominales = 1.0 p.u.

Flujo de Carga Nominal = 0.05 p.u.

Tiempo de Inicio del Flujo de Agua = 0.0 seg.

C-3 Parámetros del gobernador hidráulico

Caída Permanente (RP) = 0.04 p.u.

Máxima Posición de la Compuerta (G_{max}) = 1.0 p.u.

Mínima Posición de la Compuerta (G_{min}) = 0.0 p.u.

Tiempo Promedio Máximo de Apertura de la Compuerta ($MXGTOR$) = 0.16 p.u./seg.

Tiempo Promedio Máximo de Cerrado de la Compuerta ($MXGTCR$) = 0.16 p.u./seg.

Constante de Tiempo del Servomotor (T_p) = 0.05 seg.

Ganancia del Servomotor (Q) = 5.0 p.u.

Constante de Tiempo de la Compuerta (T_g) = 0.02 seg.

Caída Temporal (R_t) = 0.40 p.u.

Constante de Reinicio (TR) = 5.0 seg.

C-4 Parámetros del excitador

Constante de Adelanto (TC) = 0.0 seg.

Constante de Atraso (TB) = 0.0 seg.

Ganancia del Regulador (KA) = 400 *p.u.*

Constate de Tiempo del Regulador (TA) = 0.02 seg.

Voltaje Interno Máximo de Regulación ($VAMAX$) = 14.5 *p.u.*

Voltaje Interno Mínimo de Regulación ($VAMIN$) = -14.5 *p.u.*

Salida Máxima del Regulador ($VRMAX$) = 6.03 *p.u.*

Salida Mínima del Regulador ($VRMIN$) = -5.43 *p.u.*

Ganancia de Retroalimentación Nominal (KF) = 0.03 *p.u.*

Constate de Tiempo de Retroalimentación (TF) = 1.0 *p.u.*

Constate de Tiempo del Excitador (TE) = 0.8 seg.

Constante Relacionada con el Campo (KE) = 1.0 *p.u.*

Reactancia de Campo del Circuito de Conmutación (KC) = 0.2 *p.u.*

Factor de Desmagnetización (KD) = 0.38 *p.u.*

C-5 Parámetros del transformador trifásico elevador

Potencia Reactiva Nominal = 1.5 MVA.

Tipo de Conexión = Δ -Y en atraso.

Reactancia de Enlace de Secuencia Positiva = 0.1 *p.u.*

Frecuencia Nominal = 60 Hz.

Voltaje en Devanados = 380 V/13.2 kV.

Saturación en la Bobina = #1.

Reactancia de Entrehierro = 0.2 *p.u.*

Constante de Tiempo de Magnetización = 1.0 seg.

Voltaje de Rodilla = 1.25 *p.u.*

Corriente de Magnetización = 1%.

Tiempo de Aparición del Flujo Magnético = 0.1 seg.

C-6 Parámetros del transformador trifásico reductor

Potencia Reactiva Nominal = 1.5 MVA.

Tipo de Conexión = Y-Y en atraso.

Reactancia de Enlace de Secuencia Positiva = 0.1 *p.u.*

Frecuencia Nominal = 60 Hz.

Voltaje en Devanados = 13.2 kV/ 0.24 kV.

Saturación en la Bobina = #1.

Reactancia de Entrehierro = 0.2 *p.u.*

Constante de Tiempo de Magnetización = 1.0 seg.

Voltaje de Rodilla = 1.25 *p.u.*

Corriente de Magnetización = 1%.

Tiempo de Aparición del Flujo Magnético = 0.1 seg.

C-7 Parámetros de la línea de distribución

Voltaje = 13.2 kV.

Frecuencia en Estado Estacionario = 60 Hz.

Longitud de la Línea = 14 Km.

Número de Conductores = 3.

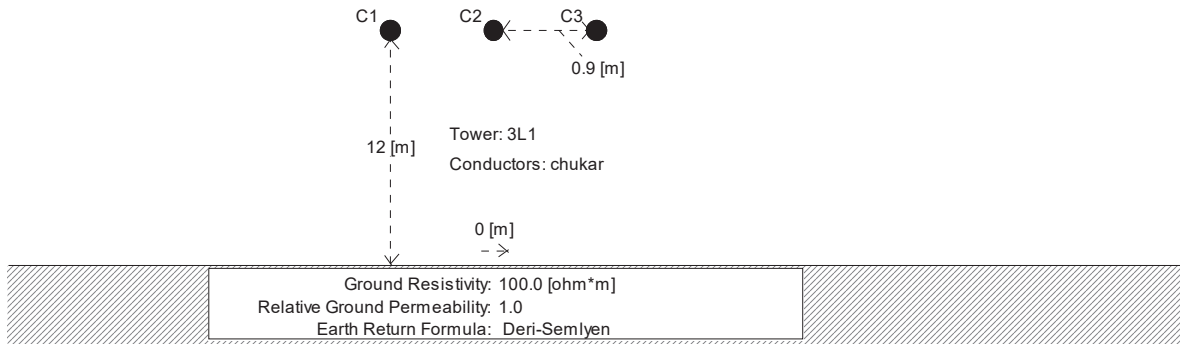
Datos del Modelo Dependiente de la Frecuencia por Fase:

Frequency Dependent (Phase) Model Options

Travel Time Interpolation: On
Curve Fitting Starting Frequency: 0.5 [Hz]
Curve Fitting End Frequency: 1.0E6 [Hz]
Maximum Order of Fitting for YSurge: 20
Maximum Order of Fitting for Prop. Func.: 20
Maximum Fitting Error for YSurge: 0.2 [%]
Maximum Fitting Error for Prop. Func.: 0.2 [%]

C-8 Tipo de torre y disposición de conductores

Datos y Tipo de Torre Utilizada:



Referencias

[CFE 2004]

<http://www.cfe.gob.mx/www2/QueEsCFE/conocimiento/Marcolegalynormativo/Leydelserviciopublicodeenergiaelectrica/>

[CIGRE WG 37-23]

Impact of Increasing Contribution of Dispersed Generation on the Power System. CIGRE WG 37-23. Septiembre (1998).

[IEEE 1547]

<http://standards.ieee.org/announcements/1547idr.html>

[Anne-Marie 2001]

Anne-Marie Borbely and Jan F. Kreider, *Distributed Generation, The Power Paradigm for the New Millennium*, CRC PRESS, 2001.

[Tutorial ITLP 2004]

Tutorial de Desarrollo de Proyectos. Instituto Tecnológico de la Paz Baja California Sur. Página Web: *<http://www.itlp.edu.mx/>*

[PEMH 2005]

Programas Estatales de Mini-hidráulica,,
<http://www.conae.gob.mx/wb/distribuidor.jsp?seccion=1601>

[SARH]

Boletín Hidrológico, Región Hidrológica No. 28 (parcial) (Ref. 5.2).

[SAMN 2005]

Situación Actual de la Mini-hidráulica Nacional y Potencial en una Región de los Estados de Veracruz y Puebla.

<http://www.conae.gob.mx/wb/distribuidor.jsp?seccion=1686>

[Freeman-Skapura 1991]

Freeman, J.A., and D.M. Skapura. *Neural networks: algorithms, applications and programming techniques (Computation and Neural Systems Series)*. Addison-Wesley Pub. Co., Reading, Massachusetts, EUA, 1991.

[Hilera-Martínez 2000]

Hilera, J.R., y V.J. Martínez. *Redes neuronales artificiales. Fundamentos, modelos y aplicaciones*. Editorial Alfaomega Ra-Ma, Madrid, España, 2000.

[Montgomery 1990]

Douglas C. Montgomery, Lynwood A. Jonson y John S. Gardier. *Forecasting and Time Series Analysis*. Segunda Edición. Editorial McGraw-Hill, Singapur, 1990.

[Brockwell 1990]

Peter J. Brockwell and Richard A. Davis. *Time Series: Theory and Methods*. Segunda Edición. Editorial Springer, Colorado, 1990.

[Davis 2003]

Peter J. Brockwell and Richard A. Davis. *Introducction to Time Series and Forecasting*. Segunda Edición. Editorial Springer, Colorado, 2003.

[ITDG 1996]

Manual de Mini y Micro-centrales Hidráulicas; Una guía para el desarrollo de proyectos. Intermediate Technology Development Group, ITDG-Perú, 1996.

[Cuenca 1999]

Energía Limpia para el Próximo Milenio, VII Encuentro Latinoamericano y del Caribe sobre Pequeños Aprovechamientos Hidroenergéticos. Cuenca, Ecuador, Octubre 1999.

[ONUDI 1981]

ONUDI Mini Hydro Power Stations, UNIDO/OS 225, Viena, 1981.

[CONAE 2005]

CONAE, <http://www.conae.gob.mx>

[PROJECT 2005]

Project R, <http://www.r-project.org/>

[Rumelhart 1986]

D.E. Rumelhart, G.E. Hinton, R.J. Williams. *Learning Internal Representations by Error Propagation* in. Parallel Distributed Processing, Volume 1 MIT Press, Cambridge, MA, pp. 318-362, 1986

[Karsten 1996]

Karsten Kutza, <http://www.geocities.com/CapeCanaveral/1624/bpn.html>

[Khennas 2000]

Smail Khennas and Andrew Barnett, *Best Practices for Sustainable Development of Micro Hydro Power in Development Countries*. The Department for International Development, UK and The World Bank, March 2000.

[RETScreen 2004]

RETScreen International. *Clean Energy Project Analysis: RETScreen Engineering & Cases TextBook, Small Hydro Project Analysis Chapter*. Canada 2004. <http://www.etscreen.net>

[Box-Jenkins 1994]

G. E. P. Box, G. M. Jenkins, and G. C. Reinsel, *Time Series Analysis Forecasting and Control*. Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 1994.

[GNU 2005]

GNU, <http://www.gnu.org>

[Teodoro 1999]

Teodoro Sanchez. *Small Hydro as an Energy Option for Rural Areas. The ITDG – Peru office experience*. Sao Paulo, Brasil, Agosto 1999.

[Turner 1988]

A.B. Turner, R.J. Simpson and Ch. Guillaud. *Developing a Mini-Hydro Plant in the Remote Canadian North*. IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 3, No 1, Marzo 1988.

[Bansal 2003]

R. C. Bansal, T. S. Bhatti and D. P. Kothari. *Bibliography on the Application of Induction Generators in Nonconventional Energy Systems*. IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 18, No. 3, Septiembre 2003.

[Walid 2004]

Walid El-Khattam, Kankar Bhattacharya, Yasser Hegazy and M. M. A. Salama. *Optimal Investment Planning for Distributed Generation in a Competitive Electricity Market*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No. 3, Agosto 2004.

[Mohammad 2004]

Mohammad N. Marwali, Jin-Woo Jung and Ali Keyhani. *Control of Distributed Generation Systems. Part II: Load Sharing Control*. IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 19, No. 6, Noviembre 2004.

[CFE 1995]

Normas de Distribución, construcción de líneas aéreas. Comisión Federal de Electricidad, 1995.

[Walid 2005]

Walid El-Khattam, Kankar Bhattacharya, Yasser Hegazy and M. M. A. Salama. *An Integrated Distributed Generation Optimization Model for Distribution System Planning*. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 20, No. 2, Mayo 2005.

[Cusco 1988]

Agua, Energía y Desarrollo Rural. Seminario-Taller “Hidroenergía y desarrollo rural” Cusco 1988.

[HIDRORED 2003]

Revistas: *HIDRORED, Red Latinoamericana de Micro Hidroenergía*.
Volúmenes 1999 – 2003. Programa de Energía del ITDG-Perú.

[Sánchez 2000]

Luis Rodríguez Sánchez. *Obras Civiles en Micro-centrales Hidráulicas*.
Programa de Energía del ITDG-Perú. Diciembre 2000.

[Brusa 2000]

Alessandro Brusa, Elena Guarnone. *Energía Mini-hidráulica. Proyecto RES
& RUE Dissemination*. España 2004.
<http://www.cecua.es/temas%20interes/medio%20ambiente/res&rue/htm/dossier/4%20minihidraulica.htm>

[CSVA 2005]

Consejo del Sistema Veracruzano del Agua. <http://www.csva.gob.mx/>

[CNA 2005]

Comisión Nacional del Agua.
<http://www.cna.gob.mx/eCNA/Espaniol/Directorio/Default.aspx>

[Graff 2005]

Graff, M. y Flores, J. J., Enero 2005.
<http://sourceforge.net/projects/ecsid>

[PSCAD 2003]

PSCAD User's Guide, Manitoba HVDC Research Centre Inc., Marzo 2003.

[PSCAD/EMTDC 2003]

Introduction to PSCAD/EMTDC, Manitoba HVDC Research Centre Inc.,
Marzo 2003.

[EMTDC 2003]

EMTDC User's Guide, Manitoba HVDC Research Centre Inc., Marzo 2003.

[Chambers 2001]

Ann Chambers, *Distributed Generation: A Nontechnical Guide*, PennWell,
2001.

[Kundur 1994]

P. Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw Hill Inc., 1994.

[Penche 1998]

Celso Penche, "Layman's book, on how to develop a small hydro site",
European Comisión, Junio 1998.

[Dale 2002]

Lewis Dale, *Distributed Generation and Transmission*, Power Engineering
Society Winter Meeting. IEEE, Volumen: 1, 27-31 Enero. 2002.

[Strbac 2002]

Goran Strbac, *Impact of Dispersed Generation on Distribution System: a
European perspective*, Power Engineering Society Winter Meeting. IEEE,
Volumen: 1, 27-31 Enero. 2002.

[Dugan 2002]

Roger C. Dugan, *Distributed Generation*, IEEE Industry Applications Magazine Marzo/Abril 2002.

[Snuller 2002]

Roger C. Dugan and Snuller K. Prince, *Issues for Distributed Generation in the US*, Power Engineering Society Winter Meeting. IEEE, Volumen: 1, 27-31 Enero 2002.

[Graham 2002]

Graham W. Ault, Colin E.T. Foote, James R. McDonald, *Distribution System Planning in Focus*, IEEE Engineering Review, Enero 2002.

[McClay 2002]

McClay and P Litchey, *Risk Management Issues for Distributed Generation*, Power Engineering Society Winter Meeting. IEEE, Volumen: 1, 27-31 Enero. 2002.

[IEEE 1992]

IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies, IEEE Std. 421.5-1992.

[Alstom 2005]

Mini Aqua Configurator.

http://www.hydro.power.alstom.com/configurator/project_selection.html

[Alstom-Control 2005]

Hydro Control and Automation Systems: Open, intelligent and cost-effective solutions for all hydro power plants. Alstom 2005.

[European 2000]

Best Practice Projects Yearbook. European Commission 1997-2000.
http://europa.eu.int/comm/energy/res/sectors/doc/res/best_practice_projects_yearbook_.pdf

[Westinghouse 1964]

Electrical Transmisión and Distribution Reference Book. Central Station Engineers of the Westinghouse Electric Corporation. Cuarta Edición. 1964.

[Donnelly 2005]

Josep Donnelly, *A Brief Overview of What the Monte-Carlo is and does*.
<http://www.physics.gla.ac.uk/~donnelly/files/montecarlo/>

[CSEP 2005]

Computational Science Education Project. *The Monte Carlo Methods*.
<http://csep1.phy.ornl.gov/mc/mc.html>

[Williams 2002]

D. E. Williams. *Monte-Carlo Simulation with MCS-libre HowTo*.
<http://sourceforge.net/projects/mcs-libre>

[Yecid 2004]

Yecid Javier Salas. *The Roll of Randomness in the Phenomenon of the Direction Variations in a River's Course*. Universidad de Boyacá, Colombia, 2004.
<http://www.uniboyaca.edu.co/ArtInteres1.htm>

[Economics-Glossary 2005]

Economics-Glossary. *Definition of Box-Cox Transformation*.
http://economics.about.com/cs/economicsglossary/g/box_cox.htm

[IEC 2006]

The International Engineering Consortium.

<http://www.iec.org/>

[UBIOBIO 2004]

Universidad del Bío Bío, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica,
Apuntes: Regulación de Tensión. Chile, 2006.

<http://zeus.dci.ubiobio.cl/~eleduc/index.html>