



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

OPTIMIZACIÓN DE PORTAFOLIO PARA LA COMPRA Y VENTA DE ENERGÍA Y POTENCIA ELÉCTRICA EN GUATEMALA

Marco Vinicio Pellecer Luna

Asesorado por el Ing. Edwin Roberto Castro Hurtarte

Guatemala, febrero de 2010

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**OPTIMIZACIÓN DE PORTAFOLIO PARA LA COMPRA Y VENTA DE ENERGÍA
Y POTENCIA ELÉCTRICA EN GUATEMALA
TRABAJO DE GRADUACIÓN**

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

MARCO VINICIO PELLECCER LUNA

ASESORADO POR EL INGENIERO EDWIN ROBERTO CASTRO HURTARTE

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, FEBRERO DE 2010

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Angel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Luis Pedro Ortiz de León
VOCAL V	Br. José Alfredo Ortiz Herincx
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

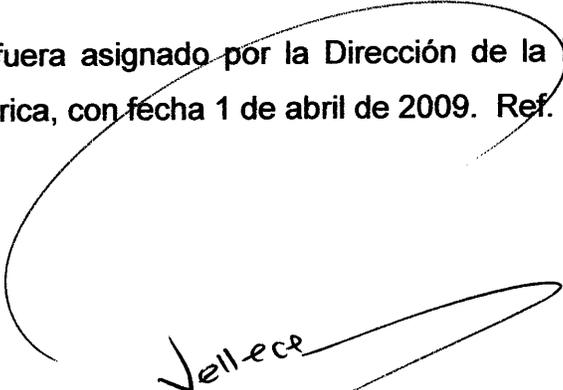
DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Julio Rolando Barrios Archila
EXAMINADOR	Ing. Saúl Cabezas Durán
EXAMINADOR	Ing. Jorge Luis Pérez Rivera
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

OPTIMIZACIÓN DE PORTAFOLIO PARA LA COMPRA Y VENTA DE ENERGÍA Y POTENCIA ELÉCTRICA EN GUATEMALA,

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 1 de abril de 2009. Ref. EIME 67.2009


Marco Vinicio Pellecer Luna

Guatemala, Septiembre de 2009

Ing. Guillermo Bedoya
Coordinador Área de Potencia
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala
Su despacho

Respetable Ing. Bedoya

Por este medio me dirijo a usted para informarle que el estudiante Marco Vinicio Pellecer Luna ha concluido satisfactoriamente el trabajo de graduación **OPTIMIZACIÓN DE PORTAFOLIO PARA LA COMPRA Y VENTA DE ENERGÍA Y POTENCIA ELÉCTRICA EN GUATEMALA**, tema para el cual fui asignado como asesor.

Considero que se han cumplido las metas propuestas al inicio del trabajo, por lo que recomiendo se apruebe en el entendido de que el autor y el suscrito son los responsables de lo tratado y de las condiciones del mismo.

Atentamente,



Ing. Edwin Roberto Castro Hurtarte
Colegiado 6778
ASESOR



Edwin Roberto Castro Hurtarte
INGENIERO ELECTRICISTA
COLEGIADO NO. 6778



FACULTAD DE INGENIERIA

Ref. EIME 03. 2010
Guatemala, 26 de ENERO 2010.

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

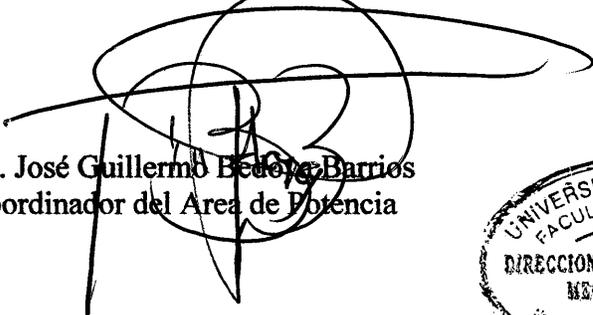
Señor Director:

**Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
OPTIMIZACIÓN DE PORTAFOLIO PARA LA COMPRA Y
VENTA DE ENERGÍA Y POTENCIA ELÉCTRICA EN
GUATEMALA, del estudiante Marco Vinicio Pellecer Luna, que
cumple con los requisitos establecidos para tal fin.**

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. José Guillermo Bedoya Barrios
Coordinador del Área de Potencia



JGBB/sro



REF. EIME 06. 2010.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; Marco Vinicio Pellecer Luna titulado: OPTIMIZACIÓN DE PORTAFOLIO PARA LA COMPRA Y VENTA DE ENERGIA Y POTENCIA ELÉCTRICA EN GUATEMALA, procede a la autorización del mismo.

Ing. Mario Renato Escobedo Martínez



GUATEMALA, 26 DE ENERO 2,010.



Ref. DTG.053.2010

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **OPTIMIZACIÓN DE PORTAFOLIO PARA LA COMPRA Y VENTA DE ENERGÍA Y POTENCIA ELÉCTRICA EN GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario **Marco Vinicio Pellecer Luna**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE

Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
Decano



Guatemala, febrero 2010

/cc

DEDICATORIA A:

DIOS

“Yo, la sabiduría, habito con la cordura, y hallo la ciencia de los consejos”.

Prov. 8:12.

MI MADRE

Estrellita Luna Méndez, por ser la luz que ha guiado mi vida, siendo mi piedra angular en los momentos más difíciles, enseñándome con amor, ternura, sacrificio y sabiduría las cosas que realmente tienen valor en la vida. Es por ello que este trabajo de graduación está dedicado a ella.

MI PADRE

José Carlos Pellecer de la Cerda, porque me ha apoyado siempre que lo he necesitado, enseñándome con su ejemplo las características que debe reunir un hombre humilde y bondadoso con sus semejantes.

MI MENTOR

Mario René Rosada Granados, porque con su apoyo ha hecho posible este logro y con su ejemplo me ha mostrado el camino a seguir para ser un profesional con liderazgo, dignidad y sobre todo al servicio de la sociedad.

MIS HERMANOS

José Carlos, María Ximena, Camilo José y Ana José, por recordarme que pase lo que pase puedo contar con ellos y que además de hermanos, son amigos.

MIS ABUELOS

Blanca Estela Méndez, José Carlos Pellecer (D.E.P.), Ana María de la Cerda (D.E.P.) y Ramiro Luna (D.E.P.), por ser parte esencial de mi vida, siendo su influencia fundamental en mi formación.

MIS TIOS

Rodolfo, Ramiro, Roberto (D.E.P.), Herbert, Carlos Enrique, Ana María, Karla, Marco Vinicio (D.E.P.), porque con su apoyo me han levantado cuando he caído y con su ejemplo me han mostrado el camino correcto.

MI ESPOSA

Mara Nohemí Suárez Carrillo, porque ha sido fiel compañera y mejor amiga. Su apoyo ha sido incondicional y su amor fortaleza.

MIS HIJOS

Rodrigo Andreé y Marco Vinicio, porque siendo pequeños su amor ha sido grande y su existencia inspiración en mi camino.

MIS AMIGOS

Juan Ricardo, Edwin Roberto, Edwin Felipe, Jesús Alberto, Juan Carlos, Yasser, Juan Pablo, porque juntos iniciamos el camino que me ha llevado a este logro.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de San Carlos de Guatemala, por ser la casa de estudios donde he adquirido mi conocimiento profesional, constituyéndose en el medio que hizo posible mi visión.

A los catedráticos de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, por transmitir sus valiosos conocimientos y su dedicación en la formación de los nuevos profesionales.

Al asesor de este trabajo de graduación, por su apoyo, colaboración y amistad en el desarrollo del mismo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	IX
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XIII
GLOSARIO.....	XV
RESUMEN.....	XXI
OBJETIVOS.....	XXIII
INTRODUCCIÓN.....	XXV
1. CONCEPTOS BÁSICOS DE PROGRAMACIÓN.....	1
1.1 Programación lineal.....	1
1.1.1 Introducción a la programación lineal.....	1
1.1.2 Historia de la programación lineal.....	1
1.1.3 Variable.....	2
1.1.4 Restricciones.....	3
1.1.5 Función objetivo.....	4
1.1.6 Aplicaciones.....	4
1.1.7 Programación entera.....	5
1.2 Conceptos básicos de programación en Excel.....	6
1.2.1 Programación en Visual Basic aplicado a Excel.....	7
1.2.1.1 Evaluación de funciones.....	7
1.2.1.2 Programación de macros.....	8
1.2.1.2.1 Editar y ejecutar macros.....	8
1.2.1.2.2 Funciones.....	9
1.2.1.3 Elementos de programación en Visual Basic.....	10
1.2.1.3.1 Flujo secuencial.....	10
1.2.1.3.2 Flujo condicional (<i>If-Else</i>).....	12

1.2.1.3.3 Flujo repetitivo (<i>For-Next, While-Wend, Do While-Loop</i>).....	13
1.2.1.4 Edición y ejecución de una subrutina.....	15
1.2.2 Herramienta Solver para Excel.....	16
1.2.2.1 Utilización del Solver.....	17
1.2.2.2 Parámetros de Solver.....	18
1.2.2.3 Solución viable.....	19
1.2.2.4 Modelos lineales.....	19
1.3 Programación en Progress.....	20
1.3.1 Conceptos básicos.....	20
1.3.1.1 Bases de datos relacionales.....	20
1.3.2 Progress RDBMS.....	21
1.3.2.1 Progress <i>Enterprise</i> RDBMS.....	21
1.3.2.2 Progress <i>Workgroup</i> RDBMS.....	22
1.3.2.3 Progress <i>Personal</i> RDBMS.....	22
1.3.3 Historia del software Progress.....	22
1.3.4 Características principales de Progress.....	23
1.3.5 Estructura del programa.....	24
1.3.5.1 Diccionario de datos.....	24
1.3.5.2 Administrador de datos.....	24
1.3.5.3 <i>Procedure Editor</i>	24
1.3.5.4 <i>Appbuilder</i>	24
1.3.5.5 <i>Report Builder</i>	25
1.3.6 Aspectos generales.....	25

2. PRINCIPIOS ECONÓMICOS APLICADOS A LA INGENIERÍA ELÉCTRICA.....	27
2.1 Principios básicos de economía.....	27
2.1.1 Costo de oportunidad.....	28
2.1.2 La demanda.....	28
2.1.3 La oferta.....	28

2.1.4	La elasticidad-precio.....	30
2.1.5	Tipos de mercado.....	30
2.1.5.1	Competencia perfecta.....	30
2.1.5.2	Monopolio.....	31
2.1.5.3	Oligopolio.....	31
2.1.5.4	Monopsonio.....	32
2.2	Potencia y energía eléctrica en Guatemala.....	32
2.2.1	Crecimiento histórico de la energía y la potencia eléctrica.....	32
2.2.2	Ley y estructura del sector eléctrico en Guatemala.....	34
2.2.2.1	Mercado de potencia y energía eléctrica.....	35
2.3	Comercialización de energía y potencia eléctrica en Guatemala.....	37
2.3.1	Operaciones de compra y venta del Mercado Mayorista.....	37
2.3.1.1	Contratos de abastecimiento.....	39
2.3.1.1.1	Contratos por diferencias con curva de carga.....	39
2.3.1.1.2	Contratos de potencia sin energía asociada.....	40
2.3.1.1.3	Contratos de opción de compra de energía.....	40
2.3.1.1.4	Contratos por diferencias por la demanda faltante.....	40
2.3.1.1.5	Contratos de energía generada.....	41
2.4	Normas de comercialización de energía y potencia eléctrica en Guatemala.....	41
2.4.1	Ley General de Electricidad.....	41
2.4.1.1	Régimen eléctrico.....	41
2.4.1.1.1	Principios generales.....	41
2.4.1.1.2	Comisión Nacional de Energía Eléctrica....	42
2.4.1.2	Instalación de obras de generación, transporte y distribución de electricidad.....	43

2.4.1.3	Operación de las instalaciones de generación, transporte y distribución de electricidad.....	43
2.4.1.3.1	Instalaciones de servicio de distribución final.....	44
2.4.1.4	Regulación de precios de la electricidad.....	44
2.4.1.4.1	Tarifas aplicables a consumidores finales..	45
2.4.2	Normas de coordinación comercial del Administrador del Mercado Mayorista.....	46
2.4.2.1	El Administrador del Mercado Mayorista.....	47
2.4.2.1.1	Objetivos y funciones.....	47
2.4.2.2	Plan de Expansión de Generación.....	47
2.4.2.3	Operación y coordinación del Administrador del Mercado Mayorista.....	48
2.4.2.3.1	Despacho económico y cálculo de precios.....	48
2.4.2.3.1.1	Costos variables de generación.....	49
2.4.2.3.2	Coordinación de la operación comercial....	50
2.4.2.3.2.1	Modelos para la simulación de la operación comercial.....	51
2.4.2.3.2.2	Objetivos de la programación de largo plazo.....	51
2.4.2.3.2.3	Coordinación de la operación en tiempo real.....	52
2.4.2.4	Administrador de las transacciones en el Mercado Mayorista.....	52
2.4.2.4.1	Desvíos de potencia.....	52
2.4.2.4.2	Precios y costos a trasladar a tarifas de distribución.....	53

3. GENERACIÓN Y DEMANDA DE ENERGÍA Y POTENCIA ELÉCTRICA EN GUATEMALA.....	55
3.1 Historia de la electrificación en Guatemala.....	55
3.2 Generación de energía eléctrica en Guatemala.....	57
3.2.1 Fuentes de energía en Guatemala.....	57
3.2.1.1 Fuentes de energía por tecnología.....	59
3.2.1.2 Energía renovable y no renovable disponible en el mercado energético de Guatemala.....	60
3.2.1.2.1 Energía renovable.....	63
3.2.1.2.1.1 Centrales termoeléctricas.....	63
3.2.1.2.1.1.1 Turbina de vapor.....	63
3.2.1.2.1.2 Centrales geotérmicas.....	69
3.2.1.2.1.3 Hidroeléctricas.....	70
3.2.1.2.1.3.1 Hidroeléctrica Palín II.....	72
3.2.1.2.1.3.2 Hidroeléctrica Santa María.....	73
3.2.1.2.1.3.3 Hidroeléctrica Jurún Marinalá... ..	74
3.2.1.2.1.3.4 Hidroeléctrica Aguacapa.....	75
3.2.1.2.1.3.5 Hidroeléctrica Chixoy.....	76
3.2.1.2.2 Energía no renovable.....	77
3.2.1.2.2.1 Centrales termoeléctricas.....	77
3.2.1.2.2.1.1 Turbina de vapor.....	77
3.2.1.2.2.1.2 Turbina de gas.....	78
3.2.1.2.2.2 Motores de combustión interna.....	79

3.2.2	Costos de generación en las plantas eléctricas.....	82
3.2.2.1	Cálculo de costos de plantas generadoras.....	84
3.2.2.1.1	Fórmula para el cálculo de costos de energía eléctrica.....	85
3.2.2.1.2	Ejemplos de cálculos de costos de generación.....	86
3.2.2.1.2.1	Ejemplo hidroeléctrica.....	86
3.2.2.1.2.2	Ejemplo turbina de vapor, combustible carbón.....	87
3.2.2.1.2.3	Ejemplo turbina de vapor, combustible biomasa.....	88
3.3	Otras fuentes de generación de energía eléctrica.....	90
3.3.1	Centrales térmicas solares.....	91
3.3.2	Generación eléctrica por tecnología eólica.....	92
3.4	Demanda energética en Guatemala.....	93
3.4.1	Plan de Expansión del Sistema de Transporte 2008-2018.....	96
3.4.2	Plan de Expansión Indicativo del Sistema de Generación 2008-2022.....	97
3.4.3	Distribución de potencia y energía eléctrica.....	101
3.4.4	Grandes Usuarios.....	102
3.5	Sistema Nacional Interconectado.....	102

4.	OPTIMIZACIÓN DE PORTAFOLIO DEL MERCADO ENERGÉTICO EN GUATEMALA.....	105
4.1	Optimización económica.....	105
4.1.1	La teoría neoclásica.....	105
4.1.1.1	Los paradigmas.....	106
4.2	Concepto de portafolio.....	106
4.2.1	Optimización de portafolio para la compra y venta potencia y energía eléctrica.....	107

4.3 Programa de optimización de portafolio para la compra y venta de potencia y energía eléctrica en Guatemala.....	108
4.3.1 Software aplicable a doce variables para optimizar la compra y venta de potencia y energía eléctrica.....	108
4.3.1.1 Oferta disponible en el mercado.....	108
4.3.1.1.1 Cálculo del precio de la energía.....	109
4.3.1.2 Demanda.....	112
4.3.1.2.1 Potencia a contratar.....	112
4.3.1.3 Solución a la optimización de portafolio energético..	114
4.3.1.3.1 Potencia a contratar.....	114
4.3.1.3.2 Variable de estado.....	114
4.3.1.3.3 Variable de arranque.....	114
4.3.1.3.4 Generación máxima.....	116
4.3.1.3.5 Energía.....	116
4.3.1.3.6 Función objetivo.....	116
4.3.1.3.7 Aplicación de la herramienta Solver.....	117
4.3.1.3.7.1 Restricciones del programa... 117	
4.3.1.3.7.2 Variables del programa.....	119
4.3.1.4 Soluciones gráficas.....	120
4.3.1.5 Aplicación del programa de optimización de portafolio a una licitación para la compra y venta de energía y potencia eléctrica.....	121

5. INTERFACE DE AUTOMATIZACIÓN DEL PROGRAMA DE OPTIMIZACIÓN DE PORTAFOLIO.....	127
5.1 Descripción del programa	127
5.2 Diseño del programa.....	128
5.2.1 Opción tablas.....	129
5.2.2 Opción transacciones.....	132
5.2.2.1 Datos de demanda.....	132
5.2.2.2 Porcentajes de demanda.....	133

5.2.2.3 Detalle demanda.....	134
5.2.2.4 Oferta de potencia.....	135
5.2.2.5 Oferta de energía.....	136
5.2.2.6 Optimización de portafolio.....	137
5.3 Aplicación del programa de interface.....	138
CONCLUSIONES.....	141
RECOMENDACIONES.....	143
BIBLIOGRAFÍA.....	145

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1	Hoja de trabajo típica de Excel	7
2	Diagrama de flujo secuencial	12
3	Cuadro de diálogo 'Parámetros de Solver'	18
4	Cuadro de diálogo 'Agregar restricción'	19
5	Ambiente Progress para programación	25
6	Precio Spot y demanda semanal SNI	38
7	Generación por fuente primaria de energía	49
8	Curva horaria de demanda de energía eléctrica	54
9	Gráfica de producción de energía eléctrica en 2008	60
10	Turbina de vapor	64
11	Componentes básicos de una central termoeléctrica	67
12	Ciclo Rankine en el diagrama Temperatura-Entropía	68
13	Hidroeléctrica Palín II	72
14	Casa de máquinas de la hidroeléctrica Santa María	73
15	Embalse de la hidroeléctrica Santa María	74
16	Sección de la casa de máquinas de hidroeléctrica Jurún Marinalá	75
17	Hidroeléctrica de Aguacapa	76
18	Hidroeléctrica de Chixoy	77
19	Efecto de la utilización de planta en el costo de generación	84
20	Central termosolar en Sevilla, España	92
21	Gráfica de consumo de energía en 2008	94
22	Región de distribución por empresa distribuidora en Guatemala	102
23	Sistema Nacional Interconectado	104
24	Hoja 'Oferta' en el programa de optimización	111
25	Hoja 'Demanda' en el programa de optimización de portafolio	113
26	Cuadro de variable de arranque	115
27	Cuadro de la suma de variable de estado	115

28	Potencia a contratar en MW	121
29	Potencia a contratar optimizada	124
30	Gráfica potencia a contratar	125
31	Cuadro de ingreso de Usuario y contraseña	128
32	Módulo inicial del programa de automatización	129
33	Cuadro de ofertas	130
34	Cuadro para ingresar una nueva oferta	131
35	Cuadro de códigos del combustible	131
36	Cuadro de códigos de tecnología de generación	132
37	Datos demanda	133
38	Porcentajes de demanda	134
39	Detalle demanda	135
40	Oferta de potencia	136
41	Oferta de energía	137
42	Optimización de portafolio	138

TABLAS

I	Estructura de un modelo Solver	18
II	Demanda histórica en Guatemala	33
III	Producción de energía eléctrica en 2008	59
IV	Plantas de recursos no renovables en Guatemala	61
V	Plantas de recursos renovables en Guatemala	62
VI	Costos de generación por tecnología	83
VII	Precios de energía de tres tipos de plantas generadoras	90
VIII	Composición por tipo de consumo de energía	94
IX	Obras del Plan de Expansión del Sistema de Transporte	96
X	Capacidad y costos promedio a instalar en el período 2008-2022	97
XI	Plantas termoeléctricas candidatas de recursos no renovables	98
XII	Plantas candidatas de energía renovable	100
XIII	Distribución mensual de la potencia anual a contratar	122
XIV	Datos para la potencia	123
XV	Datos para la energía	123

LISTA DE SÍMBOLOS

AMM	Administrador del Mercado Mayorista
CNEE	Comisión Nacional de Energía Eléctrica
4GL	Lenguaje de programación de cuarta generación
API	Aplicación de lenguaje de programación
RAP	Aplicación rápida de prototipo
RAD	Aplicación rápida de desarrollo
ADM	Modelo de aplicación de desarrollo
MEM	Ministerio de Energía y Minas
SNI	Sistema Nacional Interconectado
SEN	Sistema Eléctrico Nacional
BTU	<i>British Thermal Unit</i> , unidad británica de energía
DBMS	Sistema base de manejo de datos
DDL	Lenguaje de definición de datos
DML	Lenguaje de manipulación de datos
SQL	Lenguaje de consulta
Q	Quetzal, moneda de la República de Guatemala
US\$	Dólar de los Estados Unidos de América
KW	Kilovatio
MW	Megavatio
GW	Gigavatio
DEOCSA	Distribuidora de electricidad de occidente
DEORSA	Distribuidora de electricidad de oriente
EEGSA	Empresa Eléctrica de Guatemala
%	Porcentaje
H.P.	Caballo de fuerza
VAD	Valor Agregado de Distribución
INDE	Instituto Nacional de Electrificación

GENOR	Generadora del Norte
CI	Combustión Interna
m	Metro
Seg	Segundos
h	Horas
CO₂	Dióxido de Carbono
°C	Grado Celsius
P	Potencia
η	Eficiencia
P_E	Precio de la energía
P_c	Precio del combustible
P_{cc}	Poder calorífico del combustible
f.p.	Factor de planta
A.I.	Anualidad de inversión
f.a.	Factor de anualidad
CFE	Comisión Federal de Electrificación de la República de México
Km	Kilómetro

GLOSARIO

Autoproductor	Titular de una central de generación de energía cuya producción está destinada exclusivamente a su propio consumo.
Adjudicatario	Persona que el Ministerio autoriza para el desarrollo de las obras de transporte y distribución de energía.
Administrador del Mercado Mayorista	Es el ente encargado de la administración y coordinación del Mercado Mayorista.
Año estacional	Período de doce meses que inicia el uno de mayo y termina el treinta de abril del año siguiente, o el que defina la CNEE a propuesta del AMM.
Comercialización	Es la actividad por medio de la cual se compra y vende potencia y energía eléctrica en el Mercado Mayorista.
Comercialización de la Demanda	Es la actividad por medio de la cual un comercializador asume todas las responsabilidades comerciales de un Gran Usuario ante el AMM.

Comercialización de la Oferta	Es la actividad por medio de la cual un comercializador asume las responsabilidades comerciales de un Participante Productor por la venta total o parcial de su potencia y energía ante el AMM.
Comercializador	Persona encargada de comprar y vender bloques de energía eléctrica, con carácter de intermediación.
Demanda máxima	Es la potencia máxima del Sistema Nacional Interconectado, registrada por el AMM, durante el año calendario.
Despacho	Se refiere al despacho económico de carga que realiza el AMM.
Despacho económico	Es el despacho de las unidades de generación optimizado al mínimo costo para garantizar el abastecimiento de la demanda del Sistema Nacional Interconectado.
Distribuidor	Titular de instalaciones destinadas a distribuir comercialmente energía eléctrica.

Fraude	Es el acto de evadir el pago correspondiente al consumo real de electricidad, a través de la alteración de los equipos de medición.
Generador	Titular de una central de generación de energía eléctrica que comercializa total o parcialmente su producción.
Gran Usuario con Representación	Es el Gran Usuario que celebra un contrato de comercialización.
Gran Usuario Participante	Es el Gran Usuario que participa directamente en el Mercado Mayorista realizando sus compras de potencia y energía por medio de Contratos a Término o bien comprando la energía en el Mercado de Oportunidad, siendo responsable de las operaciones comerciales que realice en el Mercado Mayorista.
Mercado Eléctrico Regional	Es el Mercado Eléctrico creado por el Tratado Marco del Mercado Eléctrico de América Central.
Mercado Mayorista	Conjunto de operaciones de compra y venta de bloques de potencia y energía que se efectúan a corto y a largo plazo entre agentes del mercado.

Normas de Coordinación**Comercial**

Son las disposiciones y procedimientos emitidos por el AMM y aprobados por la CNEE, que tienen por objeto garantizar la coordinación de las transacciones comerciales del Mercado Mayorista.

Paradigma

Conceptos y visiones del mundo, cuyo objetivo es ordenar la realidad y estructurar el pensamiento.

Participante Consumidor

Se denomina así a los Distribuidores, Comercializadores, Exportadores y Grandes Usuarios.

Participante Productor

Se denomina así a los Generadores, Comercializadores e Importadores.

**Plan de Expansión de
Generación**

Es la planificación de las necesidades de generación.

**Precio de Oportunidad de la
Energía o Precio Spot**

Es el valor del Costo Marginal de Corto Plazo de la energía en cada hora, o en el período que defina la CNEE, establecido por el AMM como resultado del despacho.

Sistema de distribución	Es el conjunto de líneas y subestaciones de transformación de electricidad destinadas a efectuar la distribución.
Sistema de Transmisión	Es el conjunto de subestaciones eléctricas de transformación y líneas de transmisión, entre el punto de entrega del generador y el punto de recepción del distribuidor. Comprende un sistema principal y sistemas secundarios.
Sistema Eléctrico Nacional	Es el conjunto de instalaciones, generadoras, líneas de transmisión, subestaciones, redes de distribución, en general toda la infraestructura eléctrica destinada a la prestación del servicio, interconectadas o no.
Sistema Nacional Interconectado	Es la porción interconectada del sistema Eléctrico Nacional.
Sistema principal	Sistema de transmisión compartido por los generadores.
Sistema secundario	Es aquel que no forma parte del sistema principal.
Suministrador	Es el Distribuidor, Generador o Comercializador con el que un Gran Usuario tiene firmado un contrato de suministro de electricidad.

Transacciones de desvío de potencia

Es el conjunto de intercambios en el Mercado Mayorista, que resulta de los excedentes o faltantes de la potencia comprometida en contratos entre sus participantes.

Transmisión

Es la actividad que tiene por objeto del transporte de energía eléctrica a través del sistema de transmisión.

Transportista

Es la persona individual o jurídica poseedora de instalaciones destinadas a realizar la actividad de transmisión y transformación de electricidad.

Usuario

Es el titular o poseedor del bien inmueble que recibe el suministro de energía eléctrica.

RESUMEN

La realización de este trabajo de graduación tiene como objetivo el optimizar la comercialización de energía eléctrica en Guatemala en un marco donde el mercado energético ha tomado gran auge en la última década. Al analizar la privatización del servicio eléctrico se comprende la necesidad de adaptarse a este creciente mercado, en el cual se ha llegado al punto en que la demanda ha llegado a superar a la oferta; esto se resume en un atractivo mercado para la inversión extranjera y en posibilidades de crecimiento económico.

El proceso de privatización, si es bien orientado, trae consigo desarrollo y múltiples beneficios económicos, tal es el caso del mercado de potencia y energía eléctrica donde al liberarse la distribución, otrora bajo el dominio estatal, se incentivó la inversión extranjera y se diversificó el mercado. Esto trae consigo la necesidad de aumentar la oferta para mantener estabilidad en los precios; en este contexto la optimización de la compra y venta de energía y potencia eléctrica es de suma importancia para determinar la rentabilidad de un proyecto o para la compra de energía dentro de un portafolio de ofertas.

El primer capítulo es una breve descripción de los conceptos básicos de la programación en Excel y Progress, analizando la importancia de la programación lineal en el proceso de optimización.

El segundo capítulo define y explica las principales normas y leyes que rigen el mercado energético en Guatemala, así como la función y normas de cada uno de los integrantes del subsector eléctrico.

En el tercer capítulo se describe la oferta de energía, constituida por las plantas generadoras de energía eléctrica, así como los distribuidores y usuarios que componen la demanda, siendo estas dos partes los componentes del mercado eléctrico.

El cuarto capítulo es la aplicación del programa de optimización diseñado para doce variables u ofertas con su respectiva demanda. Utilizando la programación lineal y Excel se optimiza el mínimo costo de compra de energía eléctrica de un portafolio de doce ofertas; sustentando los resultados con un ejemplo simulado de ofertas con datos típicos con el objetivo de visualizar el funcionamiento del programa de optimización de portafolio.

El capítulo cinco es la descripción del diseño y el mapa de instrucciones, es decir una guía de usuario, de la interface de automatización del programa de optimización, interface que tiene como objeto facilitar el uso del programa, simplificando así el proceso de licitación en un creciente mercado energético tanto nacional como internacional.

OBJETIVOS

General:

Desarrollar un programa de optimización de portafolio energético, automatizado, minimizando el costo de compra de potencia y energía eléctrica en un portafolio de doce ofertas, facilitando así la toma de decisiones del comprador para determinar la rentabilidad de un proyecto.

Específicos:

1. Determinar la solución de la función objetivo que minimiza los costos de comercialización de energía eléctrica.
2. Definir claramente las restricciones que le dan forma al programa de optimización para que determine los valores variables óptimos de potencia y energía a contratar.
3. Analizar la demanda y la oferta en el mercado energético guatemalteco así como sus normas y leyes, para orientar la optimización de portafolio a un objetivo de rentabilidad económica.
4. Desarrollar una interface de automatización para facilitar la operación de licitación en el mercado de energía eléctrica en Guatemala.
5. Evaluar con datos típicos de generación y demanda el programa de optimización de portafolio, para determinar su versatilidad y funcionabilidad en el mercado guatemalteco de energía eléctrica.

INTRODUCCIÓN

El mercado energético en Guatemala ha tomado gran relevancia desde la privatización y creación de la Ley General de Electricidad establecida en el año 1996 con el objetivo de crear un libre mercado en el cual un comprador tiene la opción de licitar libremente con cualquier oferta disponible en dicho mercado. Dadas estas circunstancias la creación de modelos que faciliten este ejercicio de comercialización de potencia y energía eléctrica se ha tornado imperativo. Así surge la necesidad de optimizar el portafolio de ofertas energéticas para minimizar los costos de compra de potencia y energía, valiéndose de la útil herramienta que constituye la programación lineal.

La elaboración del presente trabajo contiene la información básica de programación lineal orientada a la optimización y las interpretaciones más importantes de las normas de coordinación de la comercialización de energía regidas por el Administrador del Mercado Mayorista así como las tarifas reguladas y establecidas, previo estudio técnico, por parte de la Comisión Nacional de Energía Eléctrica. Asimismo se incluye un análisis de oferta y demanda que contiene la información de las plantas generadoras más importantes del mercado guatemalteco y los participantes consumidores que establecen la demanda para dichas generadoras. Para introducir al lector en el concepto de optimización de portafolio se indican los conceptos más relevantes del programa de optimización, cuyo objetivo es minimizar costos, dando a las variables del programa los valores óptimos de potencia y energía a contratar, ajustándose a las restricciones del mismo.

Finalmente se presenta un mapa de instrucciones y guía del usuario para comprender el programa de interface de automatización que tiene como objetivo facilitar el ejercicio de licitación en el mercado guatemalteco.

El presente trabajo se realizó con el fin de darle al lector un conocimiento básico pero conciso de la situación del mercado eléctrico en Guatemala, sus aspectos más importantes y las normas que lo rigen, para que el interesado pueda proyectar sus necesidades de energía de una forma más objetiva y facilitarle así la elección de opciones que hagan más rentables sus proyectos energéticos.

Por medio de la elaboración del presente, se pudo adquirir un conocimiento más profundo de la importancia de la correcta utilización de la energía, su importancia en la vida cotidiana y sus incidencias en el medio ambiente. Dentro de este contexto se puede mostrar al lector la importancia que tiene la economía de mercado aplicada a la ingeniería eléctrica, conceptos que combinados pueden ser de gran utilidad tanto para la utilización de la energía como para el desarrollo de proyectos orientados a la modernización del sistema eléctrico guatemalteco.

1. CONCEPTOS BÁSICOS DE PROGRAMACIÓN

1.1 Programación lineal

1.1.1 Introducción a la programación lineal

La programación lineal es un procedimiento o algoritmo matemático mediante el cual se resuelve un problema indeterminado, formulado a través de ecuaciones lineales, optimizando la función objetivo, también lineal.

Consiste en optimizar (minimizar o maximizar) una función lineal, que se denomina función objetivo, de tal forma que las variables de dicha función estén sujetas a una serie de restricciones que se expresan mediante un sistema de inecuaciones lineales.

1.1.2 Historia de la programación lineal

El problema de la resolución de un sistema lineal de inecuaciones se remonta a Fourier, de quien nace el método de eliminación de Fourier-Motzkin. La programación lineal se plantea como un modelo matemático desarrollado durante la Segunda Guerra Mundial para planificar los gastos y los retornos, a fin de reducir los costos al ejército y aumentar las pérdidas del enemigo. Se mantuvo en secreto hasta 1947. En la posguerra, muchas industrias lo usaron en su planificación diaria.

Los fundadores de la técnica son George Dantzig, quien publicó el algoritmo *simplex*, en 1947, John von Neumann, que desarrolló la teoría de la dualidad en el mismo año, y Leonid Kantoróvich, un matemático ruso, que utiliza técnicas similares en la economía antes de Dantzig y ganó el premio Nobel en economía en 1975. En 1979, otro matemático ruso, Leonid Khachiyan, demostró que el problema de la programación lineal era resoluble en tiempo polinomial. Más tarde, en 1984, Narendra Karmarkar introdujo un nuevo método del punto interior para resolver problemas de programación lineal, lo que constituiría un enorme avance en los principios teóricos y prácticos en el área.

El ejemplo original de Dantzig de la búsqueda de la mejor asignación de 70 personas a 70 puestos de trabajo es un ejemplo de la utilidad de la programación lineal. La potencia de computación necesaria para examinar todas las permutaciones a fin de seleccionar la mejor asignación es inmensa; el número de posibles configuraciones excede al número de partículas en el universo. Sin embargo, toma sólo un momento encontrar la solución óptima mediante el planteamiento del problema como una programación lineal y la aplicación del algoritmo *simplex*. La teoría de la programación lineal reduce drásticamente el número de posibles soluciones óptimas que deberán ser revisadas.

1.1.3 Variables

Las variables son números reales mayores o iguales a cero. De la forma $X_i \geq 0$.

En caso que se requiera que el valor resultante de las variables sea un número entero, el procedimiento de resolución se denomina programación entera.

1.1.4 Restricciones

Las restricciones pueden ser de la forma:

Tipo 1:
$$A_j = \sum_{i=1}^N a_{i,j} \times X_i$$

Tipo 2:
$$B_j \leq \sum_{i=1}^N b_{i,j} \times X_i$$

Tipo 3:
$$C_j \geq \sum_{i=1}^N c_{i,j} \times X_i$$

Donde:

- A = valor conocido a ser respetado estrictamente;
- B = valor conocido que debe ser respetado o puede ser superado;
- C = valor conocido que no debe ser superado;
- j = número de la ecuación, variable de 1 a M (número total de restricciones);
- a; b; y, c = coeficientes técnicos conocidos;
- X = Incógnitas, de 1 a N;
- i = número de la incógnita, variable de 1 a N.

En general no hay restricciones en cuanto a los valores de N y M. Puede ser $N = M$; $N > M$; ó, $N < M$.

Sin embargo si las restricciones del Tipo 1 son N, el problema puede ser determinado, y puede no tener sentido una optimización.

Los tres tipos de restricciones pueden darse simultáneamente en el mismo problema.

1.1.5 Función objetivo

La función objetivo puede ser:

$$Max! = \sum_{i=1}^N f_i \times X_i$$

ó

$$Min! = \sum_{i=1}^N f_i \times X_i$$

Donde:

- f = coeficientes que relativamente son iguales a cero.

1.1.6 Aplicaciones

La programación lineal constituye un importante campo de la optimización por varias razones, muchos problemas prácticos de la investigación de operaciones pueden plantearse como problemas de programación lineal. Algunos casos especiales de programación lineal, tales como los problemas de flujo de redes y problemas de flujo de mercancías se consideraron en el desarrollo de las matemáticas lo suficientemente importantes como para generar por si mismos mucha investigación sobre algoritmos especializados en su solución. Una serie de algoritmos diseñados para resolver otros tipos de problemas de optimización constituyen casos particulares de la más amplia técnica de la programación lineal. Históricamente, las ideas de programación lineal han inspirado muchos de los conceptos centrales de la teoría de optimización tales como la dualidad, la descomposición y la importancia de la convexidad y sus generalizaciones. Del mismo modo, la programación lineal es muy usada en la microeconomía y la administración de empresas, ya sea para aumentar al máximo los ingresos o reducir al mínimo los costos de un sistema de producción.

Algunos ejemplos de las áreas en que la programación lineal es útil son la mezcla de alimentos, la gestión de inventarios, la cartera y la gestión de las finanzas, la asignación de recursos humanos y recursos de máquinas, la planificación de campañas de publicidad, etc.

Otras aplicaciones son:

- Optimización de la combinación de diámetros comerciales en una red ramificada de distribución de agua.
- Aprovechamiento óptimo de los recursos de una cuenca hidrográfica, para un año con afluencias caracterizadas por corresponder a una determinada frecuencia.
- Soporte para toma de decisión en tiempo real, para operación de un sistema de obras hidráulicas;
- Solución de problemas de transporte.

1.1.7 Programación entera

En algunos casos se requiere que la solución óptima se componga de valores enteros para algunas de las variables. La resolución de este problema se obtiene analizando las posibles alternativas de valores enteros de esas variables en un entorno alrededor de la solución obtenida considerando las variables reales.

Muchas veces la solución del programa lineal está lejos de ser el óptimo entero, por lo que se hace necesario usar algún algoritmo para hallar esta solución de forma exacta. El más utilizado es el método de 'Ramificar y Acotar' o *Branch and Bound* por su nombre en inglés. El método de Ramificar y Acotar parte de la adición de nuevas restricciones para cada variable de decisión (acotar) que al ser evaluado independientemente (ramificar) lleva al óptimo entero.

1.2 Conceptos básicos de programación en Excel

Microsoft Excel es un *software* para el manejo de hojas electrónicas agrupadas en libros para cálculos de casi cualquier índole. Entre muchas otras aplicaciones es utilizado en el tratamiento estadístico de datos, así como para la presentación gráficas de los mismos. La hoja electrónica Excel es ampliamente conocida en forma generalizada por profesionales y estudiantes en proceso de formación, pero hay una gran cantidad de usuarios que no conocen a profundidad su gran potencial y adaptabilidad a los diferentes campos del conocimiento.

Para científicos e ingenieros, el Excel constituye una herramienta computacional muy poderosa. También tiene gran utilidad para ser utilizado en la enseñanza de las ciencias y la ingeniería, particularmente, en la enseñanza de los métodos numéricos. Pese a que existen en el mercado programas computacionales muy sofisticados, tales como MATLAB, MATHEMATICA, etc., no tienen la disponibilidad de Excel, que usualmente forma parte del paquete básico de *office* instalado en las computadoras que funcionan bajo el sistema Windows de Microsoft.

Para ejemplificar la simpleza del ambiente Excel una hoja de trabajo típica se presenta en la siguiente figura. En ella puede observarse la distribución de filas y columnas, así como la forma en que se resalta la celda activa. Asimismo la hoja tiene en la parte superior el menú y la barra de herramientas que facilita el darle formato a cualquier archivo desarrollado bajo este programa.

Figura 1. Hoja de trabajo típica de Excel

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1									
2			Kilos fabricados	150	160	170	180	190	
3		Disponible	Producto	1	2	3	4	5	
4			Mano de obra	6	5	4	3	2,5	
5			Materia prima	3,2	2,6	1,5	0,8	0,7	
6			Precio por unidad	\$ 12,50	\$ 11,00	\$ 9,00	\$ 7,00	\$ 6,00	
7			Coste variable	\$ 6,50	\$ 5,70	\$ 3,50	\$ 2,80	\$ 2,20	
8			Demanda	960	928	1041	977	1084	
9			Ganancias por unidad cont.	\$ 6,00	\$ 5,30	\$ 5,40	\$ 4,20	\$ 3,80	
10									
11									
12			Ganancias	\$ 4.504,00					
13						Disponible			
14			Mano de obra utilizada	3695 <=		4800			
15			Materia prima utilizada	1489 <=		1600			
16									
17									

A continuación se brinda al lector una breve introducción a algunas actividades de programación con macros escritos en VBA (una adaptación de Visual Basic para *office* de Microsoft) definidos desde una hoja electrónica de Excel. Salvo pequeñas diferencias para versiones en inglés, el material puede ser desarrollado en cualquier versión.

1.2.1 Programación en Visual Basic aplicado a Excel

1.2.1.1 Evaluación de funciones

Muchas fórmulas a evaluar tienen argumentos de distinto tipo pues algunos argumentos varían, a veces con un incremento determinado, mientras que otros permanecen constantes. Por lo general estos argumentos son tomados de celdas específicas, por lo que es importante saber manejar distintos escenarios para la evaluación de una función o fórmula.

1.2.1.2 Programación de macros

El lenguaje Visual Basic para Aplicaciones (VBA), en el contexto de Excel, constituye una herramienta de programación que permite utilizar el código Visual Basic adaptado para interactuar con las múltiples facetas de Excel y personalizar las aplicaciones ejecutadas en esta hoja electrónica.

Las unidades de código VBA se llaman macros. Las macros pueden ser procedimientos de dos tipos:

- Funciones (*Function*)
- Subrutinas (*Sub*)

Las funciones pueden aceptar argumentos como constantes, variables o expresiones. Están restringidas a entregar un valor en una celda de la hoja. Las funciones pueden llamar a otras funciones y hasta subrutinas, en el caso de que no afecten la entrega de un valor en una sola celda.

Una subrutina realiza acciones específicas pero no devuelven ningún valor. Puede aceptar argumentos como constantes, variables o expresiones y puede llamar funciones. Con las subrutinas es posible entregar valores en distintas celdas de la hoja. Es de gran utilidad para leer parámetros en algunas celdas y escribir en otras para completar un cuadro de información a partir de los datos leídos.

1.2.1.2.1 Editar y ejecutar macros

Las funciones y las subrutinas se pueden implementar en el editor de Visual Basic con Alt-F11.

Para usar una función en una hoja de Excel se debe, en el editor de VB, insertar un módulo y editar la función en este módulo. De la misma manera se pueden editar subrutinas en un módulo.

Una función se invoca en una hoja, como se invoca una función de Excel o una fórmula. Una subrutina se puede invocar, por ejemplo desde la ventana de ejecución de macros (Alt-F8) o desde un botón que hace una llamada a la subrutina.

El código que ejecuta un botón puede llamar a subrutinas y a las funciones de la hoja. El código del botón no está en un módulo. En la hoja de edición donde se encuentra el código del botón, se pueden implementar funciones para uso de este código pero que serán desconocidas para la hoja.

Un error frecuente es editar una función en un módulo que corresponde a una hoja y llamarlo desde otra hoja. En este caso se despliega el error 'mensaje de error #NOMBRE?'.

1.2.1.2.2 Funciones

Una función tiene la siguiente sintaxis:

Function NombreFun(arg1, arg2,...,argn)

Declaración de variables y constantes

Instrucción 1

Instrucción 2

...

NombreFun = Valor de retorno 'comentario'

End Function

Una función puede tener o no tener argumentos, pero es conveniente que retorne un valor. Se debe usar el nombre de la función para especificar la salida:

NombreFun = Valor de retorno

Al interior de las funciones se pueden hacer comentarios utilizando antes de éstos la comilla (''); para el uso de nombres de variables o de cualquier otra palabra reservada de VBA no se discrimina entre el uso de letras mayúsculas y minúsculas.

1.2.1.3 Elementos de programación en Visual Basic

Un programa computacional escrito mediante cualquier lenguaje de programación puede verse a grandes rasgos como un flujo de datos, por un lado los datos de entrada, otros son datos que cumplen alguna función temporal dentro del programa y otros son datos de salida. A lo largo del programa es muy frecuente que sea necesaria la entrada en acción de otros programas o procesos. A mayor complejidad del problema que resuelve el programa, mayor es la necesidad de programar por aparte algunos segmentos de instrucciones que se especializan en una tarea o conjunto de tareas.

Hay tres tipos de estructuras básicas que son muy utilizadas en la programación de un algoritmo, la estructura secuencial, la estructura condicional y la repetitiva.

1.2.1.3.1 Flujo secuencial

El flujo secuencial consiste en seguir una secuencia de pasos que siguen un orden predeterminado.

Por ejemplo un programa que a partir de un número N de días calcula la cantidad de segundos que hay en esta cantidad de días. Este programa se puede ver como una secuencia de varios pasos:

Inicio: Ingresar el número N de días

Paso 1: $H = 24 * N$, para determinar la cantidad de horas

Paso 2: $M = 60 * H$, para determinar la cantidad de minutos.

Paso 3: $S = 60 * M$, para determinar la cantidad de segundos.

Paso 4: Retorne S.

Fin.

La macro correspondiente a esta secuencia de cálculos puede escribirse como sigue:

Function CalculeSegundos(Días)

CantHoras = 24 * Días

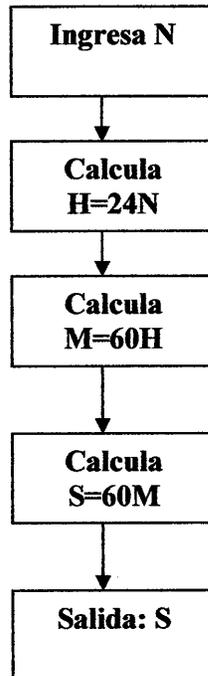
CantMinutos = 60 * CantHoras

CalculeSegundos = 60 * CantMinutos

End Function

Esta secuencia se presenta esquemáticamente en la siguiente figura.

Figura 2. Diagrama de flujo secuencial



1.2.1.3.2 Flujo condicional (*If-Else*)

Un flujo condicional se presenta en un programa o procedimiento que debe escoger una acción o proceso a ejecutar, dependiendo de condiciones que puedan cumplirse.

El caso más sencillo ocurre cuando el programa verifica si una condición se cumple y en caso de ser verdadera ejecuta un proceso, en tanto que si es falsa ejecuta otro proceso.

En VBA se tiene la instrucción:

If...Then...Else, la cual ejecuta condicionalmente un grupo de instrucciones, dependiendo del valor de una expresión.

Sintaxis

If condición *Then*

instrucciones

Else instrucciones-*else*

Se puede utilizar la siguiente sintaxis en formato de bloque:

If condición *Then*

instrucciones

Elseif condición *Then*

instrucciones-*elseif*

...

Else instrucciones-*else*

End If

1.2.1.3.3 Flujo repetitivo (*For-Next, While-Wend, Do While-Loop*)

El flujo repetitivo se presenta en un algoritmo cuando se requiere la ejecución de un proceso o parte de un proceso sucesivamente, hasta que ocurra una condición que permita terminar.

Este tipo de flujos repetitivos se presentan en tres formas que obedecen a maneras diferentes de razonarlos pero que en el fondo hacen lo mismo:

- Utilizar un contador que empiece en un número y termine en otro, ejecutando el proceso cada vez que el contador tome un valor distinto.
- Mientras una condición sea verdadera, ejecutar un proceso y regresar a la condición.
- Ejecutar un proceso, hasta que una condición deje de cumplirse.

En VBA se disponen de las siguientes instrucciones para realizar procesos iterativos:

- *For ... Next*, cuya función es repetir un grupo de instrucciones un número especificado de veces.

Sintaxis (las instrucciones entre “[]” son instrucciones adicionales)

For contador = inicio *to* fin [*Step*, incremento]

instrucciones

[*Exit For*]

instrucciones

Next contador

- *While...Wend*, instrucción que ejecuta una serie de instrucciones mientras una condición dada sea *true*.

Sintaxis

While condición

instrucciones

Wend

Nota: No hay un *Exit While*. En una subrutina, si fuera necesario, se puede usar *Exit Sub*

- *Do*, es una instrucción muy parecida a *While* pero más eficiente.

Sintaxis

Do while condición

instrucciones

[Exit Do]

Loop

1.2.1.4 Edición y ejecución de una subrutina

Las subrutinas o procedimientos es otro de los tipos básicos de programas en Visual Basic. Una descripción de la sintaxis de una subrutina es la siguiente:

Sintaxis:

Sub Nombre-de-Subrutina(lista-argumentos)

instrucciones

End Sub

Es aplicable también,

[Private j Public] [Static] Sub Nombre-de-Subrutina(lista-argumentos)

instrucciones

End Sub

Las partes entre corchetes indican que son instrucciones opcionales. Asimismo la instrucción *Public* es opcional. Indica que la subrutina puede ser llamada por todas las demás subrutinas sin importar donde se encuentre.

La instrucción *Private* es también opcional, indica que la subrutina puede ser llamada solamente por otras subrutinas que se encuentren en el mismo módulo.

La instrucción *Static*, opcional, indica que las variables locales de la subrutina se mantienen constantes de una llamada a otra. El ámbito de acción de esta declaración no incluye a variables declaradas fuera de la subrutina.

Nombre-De-Subrutina es requerido ya que indica el nombre de la subrutina. *Lista-argumentos*, es opcional e indica las variables que conforman los argumentos con que una subrutina es llamada. Para separar una variable de otra se escribe una coma.

Instrucciones es opcional y conforma el conjunto de instrucciones que son ejecutadas a lo largo de la subrutina.

1.2.2 Herramienta Solver para Excel

Solver es parte de una serie de comandos a veces denominados herramientas de análisis 'y si', siendo éste un proceso de cambio de los valores de celdas para ver cómo afectan esos cambios al resultado de fórmulas de la hoja de cálculo. Por ejemplo, variar la tasa de interés que se utiliza en una tabla de amortización para determinar el importe de los pagos. Con Solver, puede buscarse el valor óptimo para una fórmula.

Solver puede buscar el valor óptimo para una celda, denominada celda objetivo, asimismo funciona en un grupo de celdas que estén relacionadas, directa o indirectamente, con la fórmula de la celda objetivo.

Solver ajusta los valores en las celdas cambiantes que se especifiquen, denominadas celdas variables, para generar el resultado especificado en la fórmula de la celda objetivo.

Las restricciones son limitaciones aplicadas a un problema de Solver. Pueden aplicarse restricciones a celdas variables, la celda de destino u otras celdas que estén directa o indirectamente relacionadas con la celda de destino; su función es restringir los valores que puede utilizar Solver en el modelo y pueden hacer referencia a otras celdas a las que afecte la fórmula de la celda objetivo.

1.2.2.1 Utilización del Solver

Solver se utiliza cuando se requiere encontrar la mejor manera de hacer algo, es decir encontrar una solución óptima.

Un modelo de optimización consta de tres partes: la celda objetivo, las celdas cambiantes, es decir variables y las restricciones.

- La celda objetivo representa el objetivo del modelo de optimización.
- Las celdas cambiantes son las celdas de la hoja de cálculo que se pueden cambiar o ajustar para optimizar la celda objetivo, constituyendo valores variables.
- Las restricciones son delimitaciones que se aplican a las celdas cambiantes, por ejemplo, no usar más recursos que los disponibles y no producir más cantidad de un producto del que pueda venderse.

En la siguiente tabla se puede observar de forma práctica y concisa las partes que conforman el modelo de solución óptima de Solver.

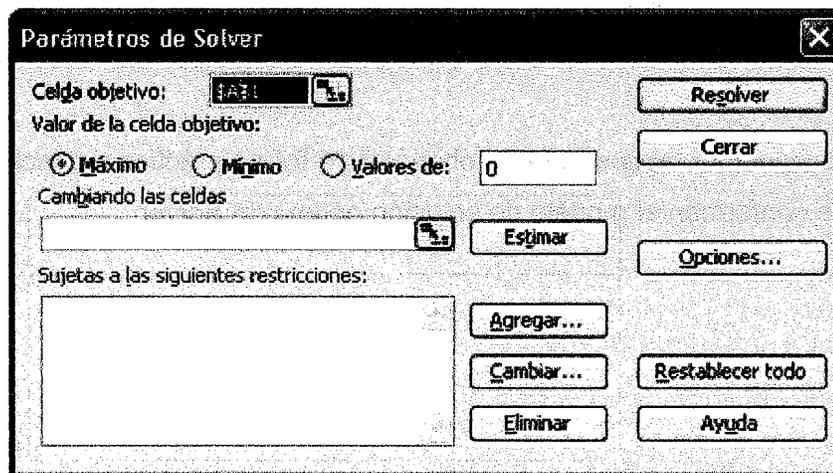
Tabla I. Estructura de un modelo Solver

Celda objetivo	Celdas cambiantes	Restricciones
El objetivo de la optimización. Por ejemplo, optimizar la producción de determinado producto para disminuir gastos y aumentar ganancias.	Son las variables que pueden ser ajustadas para llegar al punto óptimo. Por ejemplo, lo producido de determinado producto puede variar, dependiendo de las circunstancias.	No utilizar más mano de obra y materia prima que la disponible. Es decir, los recursos utilizados deben ser menores o iguales que los recursos disponibles. No producir más cantidad de un producto que el demandado. Es decir, lo producido debe ser menor o igual que lo demandado.

1.2.2.2 Parámetros de Solver

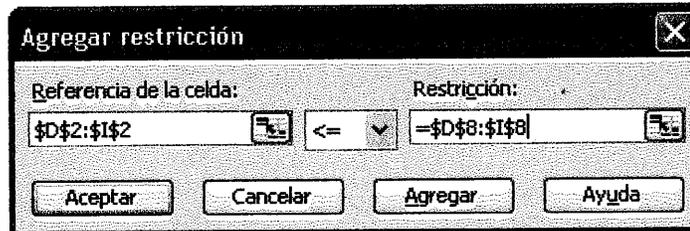
En el cuadro de diálogo Parámetros de Solver se especifica la celda objetivo, las celdas cambiantes y las restricciones que se aplican al modelo de optimización.

Figura 3. Cuadro de diálogo 'Parámetros de Solver'



A continuación se muestra el cuadro de diálogo para agregar las restricciones.

Figura 4. Cuadro de diálogo 'Agregar restricción'



1.2.2.3 Solución viable

Una vez especificada la celda objetivo, las celdas cambiantes y las restricciones, Solver procede a determinar las soluciones de las celdas cambiantes que satisfagan las restricciones del modelo, cualquiera de estas soluciones recibe el nombre de solución viable.

Básicamente, Solver busca todas las soluciones viables y encuentra aquella que tiene el óptimo valor en la celda objetivo (el valor mayor para la optimización máxima y el valor menor para la optimización mínima), a esta solución se le denomina solución óptima.

Algunos modelos de Solver no tienen ninguna solución óptima y otros tienen una solución única; otros modelos tienen varias, e incluso infinitas soluciones óptimas.

1.2.2.4 Modelos lineales

Un modelo de Solver es lineal si se cumplen las siguientes condiciones:

- La celda objetivo se calcula sumando términos de la forma (celda cambiante)*(constante).
- Cada restricción satisface los requisitos del modelo lineal. Esto significa que cada restricción se evalúa sumando términos de la forma (celda cambiante)*(constante) y comparando estas sumas con una constante.

1.3 Programación en Progress

1.3.1 Conceptos básicos

El DBMS, *Data Base Management System*, o Sistema de Manejo de Base de Datos, es un conjunto de programas que se encargan de manejar la creación y todos los accesos a las bases de datos. Este sistema está compuesto por:

- DDL -*Data Definition Language*- o Lenguaje de Definición de Datos,
- DML -*Data Manipulation Language*- o Lenguaje de Manipulación de Datos,
- SQL -*Structured Query Language*- o Lenguaje de Consulta.

El DBMS tiene dos funciones principales:

- a. La definición de las estructuras para almacenar los datos.
- b. La manipulación de los datos.

1.3.1.1 Bases de datos relacionales

Este tipo de base de dato se basa en el modelo de relaciones, cuya estructura principal es la relación, es decir una tabla bidimensional compuesta por líneas y columnas.

Cada línea, que en terminología relacional se llama tupla, representa una entidad, la cual se debe memorizar en la base de datos.

Las características de cada entidad están definidas por las columnas de las relaciones llamadas atributos. Estos atributos cuyas entidades son características comunes, es decir descritas por el mismo conjunto de atributos, forman parte de la misma relación.

1.3.2 Progress RDBMS

Este programa cuenta con tres versiones que hacen posible el trabajar desde uno hasta miles de usuarios dependiendo de las necesidades que se requieran.

- a. *Progress Enterprise* -de treinta y uno a miles de usuarios-.
- b. *Progress Workgroup* -de dos a treinta usuarios-.
- c. *Progress Personal* -un usuario-.

1.3.2.1 Progress Enterprise RDBMS

Este programa está diseñado para grandes ambientes empresariales y el procesamiento de transacciones a través de las aplicaciones más demandantes de hoy en día, basados en procesamiento de transacciones en línea utilizando SQL Progress 4GL. Cimentado en una arquitectura flexible de multienlaces y multiservidor, *Progress Enterprise* es una base de datos empresarial a gran escala, poderosa y abierta, que puede ejecutarse a través de múltiples plataformas de *hardware* y redes.

1.3.2.2 Progress *Workgroup* RDBMS

Progress *Workgroup* incluye una gran parte de las capacidades ofrecidas por Progress *Enterprise* y es la opción óptima para grupos de trabajo de 2 a 30 usuarios simultáneos. Esta solución económica, a nivel departamental proporciona un alto rendimiento, soporte a múltiples usuarios e interoperabilidad entre plataformas.

Tiene como característica satisfacer las necesidades de las aplicaciones de un grupo de trabajo al ejecutarse en una amplia variedad de plataformas de *hardware* y sistemas operativos. Debido a que la arquitectura flexible de la base de datos ofrece un desempeño óptimo en todas las plataformas, alguna base de datos desarrollada en una maquina puede servir aplicaciones de otros sistemas y configuraciones de red.

1.3.2.3 Progress *Personal* RDBMS

Empaquetado en las herramientas de desarrollo de Progress, incluyendo *Progress Provision Plus*, *Progress Personal* RDBMS es la mejor opción para desarrollar aplicaciones monousuario, basadas en SQL y 4GL, así como para desarrollar y generar prototipos y probar las aplicaciones.

1.3.3 Historia del *software* Progress

El *software* proveniente de la firma americana con el mismo nombre, se instaló en España. La compañía fue fundada en el año 1981 por Joseph W. Alsop y en 1992 comenzó sus operaciones en España con la inauguración de su sede central en Madrid. Entre sus principales clientes se encuentran compañías como el AON, Aventis, Ayuntamiento de Madrid, Ayuda en Acción, Boots Healthcare, British Petroleum, Corporación ONCE, Gil y Carvajal, Honda, Iberia, Indra, Juvena, Reynolds, Swisslife, Telematel, TV3, etc.

1.3.4 Características principales de Progress

Progress, como tal, es un Sistema Gestor de Bases de Datos. Esto quiere decir que permite administrar distintas bases de datos. Siendo un lenguaje de programación de 4ª Generación, en el que se puede administrar bases de datos desarrolladas por el usuario.

Las características principales del *software* Progress se enumeran a continuación:

- Solución altamente escalable que proporciona un rendimiento óptimo
- Hasta 10,000 usuarios concurrentes
- Soporte para SMP
- Servidor multienlazado, es decir múltiples servidores por cada base de datos (hasta 256)
- Soporte para múltiples sistemas operativos y plataformas de hardware
- Conformidad con el ANSI SQL-92.
- Características de seguridad, incluyendo recuperación automática de caídas y transacciones y capacidades de avance "*roll-forward*"
- Respaldo en línea, soporte a prueba de fallas y reorganización de tablas e índices para alta disponibilidad
- Almacenamiento virtual de datos ilimitado, su única limitante es el *hardware*.

1.3.5 Estructura del programa

1.3.5.1 Diccionario de datos

El diccionario de datos en Progress ofrece una manera de administrar las bases de datos, de distinta manera de los ya conocidos programas, tales como Oracle, Access, etc. Por medio de Progress se puede desde crear una simple tabla a crear una secuencia, pasando por crear los campos de las tablas y sus respectivos índices creando así relaciones entre las mismas.

1.3.5.2 Administrador de datos

Data Administration es una herramienta muy útil ya que permite importar datos, así como exportarlos. Asimismo permite crear bases de datos Progress a raíz de otras bases de datos como Fox Pro y Access.

1.3.5.3 Procedure Editor

Procedure Editor es un editor de programas desde el cual se puede crear programas para visualizar datos, así como editarlos y actualizarlos.

1.3.5.4 Appbuilder

Appbuilder es la herramienta más utilizada por los programadores. El *Appbuilder* permite acceder a ventanas que tienen una gran similitud con el programa Visual Basic. Sin embargo Progress permite acceder a datos de forma automatizada, es decir los procedimientos son casi todos automáticos. Los *Smart Data Object* permiten acceder a los datos de manera automática, así como modificarlos, borrarlos, salvarlos, copiarlos, etc. En definitiva los *Smart Data Objects* permiten realizar en minutos lo que en otros programas se realiza en horas, simplificando la programación.

1.3.5.5 Report Builder

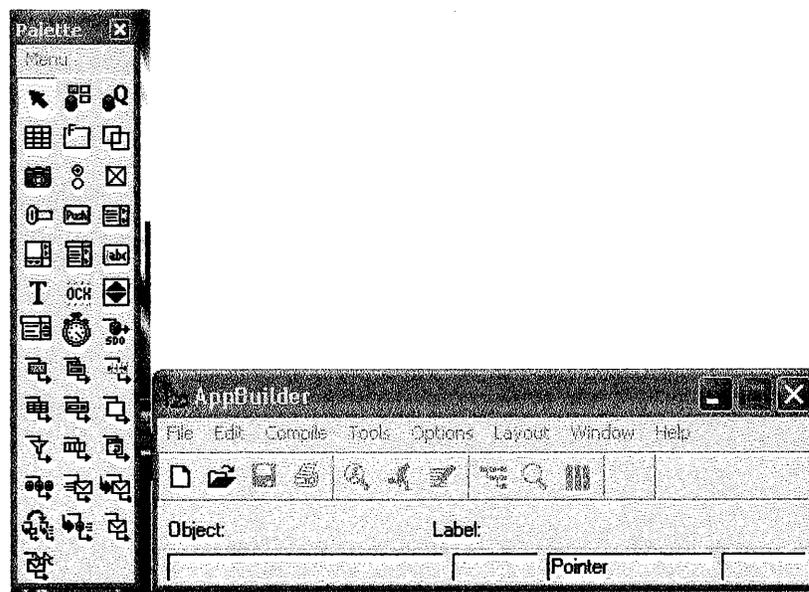
Para realizar informes Progress permite dos opciones, *Results* o el *Report Builder*. Éstas constituyen dos herramientas muy útiles para generar informes e incluso *Results* permite generar códigos de impresión.

1.3.6 Aspectos Generales

Progress tiene una desventaja, que consiste en su forma de crear y guardar sus aplicaciones. Éstas no se almacenan en un punto exe como lo hace Visual Basic, por lo que es necesario tener instalada una versión de Progress en la máquina que ejecutará la aplicación.

En la siguiente figura se ilustra un típico ambiente de Progress, específicamente en la herramienta *Appbuilder*, en el que se muestran las opciones y herramientas que el programa permite.

Figura 5. Ambiente Progress para programación



2. PRINCIPIOS ECONÓMICOS APLICADOS A LA INGENIERÍA ELÉCTRICA

2.1 Principios básicos de economía

La economía es un concepto que evoca múltiples ideas; las cuales pueden agruparse en uno de los temas siguientes: economía como fenómeno y economía como ciencia-técnica.

El **fenómeno económico** comprende todas aquellas actividades sociales realizadas con el fin último de conquistar mayores niveles de bienestar. Estas actividades sociales por sí mismas definen un espacio de interacción al cual puede llamarse el sistema económico. Al interior de este sistema se realiza contratos, ofertas, compras y ventas, promociones, distribución de productos, financiamiento, soporte monetario del Estado, etc. Tanto el sistema como las actividades y sus componentes, siendo el principal de éstos el 'agente económico', forman parte del fenómeno económico. Básicamente este fenómeno es un 'algo' que tiene lugar como resultado de la motivación del ser humano para ganar bienestar.

En economía la **ciencia-técnica** hace alusión al total de ciencias y técnicas de administración-generación de recursos, bienes y bienestar, al conjunto de doctrinas, premisas, modelos y/o técnicas formuladas para registrar en forma adecuada y precisa las diversas manifestaciones del fenómeno económico, así como para postular y analizar relaciones causa-efecto, regularidades, correlaciones. Igualmente, la economía como ciencia-técnica permite definir las líneas de acción estratégicas, ya sea individuales, corporativas o nacionales, para la obtención de un mayor bienestar estable.

2.1.1 Costo de oportunidad

El costo de oportunidad es el nombre que se da en Economía al valor que representa cuánto cuesta o costaría desaprovechar una oportunidad. En definitiva el costo de oportunidad no es un costo real o efectivo, ni una pérdida verdadera, sino más bien un costo o pérdida referencial que indica si se está o no siendo eficiente en el manejo del dinero.

2.1.2 La demanda

La demanda es la cantidad límite máxima de un determinado producto que una persona desearía comprar y además podría comprar a un determinado precio del bien y bajo un conjunto de gustos y preferencias propios de ella, todo lo que realizará a condición de no exceder un nivel máximo de dinero que esta persona podría gastar.

La "ley de la demanda" establece que a mayor precio, menor cantidad demandada; es decir, a medida que aumenta el precio, disminuye la demanda.

El precio no es un parámetro de la función de demanda. El precio es la variable que determina cuál será el valor de la cantidad demandada.

2.1.3 La oferta

La oferta es la cantidad de producto que se desea vender de acuerdo al precio que rige en el mercado.

La oferta puede incluir o no relaciones de producción. Si no incluye relaciones de producción, es decir, si sólo se considera un mercado de intercambio de bienes pre-existentes, la oferta estará determinada por motivos estrictamente psicológicos. Si los bienes que son ofrecidos tienen que ser producidos primero la oferta deberá considerar el concepto de costo de producción.

El caso que no incluye relaciones de producción (ni, ciertamente, costo de producción) tiene como característica que a medida que se eleva el precio de un bien y las personas que pueden ofrecer este bien dentro de un mercado, aumentarán las cantidades ofrecidas del bien. Esto ocurrirá en virtud de que el precio representa un ingreso para la gente que ofrece el bien y por lo mismo un mayor precio implicará un mayor estímulo para la oferta.

En el caso en que sí incluye tecnología y costo de producción, primeramente deben cubrirse los costos de producción. Una vez que éstos están cubiertos, debe encontrarse la relación entre cantidad ofrecida y precios que surge de la estructura de costos de producción. Si el costo marginal de producción es creciente, porque el producto marginal es decreciente, la función de oferta puede ser exactamente igual a la función de costo marginal de producción.

En definitiva, se puede decir que la función de oferta puede venir determinada por estímulos psicológicos para ofrecer bienes o que puede estar determinada por la estructura de costos de producción. En este último caso los costos incluyen, principalmente, dos aspectos:

- a) La cantidad utilizada del recurso productivo (L)
- b) El nivel de remuneración de ese recurso productivo (w).

El costo de producción de una cantidad X , denominada $\{C(X)\}$, será visto así: $C(X) = w \cdot L$. Como L depende de X (ya que representa lo requerido del factor de producción para elaborar una cantidad como X), se puede escribir a L como una función $L(X)$, y así $C(X) = w \cdot L(X)$. Por lo que puede entenderse que los determinantes de la oferta en el segundo caso van a ser la tecnología y la remuneración al factor de producción; mientras que en el primer caso los determinantes van a ser puramente psicológicos. Puede entenderse tal caso como un sistema de economía matemática.

2.1.4 La elasticidad-precio

La elasticidad es un concepto que relaciona cambios en una magnitud "dependiente" que deberán producirse en respuesta a (o como consecuencia de) cambios en una magnitud "independiente". La elasticidad relaciona estos cambios a nivel porcentual.

El concepto de elasticidad permite "predecir" variaciones en el nivel físico de ventas que se registrarán como consecuencia de variaciones en el nivel de precios.

2.1.5 Tipos de mercado

2.1.5.1 Competencia perfecta

Se trata de una situación en la que coexisten varias empresas al interior de un mercado. Cada empresa es relativamente pequeña, de manera que ninguna puede controlar la oferta. En competencia perfecta las empresas tienen que estar reduciendo sus costos en forma constante, pues siempre aparecen nuevas empresas que las desafían y que tienen costos menores debido a que utilizan tecnología más avanzada o a que ingresan al mercado con precios de promoción.

2.1.5.2 Monopolio

Del griego *Monos* (uno) + *Polein* (vender). Sólo uno vende. Tres condiciones de mercado definen una situación de monopolio y la empresa candidata a ser monopolista debe cumplir con cada una de ellas:

- ser capaz de satisfacer a la demanda de todo el mercado
- ser la única con esa capacidad
- poseer un excelente conocimiento de la estructura de la demanda del mercado.

Si la empresa tiene rendimientos marginales decrecientes, se tornará en un monopolio perjudicial para el consumidor. Si, por el contrario, sus rendimientos marginales son crecientes, la empresa podría resultar beneficiosa para el consumidor, ya que ocasionaría una caída de precios por caída de costos y aumento del volumen de producción.

2.1.5.3 Oligopolio

Del griego *Oligos* (pocos) + *Polein* (vender). Existen unos pocos vendedores. Ninguno domina, pero al ser pocos pueden coaligarse para influir sobre los precios y las cantidades, casi siempre aumentando los primeros y disminuyendo las segundas. En la práctica, funcionan como un grupo empresarial monopolístico del tipo que es perjudicial a los consumidores.

2.1.5.4 Monopsonio

Del griego *Monos* (uno) + *Psonein* (comprar comida). Este término describe una situación en que en un mercado existe un solo comprador de cualquier bien, no precisamente comida, siendo ésta únicamente la raíz etimológica. Los muchos vendedores tienen muy reducidos márgenes de negociación, de manera que el monopsonista puede pagar precios muy bajos y así llevar a que los beneficios de las empresas se reduzcan significativamente. Un ejemplo de monopsonista es el de una persona que deseara comprar todo el pescado en un puerto y estuviera en capacidad de hacerlo. Esta persona querrá comprar a precios que sean iguales a los costos medios de producción. Si los pescadores no tienen otra salida para su producto, es posible que acepten reducir sus márgenes de beneficio. Mientras mayor sea el poder de negociación del monopsonista, menor será el precio que recibirán los pescadores por su producto.

2.2 Potencia y energía eléctrica en Guatemala

2.2.1 Crecimiento histórico de la energía y la potencia eléctrica

En Guatemala el mercado energético ha ido en aumento a medida que la demanda así lo ha requerido. En la siguiente tabla, que contiene información proporcionada por el Administrador del Mercado Mayorista, se muestra el crecimiento en la demanda de energía y potencia eléctrica en Guatemala.

Tabla II. Demanda histórica en Guatemala

Demanda Histórica Guatemala

Año	Población Miles Habitantes	PIB IDH Miles Quetzales	Demanda de Energía GWh	Demanda Máxima de Potencia MW	Factor de Carga
1990	8,908	3,390	2,334	452	0.59
1991	9,117	3,514	2,458	495	0.57
1992	9,331	3,684	2,748	538	0.58
1993	9,550	3,828	2,972	579	0.59
1994	9,775	3,983	3,268	624	0.60
1995	10,004	4,180	3,546	717	0.56
1996	10,236	4,303	3,782	733	0.59
1997	10,471	4,491	4,193	815	0.59
1998	10,713	4,715	4,483	877	0.58
1999	10,963	4,897	4,885	962	0.58
2000	11,225	5,074	5,352	1,039	0.59
2001	11,504	5,192	5,645	1,087	0.59
2002	11,791	5,309	6,005	1,141	0.60
2003	12,087	5,422	6,295	1,195	0.60
2004	12,390	5,566	6,677	1,266	0.60
2005	12,701	5,747	6,911	1,290	0.61
2006	13,000	6,010	7,355	1,383	0.58
2007	13,345	6,317	7,805	1,443	0.59

Fuente: Administrador del Mercado Mayorista, publicación. 2008

La demanda máxima de potencia, en el año 2007, fue de 1,443 MW es decir, un crecimiento de 60 MW (4.4%) con respecto al año anterior.

En cuanto al intercambio de energía con El Salvador siempre ha sido favorable a Guatemala, con un valor máximo neto entre exportaciones e importaciones de 718 GWh en el año 2000. El intercambio neto para el 2007 fue de 131.9 GWh, habiéndose incrementado respecto al año anterior en 51.9 GWh.

2.2.2 Ley y estructura del sector eléctrico en Guatemala

La reforma del Sector Eléctrico en Guatemala se inició con la emisión de su Marco Legal establecido en la Ley General de Electricidad en el año de 1996. Posteriormente se emitieron el Reglamento de la Ley General de Electricidad en 1997 y el Reglamento del Administrador del Mercado Mayorista en el año de 1998.

A partir de estos hechos se han emitido Normas Técnicas de Transmisión y Distribución, Normas de Coordinación Comercial y Operativa y procedimientos técnicos que complementan el Marco Regulatorio.

A grandes rasgos, la Ley General establece la libertad de la instalación de centrales generadoras sin requerir de autorizaciones por parte del estado, salvo las establecidas en la Constitución de la República y las Leyes del país. Asimismo para el uso de bienes del Estado se requerirá la respectiva autorización del Ministerio de Energía y Minas -MEM- cuando la potencia de la hidroeléctrica sea mayor de 5 MW.

El Ministerio de Energía y Minas es el órgano del Estado responsable de formular y coordinar las políticas, planes del Estado, programas indicativos relativos al Subsector Eléctrico y aplicar la Ley y su Reglamento.

Las funciones de regulación y normativas están a cargo de la Comisión Nacional de Energía Eléctrica -CNEE-. La Comisión es un órgano técnico del MEM y cuenta con independencia funcional. La CNEE además determina los precios y calidad de la prestación de los servicios de transporte y distribución y asegura las condiciones de competencia en el Mercado Mayorista de Electricidad.

La administración y operación del Sistema Nacional Interconectado está a cargo del Administrador del Mercado Mayorista de Electricidad – AMM-, el cual es un ente de carácter privado y cuyas funciones son la coordinación de las operaciones y despacho del Sistema Eléctrico Interconectado, así como el establecimiento de precios de mercado de corto plazo, llevar a cabo las transacciones de compra y venta en el mercado mayorista y garantizar la seguridad y el abastecimiento de Energía Eléctrica.

2.2.2.1 Mercado de potencia y energía eléctrica

El mercado de energía eléctrica está constituido por el Mercado Regulado y el Mercado Mayorista. En las normas del Mercado Regulado se establecen aquellas tarifas reguladas por la CNEE que abarca usuarios con los siguientes consumos:

- Baja tensión y consumo de energía menor o igual a 11 KW por día;
- Usuarios en baja o media tensión, constituidos por un consumo de energía entre 11 y 100 KW por día.

La primera tarifa corresponde al usuario domiciliario en la tarifa social y otros con mayor consumo pero inferior al consumo del sector no regulado. El sector regulado tiene la ventaja de gozar de la tarifa social.

El sector no regulado se refiere a la demanda constituida por los siguientes usuarios:

- Tarifas establecidas por el distribuidor, por ejemplo, industrias pequeñas,
- Usuarios con potencia mayor a 100 KW, por ejemplo, industria mediana y grande.

Cabe mencionar que los usuarios del sector no regulado no gozan del beneficio de la tarifa social.

El Mercado Mayorista tiene las siguientes características:

- Generadores con potencia mayor a 5 MW.
- Distribuidores con 15,000 usuarios como mínimo.
- Transportistas que tengan 10 MW como mínimo de capacidad de transporte.
- Comercializadores que compren o vendan bloques de energía asociados a una Oferta Firme de por lo menos 2 MW.
- Grandes Usuarios con demanda máxima de potencia por arriba de 100 KW

Los productos y servicios que se compran y se venden en el Mercado Mayorista son potencia eléctrica, energía eléctrica, servicios de transporte de energía eléctrica y servicios complementarios que sirvan para el eficiente funcionamiento y servicio del sistema eléctrico.

La industria eléctrica en Guatemala se constituye de cuatro actividades principales: generación, transmisión, comercialización y distribución. Las actividades de distribución se encuentran casi completamente privatizadas, mientras que las de generación únicamente en forma parcial. En términos de la oferta, es decir producción, la apertura es total, mientras que en la demanda o los consumidores, la apertura está limitada a los grandes usuarios.

El diseño y concepción del mercado energético rige su intercambio mediante el Mercado de Contratos a Término o de futuros y el Mercado de Oportunidad o spot. Los agentes tienen libertad de adquirir sus requerimientos de potencia y energía (o la colocación de su producción) con todos los otros agentes. Las distribuidoras deben garantizar en el Mercado a Término el suministro a sus usuarios regulados.

La Reforma llevada a cabo y la estructura implementada en el subsector eléctrico tienen por objetivo promover la participación privada, fomentar la competencia y los mecanismos de mercado, estimular el incremento del sector eléctrico, aumentando la oferta, la demanda y la cobertura eléctrica, al tiempo que se reduce la participación del Estado en el subsector eléctrico; es decir mediante dicha Reforma, se realizó una apertura económica para consolidar un libre mercado energético.

De esta forma el Mercado de Electricidad ha evolucionado desde un sistema centralizado dominado por un monopolio estatal hacia un sistema de Mercado Mayorista abierto.

2.3 Comercialización de energía y potencia eléctrica en Guatemala

La comercialización de energía y potencia eléctrica en Guatemala se constituye por la compra y venta en el Mercado Mayorista, cuyos precios y normas son regulados por la Comisión Nacional de Energía Eléctrica y las operaciones del Sistema Nacional Interconectado son controladas por el Administrador del Mercado Mayorista.

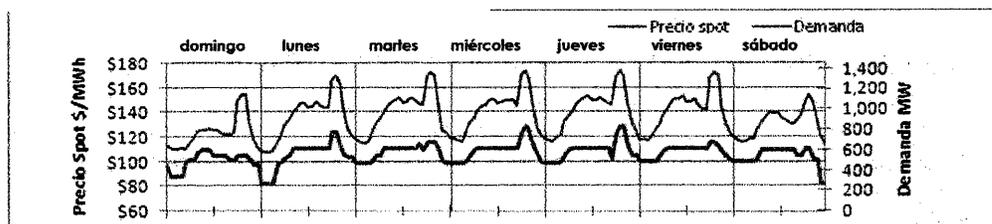
2.3.1 Operaciones de compra y venta del Mercado Mayorista

Las operaciones de compra y venta del Mercado Mayorista se realizan a través de:

- Un Mercado de Oportunidad o Mercado Spot, para las transacciones de oportunidad de energía eléctrica. En este mercado el demandante compra del conjunto de vendedores y las transacciones se realizan al precio de oportunidad de la energía, calculado en base al costo marginal de corto plazo, que resulta del Despacho de la Oferta Disponible.
- Un Mercado a Término, para contratos entre Agentes y Grandes Usuarios, con plazos, cantidades y precios pactados entre las partes. En este mercado los Agentes del Mercado Mayorista y los Grandes Usuarios pactan libremente las condiciones de sus contratos.
- Un Mercado de Transacciones de Desvíos de Potencia diarios y mensuales. En las transacciones diarias, se liquidan las diferencias entre la potencia disponible y la potencia firme de los participantes productores, valoradas al Precio de la Referencia de la potencia, el que se utiliza en la liquidación mensual de dichas transacciones. En las transacciones mensuales se liquidan las diferencias entre la Demanda Firme Efectiva de cada Distribuidor, Gran Usuario o Exportador y su Demanda Firme efectivamente contratada durante el Año Estacional correspondiente.

En la siguiente gráfica se muestra un ejemplo de la relación entre el precio spot y la demanda semanal del Sistema Nacional Interconectado, esta información es manejada por el Administrador del Mercado Mayorista.

Figura 6. Precio Spot y demanda semanal SNI



Fuente: Administrador del Mercado Mayorista. Publicación en amm.gob.gt el 9-8-09

Esta gráfica, que corresponde a la semana del 19 al 25 de julio del año 2009, muestra que el precio spot tuvo un promedio de 106.09 \$/MWh con una variación de \$ 0.39 a la baja respecto a la semana anterior, con un máximo de 128.78 \$/MWh el día miércoles a las 20 hrs. El mínimo fue de 81.98 \$/MWh el día lunes a la 1 hr. La demanda del SNI tuvo un promedio de 926.73 MW, la demanda máxima fue el día jueves a la 19:30 hrs con 1373.14 MW y una mínima de 576.42 MW el lunes a las 3 hrs. El coeficiente de correlación entre el precio y la demanda fue de 0.75. Asimismo puede observarse que la gráfica es muy parecida de un día a otro, ya que la curva de demanda es similar en sus puntos máximos y mínimos todos los días, con ligeras variaciones, según la temporada del año.

2.3.1.1 Contratos de abastecimiento

En el Mercado a Término los contratos pueden ser de distintos tipos, ajustándose a los requerimientos de la oferta y la demanda.

2.3.1.1.1 Contratos por diferencias con curva de carga

En este tipo de contrato se establece una potencia contratada para el cubrimiento de la Demanda Firme en todo momento durante toda la vigencia del contrato. Esta potencia contratada no puede superar la Oferta Firme Eficiente del vendedor que no esté comprometida en otros contratos. Por otra parte el participante productor compromete el abastecimiento de una demanda de energía definida como una curva de demanda horaria a lo largo del período de vigencia del contrato a un participante consumidor. La energía de la curva horaria es asignada al comprador del contrato y descontada a la parte vendedora del mismo. El vendedor para poder respaldar la potencia ofrecida puede comprar, a su vez, potencia para cumplir su compromiso.

Esto significa que la curva de demanda horaria puede ser abastecida por el productor ya sea con generación propia o comprando los faltantes en el Mercado de Oportunidad.

2.3.1.1.2 Contratos de potencia sin energía asociada

En este tipo de contrato se establece por las partes un valor de potencia contratada para el cubrimiento de la Demanda Firme. El consumidor en el Mercado Mayorista puede comprar la energía demandada en el Mercado de Oportunidad.

2.3.1.1.3 Contratos de opción de compra de energía

En este tipo de contrato el Participante Productor vende a un Participante Consumidor una cantidad de energía horaria de acuerdo a los siguientes términos: se establece por las partes un Precio de Opción de compra de energía; si el Precio de Oportunidad de la Energía es menor al Precio de Opción, no se asigna energía derivada del contrato. En caso contrario, el Participante Productor vende con energía propia o comprada en el Mercado de Oportunidad la energía horaria establecida en dicho contrato la cual no podrá superar el valor de potencia contratada.

2.3.1.1.4 Contratos por diferencias por la demanda faltante

Este es un contrato en el cual se establece por los interesados un valor de potencia contratada para el cubrimiento de la Demanda Firme. El vendedor se compromete a entregar al precio pactado toda la energía demandada por el comprador que no sea suministrada por otros contratos.

2.3.1.1.5 Contratos de energía generada

En este tipo de contrato un Agente Generador a cuyas unidades generadoras no se les haya asignado Oferta Firme Eficiente, vende a un Participante Consumidor toda la energía que pueda generar en el Mercado Mayorista. Con este tipo de contrato únicamente se vende energía por lo cual no existe compromiso de potencia para el cubrimiento de Demanda Firme.

2.4 Normas de comercialización de energía y potencia eléctrica en Guatemala

2.4.1 Ley General de Electricidad

La Ley General de Electricidad surge de la necesidad de que la oferta de energía eléctrica satisfaga la demanda de la misma, por lo que es necesario aumentar la producción, estableciendo normas jurídicas fundamentales para facilitar la actuación de los diferentes sectores del Sistema Eléctrico. Dadas estas circunstancias se hizo imperativo crear una comisión técnica calificada, la cual, al igual que la ley, se encuentra supeditada al Ministerio de Energía y Minas.

2.4.1.1 Régimen eléctrico

2.4.1.1.1 Principios generales

La función de la ley es normar el desarrollo del conjunto de actividades de generación, transporte, distribución y comercialización de electricidad; basándose en la libre comercialización, distribución y transporte de la energía con previa autorización si se requiere la utilización de bienes de dominio público. Asimismo son libres los precios por la prestación del servicio de electricidad.

Las normas de esta ley son aplicables a todas las personas que desarrollan las actividades de generación, transporte, distribución y comercialización de electricidad, ya sean éstas individuales o jurídicas.

2.4.1.1.2 Comisión Nacional de Energía Eléctrica

La Comisión Nacional de Energía Eléctrica -CNEE-, fue creada como un órgano técnico del Ministerio de Energía y Minas -MEM-. La CNEE goza de independencia funcional y debe cumplir con las siguientes funciones:

- a. Cumplir y hacer cumplir la Ley General de Electricidad y sus reglamentos.
- b. Proteger los derechos de los usuarios y penalizar actos que atenten contra la libre competencia.
- c. Definir las tarifas de transmisión y distribución, sujeta a regulación.
- d. Fungir como árbitro al surgir controversias entre los agentes del subsector eléctrico.
- e. Emitir las normas técnicas relativas al subsector eléctrico y fiscalizar su cumplimiento.
- f. Garantizar el libre acceso y uso de las líneas de transmisión y redes de distribución.

La Comisión se integra por tres miembros, nombrados por el Ejecutivo, entre cada una de las ternas propuestas por:

- a. Los Rectores de las universidades del país;
- b. El Ministerio;
- c. Los Agentes del Mercado Mayorista.

Los miembros deben ser guatemaltecos, profesionales en la materia, no tener relación con empresas asociadas al subsector eléctrico, así como no poseer antecedentes penales.

Los miembros deben trabajar con exclusividad para la Comisión, desempeñando sus funciones por un período de cinco años.

Los ingresos de la Comisión provienen de aplicar una tasa a las ventas mensuales de electricidad de cada empresa eléctrica de distribución.

2.4.1.2 Instalación de obras de generación, transporte y distribución de electricidad

La instalación de centrales generadoras es libre pero debe hacerse un estudio de impacto ambiental, es decir que cualquier persona individual o jurídica puede instalar una generadora, siempre y cuando cumpla con los requisitos establecidos por la ley y si la central excede 5 MW se requiere una autorización del Ministerio.

La autorización para instalar una central generadora es otorgada por el Ministerio, no excediendo un plazo de cincuenta años. Dentro de la zona autorizada debe haber un área obligatoria de servicio que no podrá ser inferior a una franja de doscientos metros en torno a sus instalaciones.

2.4.1.3 Operación de las instalaciones de generación, transporte y distribución de electricidad

La administración del mercado mayorista está a cargo de un ente privado, denominado Administrador del Mercado Mayorista -AMM-, cuyas funciones son:

- a. La coordinación de la operación de centrales generadoras, interconexiones internacionales y líneas de transporte al mínimo costo para el conjunto de operaciones del mercado mayorista, en un marco de libre contratación de energía eléctrica entre generadores, comercializadores, y distribuidores.
- b. Establecer precios de mercado de corto plazo para las transferencias de potencia y energía entre generadores, comercializadores, distribuidores, importadores y exportadores, cuando ellas no correspondan a contratos de largo plazo libremente pactados.
- c. Garantizar la seguridad y el abastecimiento de energía eléctrica.

2.4.1.3.1 Instalaciones de servicio de distribución final

En la distribución final, el usuario no puede utilizar una demanda mayor que la contratada dentro de los límites máximos de variación que el suministrador permita. En caso de superar el límite el distribuidor puede suspender el servicio y cobrar el exceso de demanda según la tarifa aplicable al usuario. La CNEE es el ente encargado de fijar los importes por concepto de corte y reconexión.

Los distribuidores del servicio eléctrico deben asegurar con las empresas generadoras que éstas les garanticen su requerimiento total de potencia y energía para el año en curso y el siguiente como mínimo.

2.4.1.4 Regulación de precios de la electricidad

Están sujetos a regulación los precios de los siguientes suministros:

- a. Las transferencias de potencia y energía eléctrica entre generadores, distribuidores, comercializadores, importadores y exportadores que resulten de la operación a mínimo costo del Sistema Eléctrico Nacional -SEN-.
- b. Los peajes a que están sometidas las líneas de transporte, subestaciones de transformación e instalaciones de distribución.
- c. Los suministros a usuarios del Servicio de Distribución Final, cuya demanda máxima de potencia se encuentre por debajo del límite reglamentario.

Las tarifas a usuarios del Servicio de Distribución Final son establecidas por la CNEE.

Las tarifas por servicio de electricidad se encuentran reguladas únicamente por la Ley General de Electricidad.

2.4.1.4.1 Tarifas aplicables a consumidores finales

Las tarifas a consumidores finales de servicio de distribución final, en sus componentes de potencia y energía, son calculadas por la CNEE como la suma del precio ponderado de todas las compras del distribuidor, referidos a la entrada de la red de distribución y del Valor Agregado de Distribución -VAD-. Para referir los precios de adquisición de potencia y energía a la entrada de la red de distribución, la CNEE agrega los peajes por subtransmisión pertinentes. Los precios de adquisición de potencia y energía a la entrada de la red de distribución deben expresarse de acuerdo a una componente de potencia relativa a la demanda máxima anual de la distribuidora (Q/KW/mes), y a una componente de energía (Q/KW/h).

Los precios de compra de energía por parte del distribuidor, que sean reconocidos en las tarifas, deben reflejar las condiciones obtenidas en las licitaciones.

El VAD corresponde al costo medio de capital y operación de una red de distribución de una empresa eficiente de referencia, operando en un área de densidad determinada. El VAD debe considerar, como mínimo, los siguientes componentes básicos:

- a. Costos asociados al usuario, independientemente de su demanda de potencia y energía.
- b. Pérdidas medias de distribución, tanto en sus componentes de potencia como de energía.
- c. Costos de capital, operación y mantenimiento asociados a la distribución, expresados por unidad de potencia suministrada.

2.4.2 Normas de coordinación comercial del Administrador del Mercado Mayorista

El Administrador del Mercado Mayorista -AMM-, como su nombre lo indica, es el ente encargado de la administración y coordinación del Mercado Mayorista. Los productos y servicios que se compran y venden en el Mercado Mayorista son:

- a. Potencia eléctrica,
- b. Energía eléctrica,
- c. Servicios de transporte de energía eléctrica,
- d. Servicios complementarios.

2.4.2.1 El Administrador del Mercado Mayorista

2.4.2.1.1 Objetivos y funciones

El objetivo del AMM es asegurar el correcto funcionamiento del Sistema Nacional Interconectado -SNI- y de las interconexiones; su función es realizar el Despacho o programación de la operación, la coordinación de la operación del SNI dentro de los requerimientos de calidad de servicio y seguridad, el pos-despacho y la administración de las transacciones comerciales del Mercado Mayorista.

2.4.2.2 Plan de Expansión de Generación

El Ministerio, a través de un órgano técnico especializado, con participación de las instituciones que intervienen en el mercado eléctrico nacional incluyendo la CNEE es el encargado de elaborar el Plan de Expansión Indicativo del Sistema de Generación, utilizando criterios de eficiencia económica y de garantía de suministro. Éste se elabora cada dos años y cubre un horizonte de estudio mínimo de diez años. Para su elaboración debe contar con la asesoría técnica del AMM, la cual consistirá en realizar los estudios técnicos y proporcionar la información necesaria para analizar el comportamiento del Mercado Mayorista y del Sistema Nacional Interconectado.

El Plan es elaborado y presentado a la CNEE y al AMM quienes podrán formular sus observaciones y recomendaciones, según sea el caso, y es el Órgano Técnico especializado el encargado de evaluar si éstas son aceptadas o rechazadas debiendo en este último caso sustentar sus argumentos mediante estudios técnicos y económicos especializados. Es el Ministerio el encargado de resolver la procedencia o improcedencia del Plan de Expansión del Sistema de Generación.

En caso de necesidad, el Ministerio, con la opinión previa del AMM y la CNEE, puede declarar en situación de emergencia al SNI, para garantizar la seguridad y el suministro de electricidad.

2.4.2.3 Operación y coordinación del Administrador del Mercado Mayorista

2.4.2.3.1 Despacho económico y cálculo de precios

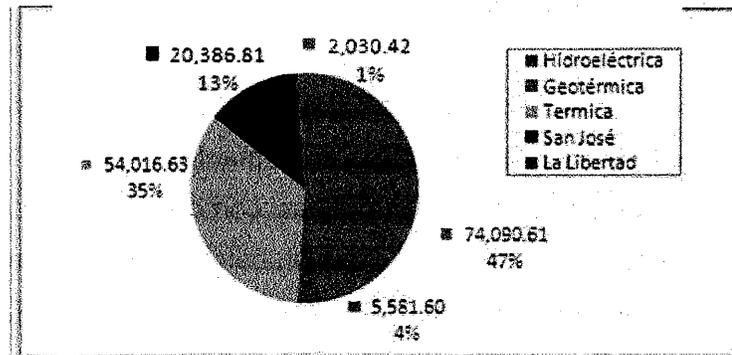
El Despacho consiste en determinar el programa de carga de la oferta disponible que permita abastecer la demanda prevista para el Mercado Mayorista en un período de tiempo determinado, minimizando el costo total de operación.

El Despacho debe considerar como demanda a cubrir la correspondiente a los Participantes Consumidores y como oferta a despachar la correspondiente a los Participantes Productores. El Despacho debe considerar la existencia de demanda interrumpible y el costo de restricciones al suministro representado por las Máquinas de Falla.

Todas las plantas generadoras deben enviar semanalmente a la CNEE y el AMM su potencia disponible y su existencia de combustible. Así, con los datos disponibles, el AMM puede realizar el análisis de costos, proyecciones y cálculos de precios.

En la siguiente gráfica se ilustra la generación por fuente primaria de energía y corresponde a la semana del 19 al 25 de julio del 2009. Los datos están dados en MWh.

Figura 7. Generación por fuente primaria de energía



Fuente: Administrador del Mercado Mayorista. Publicación en amm.gob.gt el 9-8-09

En esta gráfica puede observarse claramente que la generación de las hidroeléctricas es ampliamente predominante, seguido por las plantas térmicas y en menor medida las geotérmicas.

El costo total de la operación de generación del Mercado Mayorista está integrado por la suma de:

- a. Sus costos variables
- b. Los costos por energía no suministrada
- c. Los sobrecostos por compra mínima de energía obligada en los contratos existentes.

2.4.2.3.1.1 Costos variables de generación

Los costos variables asociados a la operación de las unidades generadoras, térmicas o hidroeléctricas, se refieren al nodo de la respectiva central; mientras que los asociados a las importaciones se refieren al nodo de la respectiva interconexión.

El AMM calcula el costo variable de cada unidad generadora que esté disponible en el Mercado Mayorista, conforme a lo establecido en el Reglamento y en las Normas de Coordinación, de la siguiente manera:

- a. Para cada unidad térmica, los costos deben estar asociados al combustible, al costo de operación y mantenimiento, al costo de arranque y parada de las máquinas, así como a su eficiencia.
- b. Para cada central hidroeléctrica con embalse de regulación anual, el costo variable será el valor del agua que calcule el AMM y como mínimo será el costo de operación y mantenimiento. Para el resto de centrales hidroeléctricas el costo variable será igual a sus respectivos costos de operación y mantenimiento.
- c. Para generadoras basadas en recursos renovables no hidráulicas, el costo variable será como mínimo sus respectivos costos de operación y mantenimiento.
- d. Para cada bloque de importación de electricidad, el costo variable será el valor calculado según la metodología informada por el Importador dependiendo de las tecnologías de generación.

2.4.2.3.2 Coordinación de la operación comercial

El AMM es el encargado de realizar la coordinación de la operación del Mercado Mayorista, la que comprende la Programación de Despacho de Carga a Largo y Corto Plazo, la operación en tiempo real y el pos-Despacho de acuerdo a los principios y metodología de las Normas de Coordinación.

2.4.2.3.2.1 Modelos para la simulación de la operación comercial

Los modelos para la simulación y optimización de la operación a largo plazo, semanal y para el Despacho diario, deben representar adecuadamente la demanda y la oferta del parque de generación, la red de transporte, las interconexiones, las restricciones operativas, los requerimientos de calidad y de servicios complementarios, utilizando como criterio minimizar el costo total de operación. Los modelos y sus modificaciones pueden ser auditados por la CNEE.

2.4.2.3.2.2 Objetivos de la Programación de Largo Plazo

Los objetivos de la Programación de Largo Plazo pueden resumirse de la siguiente manera:

- a. Realizar una programación indicativa de los resultados probables de la operación del Mercado Mayorista, optimizando el uso de los recursos energéticos en función de hipótesis de cálculo para las variables aleatorias.
- b. Detectar y cuantificar los riesgos de vertimiento en centrales hidroeléctricas y riesgos de desabastecimiento.
- c. Determinar la necesidad de servicios complementarios, realizando estudios técnico económicos para cuantificar los márgenes de reserva.
- d. Calcular los costos mayoristas previstos para el traslado a las tarifas para cada Agente Distribuidor.

2.4.2.3.2.3 Coordinación de la operación en tiempo real

El AMM es el encargado de realizar la coordinación de la operación en tiempo real del Sistema Nacional Interconectado y de las interconexiones internacionales, integrando los servicios complementarios necesarios con el objetivo de mantener el balance entre generación y demanda, así como preservar la seguridad y continuidad del servicio.

2.4.2.4 Administración de las transacciones en el Mercado Mayorista

El Distribuidor, Gran Usuario y Exportador están obligados a abrir la totalidad de su Demanda Firme mediante contratos de potencia que estén respaldados plenamente con Oferta Firme Eficiente.

En los casos en que exista comercialización de Demanda, el Comercializador que asuma las responsabilidades del Gran Usuario deberá cubrir en todo momento la Demanda Firme de cada uno de sus clientes, al momento de no poder cubrirla en su totalidad puede comprar potencia mediante transacciones de desvío de potencia.

2.4.2.4.1 Desvíos de potencia

El Participante Productor que resulta en un mes con un desvío de potencia negativo, establecido como la diferencia entre su Oferta Firme Disponible total y la potencia total comprometida en los contratos en que vende potencia dicho Participante, debe comprar el faltante mediante transacciones de desvío de potencia.

2.4.2.4.2 Precios y costos a trasladar a tarifas de distribución

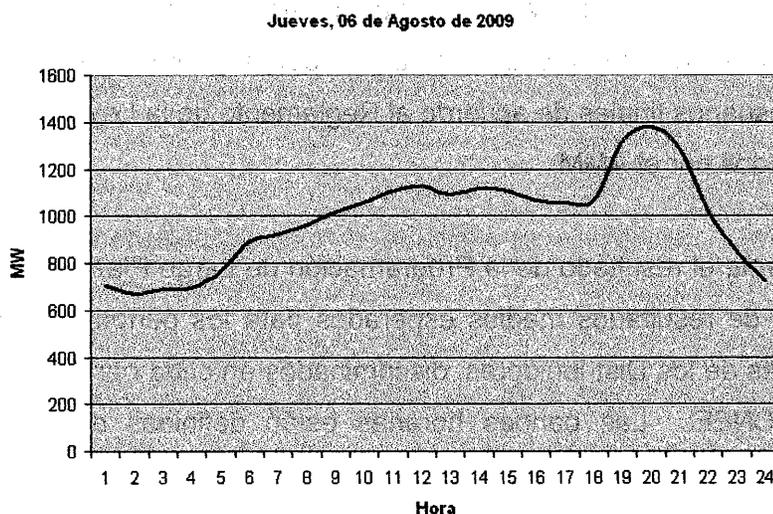
Los costos asociados a los contratos existentes y a los contratos de potencia que se realicen mediante licitación abierta, serán trasladados a las tarifas de usuarios finales de acuerdo al Reglamento de la Ley. Estos costos son calculados por el AMM.

Mediante el resultado de la Programación de Largo Plazo se obtiene la proyección de resultados medios esperados para los períodos de vigencia de las tarifas de los Distribuidores, discriminados en cada banda horaria que defina la CNEE. Las bandas horarias están definidas de la siguiente manera:

- a. **Banda de punto:** período de máxima demanda -18 a 22 horas-.
- b. **Banda intermedia:** período de demanda media -6 a 18 horas-.
- c. **Banda de valle:** período de demanda mínima -22 a 6 horas-.

En la gráfica siguiente se muestra la curva horaria típica, donde puede observarse los puntos máximos y mínimos de la demanda diaria. En esta gráfica se puede constatar que el período de máxima demanda se encuentra entre las 18 y las 22 horas, mientras que el mínimo consumo se da entre las 22 y las 6 horas. Un consumo medio se observa entre las 6 y las 18 horas. Esta curva corresponde al día 6 de agosto del año 2009, pero la tendencia de la curva es similar para todos los días del año, sin mucha variación en cada mes.

Figura 8. Curva horaria de demanda de energía eléctrica



Fuente: Administrador del Mercado Mayorista. Publicación en amm.gob.gt el 9-8-09

Para el traslado de los costos y precios de energía y potencia a las tarifas de los usuarios, el AMM debe elaborar el informe de costos mayoristas en las bandas horarias definidas. Además de elaborar el costo de la compra mayorista de energía debe adicionar los siguientes costos:

- a. Servicios Complementarios que no correspondan a reserva de potencia;
- b. Sobre costos por generación forzada;
- c. El cargo por pérdidas como participante consumidor más los cargos por pérdidas al comprar en el nodo central;
- d. Los cargos por peaje;
- e. La cuota por Administración y Operación y toda cuota a pagar al AMM por su administración.

Dados estos costos el AMM debe elevar a la CNEE el informe de costos mayoristas y conjuntamente elaboran las tarifas que rigen y regulan el mercado energético en Guatemala.

3. GENERACIÓN Y DEMANDA DE ENERGÍA Y POTENCIA ELÉCTRICA EN GUATEMALA

3.1 Historia de la electrificación en Guatemala

La generación de energía eléctrica en Guatemala, se inicia en 1884 al instalarse la primera hidroeléctrica, la cual se edificó en la finca El Zapote, al norte de la capital. Al año siguiente se forma la Empresa Eléctrica del Sur por empresarios alemanes que instalaron la hidroeléctrica Palín de 732 KW., la cual brindó servicio a los departamentos de Guatemala, Sacatepéquez y Escuintla.

En 1927 se construye la hidroeléctrica Santa María, con el fin de proveer de energía al Ferrocarril de los Altos. Cuando este medio de transporte desapareció, las autoridades de gobierno decidieron que la planta fuera orientada a cubrir la demanda de los departamentos de Quetzaltenango, Totonicapán, Sololá y Suchitepéquez. En 1940 se creó el Departamento de Electrificación Nacional, dependencia del Ministerio de Comunicaciones y Obras Públicas, convirtiéndose dicha planta en la Hidroeléctrica del Estado.

A mediados de la década de los cincuenta se inició la construcción en Zacapa de la Hidroeléctrica Río Hondo y posteriormente, el 27 de mayo de 1959, fue creado el **Instituto Nacional de Electrificación -INDE-**.

Durante la década de los años 30 fueron construidas las hidroeléctricas de Patzún en Chimaltenango y la de Patulul en Suchitepéquez. Dentro de los bienes iniciales del INDE pueden mencionarse las hidroeléctrica Santa María y la de Río Hondo que se encontraba en construcción. Esta planta fue puesta en operación en 1962 con una capacidad de 2400 KW.

Debido al crecimiento de la demanda de energía eléctrica y para atender los planes de electrificación, en 1965 fue puesta en operación la Central Diesel de San Felipe, Retalhuleu, con una capacidad de 2440 KW. Seis años más tarde fue instalada una turbina de gas en la finca Mauricio, en Escuintla, con una capacidad de 12,500 KW. En ese mismo período el INDE amplió la capacidad de la planta Santa María a 6,880 KW.

A principios de la década de los setenta se instaló la Hidroeléctrica Jurún Marinalá y en 1982 inició operaciones la Hidroeléctrica de Aguacapa. Un año más tarde, en 1983, la Hidroeléctrica de Chixoy se constituyó en la más grande del país, cubriendo gran parte de la creciente demanda.

En 1992 inician sus operaciones varias generadoras privadas, entre ellas: Los Ingenios Azucareros, ENRON en Puerto Quetzal y posteriormente las plantas SIDEGUA, LAGOTEX, Secacao, Río Bobos, TAMPA, *Guatemala Generating Group (GGG)*, Las Palmas, Generadora del Norte (GENOR), Calderas, Zunil, Poliwatt, Pasabién, Poza Verde, Tululá, Cerro Vivo, Las Vacas y Matanzas.

La capacidad instalada a nivel nacional en la actualidad es de 1,705.6 MW, entre generadores privados e INDE.

3.2 Generación de energía eléctrica en Guatemala

El Sistema Eléctrico de Guatemala está compuesto por tres componentes, la Generación, que constituye la oferta eléctrica; el Transporte, que son las líneas que se encargan de transportar la energía eléctrica; la Distribución, que conforma la demanda de energía.

El Sistema de Generación está conformado por centrales hidroeléctricas, turbinas de vapor, turbinas de gas, motores de combustión interna y centrales geotérmicas.

El Sistema de Transporte está conformado por el Sistema Principal y el Sistema Secundario. El Sistema Principal se encuentra compartido por los Generadores y las interconexiones a otros países, es decir importaciones y exportaciones. El sistema Principal opera básicamente en tres niveles de voltaje: 230, 138 y 69 kV. El Sistema Secundario es el medio de interconexión de un generador a la red principal.

3.2.1 Fuentes de energía en Guatemala

Guatemala es un país que cuenta con una gran cantidad de recursos naturales de tipo renovable, los cuales tienen un gran potencial energético. La fuente energética de mayor demanda en el país es la leña; se estima que la cobertura forestal del país alcanza los 37.000 km², o sea, un 34% de la superficie nacional, con una tasa de deforestación de 2,1% anual.

En Guatemala se utiliza la biomasa en diversas formas, tal es el caso de la leña, bagazo de caña, biodigestión y otras. En el consumo nacional de energía la leña constituye el 63% del consumo final. Le sigue en importancia el diesel con el 12%; las gasolinas representan el 8%; seguidamente están el *fuel oil* y la electricidad con el 4% respectivamente y finalmente el bagazo de caña y el gas licuado de petróleo (gas propano) con el 3%.

El alto consumo de leña obedece a que la mayor parte de la población vive en el área rural, siendo en su mayoría de escasos recursos económicos, lo que les impide tener acceso y disponibilidad a otras fuentes energéticas. Además existe una tradición cultural que se refleja en los hábitos alimenticios como la utilización de la estufa denominada "Tres Piedras" para cocinar, las ollas de barro adecuadas para este fuego abierto, el sabor de los alimentos y la relativa disponibilidad del recurso.

La leña como combustible es utilizada en forma ineficiente, por cuanto el 81% de los hogares que la consumen, utilizan la estufa de "Tres Piedras", la cual desaprovecha casi el 90% de la energía consumida. Cabe mencionar en este punto que en los poblados con bajas temperaturas el calor que desaprovecha este tipo de estufa es aprovechado para mantener una temperatura confortable en el interior de las viviendas.

En materia de biodigestión anaeróbica se han construido alrededor de 800 biodigestores tipo familiar en el área rural, pero éstos no han sido operados correctamente y se ha aprovechado los beneficios del bioabono más que los propiamente energéticos. La mayoría de estos biodigestores son de tipo chino. La única fuente biomásica que se ha utilizado para la producción de energía eléctrica en Guatemala ha sido el bagazo de caña de azúcar.

Guatemala depende en un 80% de la energía eléctrica que le provee el sector público, el Instituto Guatemalteco de Electrificación -INDE- y la Empresa Eléctrica de Guatemala S.A. -EEGSA-. El sector privado colabora con el restante 20%.

3.2.1.1 Fuentes de energía por tecnología

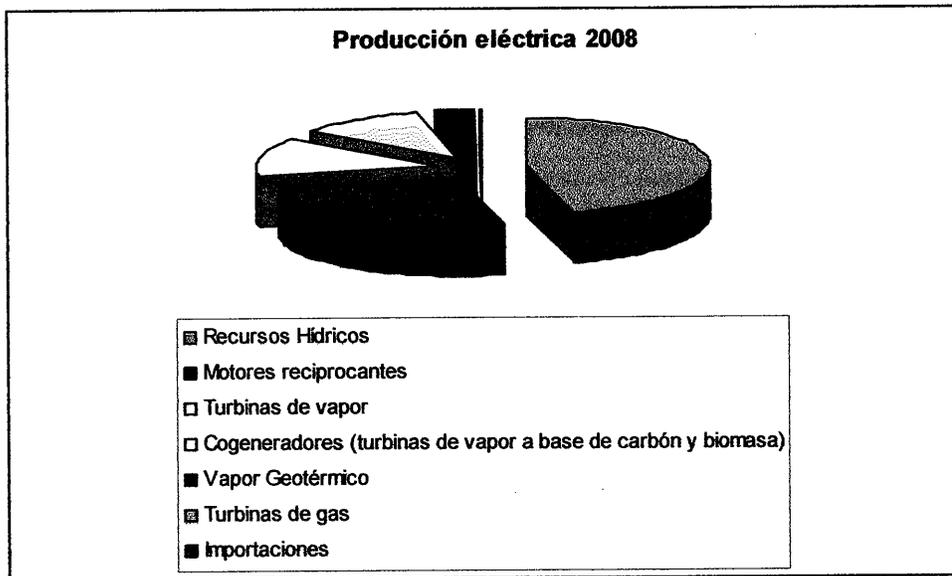
En Guatemala la energía puede ser producida por diversas tecnologías dependiendo del combustible a partir del cual se genera la misma. Pueden ser fuentes de energía renovable, no renovable, así como por importaciones.

En la siguiente gráfica puede observarse tanto una tabla, como su representación gráfica, de la producción e importación de energía por cada tecnología disponible en el mercado. Esta información corresponde al año 2008 y es publicada por el Administrador del Mercado Mayorista. En la tabla se presenta la información en GW-hora, con su respectivo porcentaje de participación en el mercado.

Tabla III. Producción de energía eléctrica en 2008

Producción de energía eléctrica 2008	GW-hora	%
Recursos Hídricos	3624.77	45.7
Motores reciprocantes	2082.37	26.3
Turbinas de vapor	1058.13	13.4
Cogeneradores (turbinas de vapor a base de carbón y biomasa)	865.15	10.9
Vapor Geotérmico	271.98	3.4
Turbinas de gas	14.96	0.2
Importaciones	4.71	0.1
TOTAL	7922.07	100.0

Figura 9. Gráfica de producción de energía eléctrica en 2008



3.2.1.2 Energía renovable y no renovable disponible en el mercado energético de Guatemala

En el mercado energético guatemalteco existe una gran diversidad de plantas generadoras, las cuales cubren la creciente demanda energética según sea su capacidad. Según sea el combustible utilizado para su generación las plantas son de energía renovable, si su combustible es un recurso natural renovable, o no renovable, si su combustible es de carácter no renovable.

En la siguiente tabla se enumera la información de las plantas de energía no renovable que actualmente ofertan en el Sistema Nacional Interconectado. En la tabla se incluye la capacidad de generación de cada planta, su tecnología y el combustible que consume en la generación de dicha energía. El motor CI se refiere a los motores de combustión interna.

Tabla IV. Plantas de recursos no renovables en Guatemala

No.	Planta	Potencia MW	Tecnología	Combustible	Observación
1	San José	132.40	Turbina Vapor	Carbón	-----
2	Tampa	78.10	Turbina Gas	Diesel	-----
3	S & S	23.70	Turbina Gas	Diesel	-----
4	Esc Gas 5	14.90	Turbina Gas	Diesel	-----
5	Arizona	155.70	Motor CI	Búnker	-----
6	Poliwatt	125.50	Motor CI	Búnker	-----
7	PQP	114.60	Motor CI	Búnker	-----
8	Las Palmas	66.40	Motor CI	Búnker	-----
9	Genor	41.40	Motor CI	Búnker	-----
10	Sidegua	38.00	Motor CI	Búnker	-----
11	Textiles	15.00	Motor CI	Búnker	-----
12	Progreso	51.00	Motor CI	Búnker	-----
13	Amatex	18.20	Motor CI	Búnker	-----
14	Electrogeneración	15.50	Motor CI	Búnker	-----
15	GECSA	15.00	Motor CI	Búnker	-----
16	Madre Tierra	15.90	Turbina Vapor	Búnker	Época de no zafra
17	Santa Ana	21.80	Turbina Vapor	Búnker	Época de no zafra
18	Concepción	21.30	Turbina Vapor	Búnker	Época de no zafra
19	La Unión	22.90	Turbina Vapor	Búnker	Época de no zafra
20	Magdalena	21.50	Turbina Vapor	Búnker	Época de no zafra
21	Pantaleón	24.60	Turbina Vapor	Búnker	Época de no zafra
TOTAL		1033.40			

En la tabla siguiente se detallan todas las plantas de energía renovable en el Sistema Nacional Interconectado del mercado energético guatemalteco. Al igual que en la tabla anterior, se incluye su capacidad de generación, su tecnología y el combustible que utilizan para su generación.

Tabla V. Plantas de recursos renovables en Guatemala

No.	Planta	Potencia MW	Tecnología	Combustible	Observación
1	Madre Tierra	19.27	Turbina Vapor	Bagazo	Época de Zafra
2	Santa Ana	27.83	Turbina Vapor	Bagazo	Época de Zafra
3	Concepción	24.20	Turbina Vapor	Bagazo	Época de Zafra
4	La Unión	29.80	Turbina Vapor	Bagazo	Época de Zafra
5	Magdalena	36.60	Turbina Vapor	Bagazo	Época de Zafra
6	Pantaleón	42.90	Turbina Vapor	Bagazo	Época de Zafra
7	Tululá	9.95	Turbina Vapor	Bagazo	Época de Zafra
8	Trinidad	7.20	Turbina Vapor	Bagazo	Época de Zafra
9	Calderas	2.70	Turbina Vapor	Geotermia	-----
10	Zunil	18.00	Turbina Vapor	Geotermia	-----
11	Ortillán	18.00	Turbina Vapor	Geotermia	-----
12	Chixoy	272.00	Hidroeléctrica	Agua	-----
13	Aguacapa	80.10	Hidroeléctrica	Agua	-----
14	Jurún Marinalá	60.00	Hidroeléctrica	Agua	-----
15	Los Esclavos	14.00	Hidroeléctrica	Agua	-----
16	Renace	60.00	Hidroeléctrica	Agua	-----
17	Canadá	47.40	Hidroeléctrica	Agua	-----
18	Las Vacas	39.00	Hidroeléctrica	Agua	-----
19	Pasabien	12.00	Hidroeléctrica	Agua	-----
20	Matanzas	11.70	Hidroeléctrica	Agua	-----
21	Montecristo	13.60	Hidroeléctrica	Agua	-----
22	El Recreo	26.00	Hidroeléctrica	Agua	-----
23	Río Bobos	10.00	Hidroeléctrica	Agua	-----
24	Secacao	16.30	Hidroeléctrica	Agua	-----
25	Poza Verde	9.60	Hidroeléctrica	Agua	-----
26	El Salto	2.00	Hidroeléctrica	Agua	-----
27	San Isidro	4.00	Hidroeléctrica	Agua	-----
28	Palín II	5.00	Hidroeléctrica	Agua	-----
29	Candelaria	5.00	Hidroeléctrica	Agua	-----
TOTAL		924.15			

3.2.1.2.1 Energía renovable

3.2.1.2.1.1 Centrales termoeléctricas

Una central termoeléctrica es una instalación empleada para la generación de energía eléctrica a partir de calor. Este calor puede obtenerse tanto de combustibles fósiles (petróleo, gas natural o carbón) como de la fisión nuclear del uranio u otro combustible nuclear. Asimismo este calor puede obtenerse de fuentes renovables, como la biomasa. Comúnmente la biomasa se utiliza en época de zafra, cuando puede utilizarse como combustible el bagazo de caña.

3.2.1.2.1.1.1 Turbina de vapor

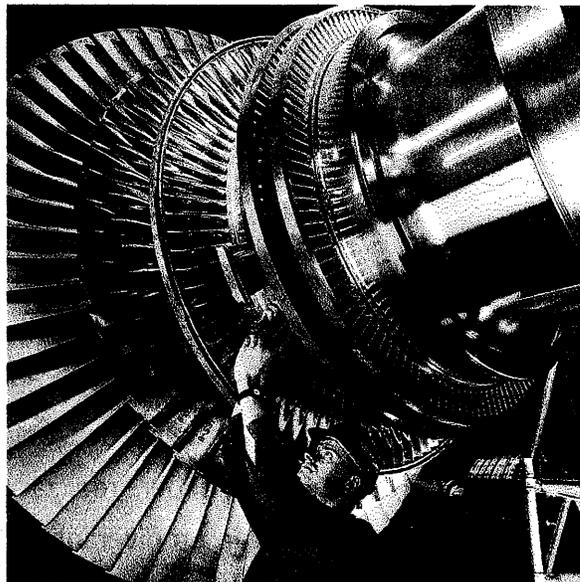
Una turbina de vapor es una turbomáquina motora, que transforma la energía de un flujo de vapor en energía mecánica a través de un intercambio de cantidad de movimiento entre el fluido de trabajo, es decir el vapor y el rodete, órgano principal de la turbina, que cuenta con palas o álabes los cuales tienen una forma particular para poder realizar el intercambio energético. Las turbinas de vapor se utilizan en diversos ciclos de potencia que utilicen un fluido que pueda cambiar de fase, entre éstos el más común es el Ciclo *Rankine*, el cual genera el vapor en una caldera de la cual dicho vapor sale en unas condiciones de elevada temperatura y presión. En la turbina se transforma la energía interna del vapor en energía mecánica que, típicamente, es aprovechada por un generador para producir electricidad.

En una turbina se pueden distinguir dos partes, el rotor y el estator. El rotor está formado por ruedas de álabes unidas al eje y que constituyen la parte móvil de la turbina. El estator también está formado por álabes, no unidos al eje sino a la carcasa de la turbina.

El término turbina de vapor es muy utilizado para referirse a una máquina motora la cual cuenta con un conjunto de turbinas para transformar la energía del vapor, también al conjunto del rodete y los álabes directores.

En la siguiente figura se muestra una turbina de vapor fabricada en Alemania por la empresa Siemens.

Figura 10. Turbina de Vapor



Fuente: Cristian Kuhna. Turbinas de Vapor, Wikipedia. 2005

Las turbinas de vapor existen en una gran variedad de tamaños, desde unidades de 1 hp (0.75 KW) usadas para accionar bombas, compresores y otro equipo accionado por flecha, hasta turbinas de 2,000,000 hp (1,500,000 KW) utilizadas para generar electricidad. Hay diversas clasificaciones para las turbinas de vapor modernas y por ser turbomáquinas son susceptibles a los mismos criterios de clasificación de éstas. Por otro lado, es común clasificarlas de acuerdo a su grado de reacción.

- Las turbinas de acción son aquellas en que el cambio o salto entálpico o expansión es realizada en los álabes directores o las toberas de inyección si se trata de la primera etapa de un conjunto de turbinas, estos elementos están sujetos al estator. En el paso del vapor por el rotor la presión se mantendrá constante y habrá una reducción de la velocidad.
- Las turbinas de reacción son aquellas en que la expansión, es decir, el salto entálpico del vapor puede realizarse tanto en el rotor como en el estator, cuando este salto ocurre únicamente en el rotor la turbina se conoce como de reacción pura.

En las plantas de generación de potencia eléctrica se utilizan comúnmente las turbinas condensadoras. Estas turbinas expelen vapor en estado parcialmente saturado, generalmente con calidad mayor al 90%, a una presión bastante inferior a la atmosférica hacia un condensador.

Las turbinas de recalentamiento también son usadas casi exclusivamente en plantas de potencia eléctrica. En una turbina de recalentamiento el flujo de vapor sale de una sección a alta presión de la turbina y es regresado a la caldera donde se le vuelve a sobrecalentar. El vapor entonces regresa a una sección de presión intermedia de la turbina y continúa su expansión.

El proceso fundamental de funcionamiento de las centrales termoeléctricas está basado en la conversión de energía térmica en energía mecánica y a partir de ésta en energía eléctrica. La conversión de energía térmica en energía mecánica se produce a través del uso de un fluido que produce un trabajo en su proceso de expansión en las turbinas térmicas. La conversión de la energía mecánica en eléctrica se efectúa a través del accionamiento mecánico de un generador eléctrico acoplado al eje de la turbina.

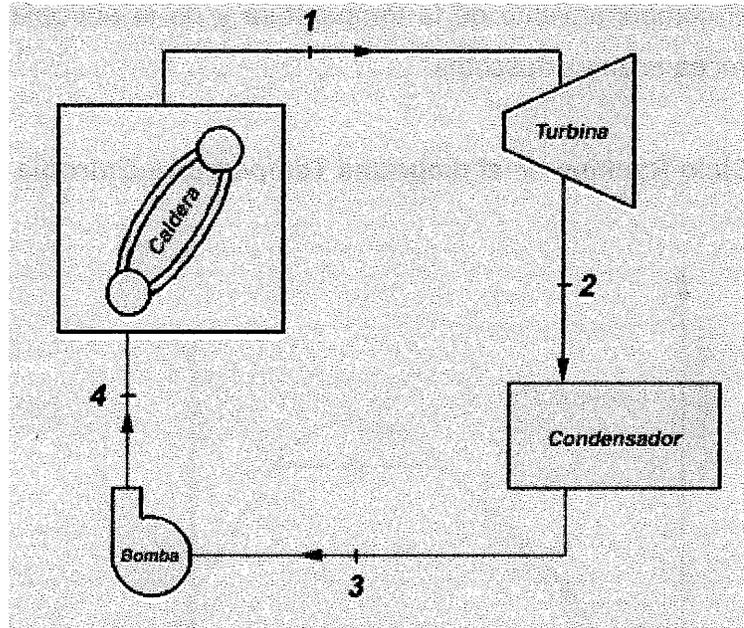
La conversión de energía térmica puede producirse por la transformación de energía química de algún combustible a través del proceso de combustión. Asimismo puede producirse de forma nuclear, mediante la fisión del núcleo de combustibles radiactivos.

Las turbinas de vapor se emplean principalmente en las centrales de generación de energía eléctrica, cuyos componentes principales son:

- La caldera, cuya su función es la de generar el vapor necesario para el funcionamiento de la turbina.
- La turbina, que es la encargada de utilizar la energía del vapor de la caldera y transformarla en trabajo útil para mover un generador eléctrico.
- El condensador, que se emplea para condensar el vapor que sale de la turbina.
- La bomba, usada para alimentar la caldera con el agua que proviene del condensador.

En la siguiente figura se ilustran los procedimientos básicos que conforman el funcionamiento de una turbina de vapor utilizada en la generación eléctrica. A grandes rasgos éste es el funcionamiento básico de una central termoeléctrica. En termodinámica se conoce como ciclo Rankine ideal.

Figura 11. Componentes básicos de una central termoeléctrica

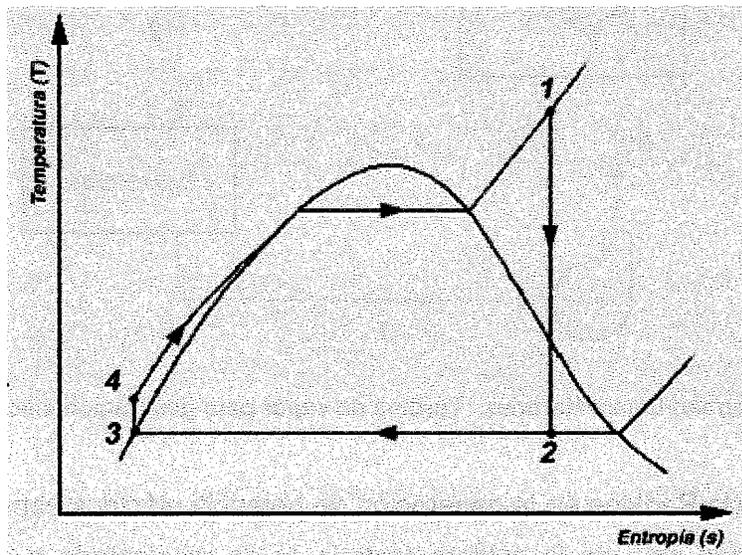


Fuente: Germán López Martínez. Turbina de vapor para generación eléctrica. Pág. 1

El ciclo Rankine en la generación de potencia eléctrica consiste en que el vapor que sale de la caldera (estado 1) es recalentado a una presión relativamente alta, éste es conducido a través de una tubería hasta la turbina que recibe este vapor y produce una expansión isentrópica, permitiendo de esta forma mover su rotor y así producir el trabajo necesario para mover el generador. El vapor sale de la turbina (estado 2), en condiciones húmedas a presión baja; pasa al condensador donde se transforma en líquido saturado (estado 3), en un proceso de extracción de calor que se realiza a presión constante; allí el agua es tomada por la bomba y con un trabajo de bombeo se aumenta la presión, en un proceso de compresión isentrópica hasta el estado líquido subenfriado (estado 4) donde se alcanza la presión de trabajo de la caldera; en ésta se adiciona calor transformando el líquido en vapor recalentado a través de un proceso a presión constante, obteniéndose nuevamente el vapor necesario para alimentar la turbina (estado 1).

A continuación se muestra la gráfica Temperatura-Entropía, utilizada en termodinámica para describir el ciclo de Rankine ideal, en donde puede observarse el comportamiento de la temperatura y de la entropía en cada uno de los procesos antes descritos.

Figura 12. Ciclo Rankine en el diagrama Temperatura-Entropía



Fuente: Germán López Martínez. Turbina de vapor para generación eléctrica. Pág.1

En algunos ciclos se acostumbra extraer vapor de la turbina en partes intermedias, para recalentarlo y volverle a permitir que se expanda hasta la presión final, éste proceso se llama ciclo Rankine con recalentamiento, el cual permite obtener un mayor trabajo de la turbina.

Las centrales termoeléctricas pueden ser clasificadas de acuerdo con el método de combustión utilizado. Las centrales de combustión externa son aquellas donde el combustible no entra en contacto con el fluido de trabajo. La combustión externa es un proceso usado principalmente en las centrales térmicas a vapor donde el combustible calienta el fluido de trabajo, en general agua, en una caldera hasta producir vapor que luego se expande en una turbina donde producirá trabajo mecánico.

Las centrales de combustión interna son aquellas donde la combustión se efectúa sobre la mezcla de aire y combustible, siendo el fluido del trabajo el conjunto de productos de combustión. Este proceso de combustión interna se produce en las turbinas a gas y en las unidades térmicas de movimiento alternativo, a pistón, como los motores ciclo Otto o Diesel.

Los combustibles usualmente aplicados en las centrales a vapor son, carbón mineral, biomasa, como la madera, bagazo de caña, basura, etc., además los derivados pesados del petróleo (*fuel oil*, residuo asfáltico, etc.), y gas natural. En las turbinas de gas se utiliza gas natural y derivados intermedios de petróleo como el diesel *oil* y el gas *oil*.

La biomasa constituye un combustible renovable muy importante ya que puede ser originado por plantaciones dirigidas a ese objetivo. La biomasa fue por mucho tiempo constituida por leña, fuente tradicional de energía hasta el siglo XIX, cuando cedió rápidamente posiciones ante el carbón, que luego dio paso al petróleo y al gas. El petróleo se constituyó como la fuente principal de energía hacia mediados del siglo XX. Asimismo la biomasa es aprovechada energéticamente, además de la leña, a través del uso del etanol, bagazo de caña y carbón vegetal.

3.2.1.2.1.2 Centrales geotérmicas

En las plantas geotérmicas, como su nombre lo indica, se utiliza energía geotérmica para la generación de potencia eléctrica. Esta energía puede ser obtenida por el hombre mediante el aprovechamiento del calor del interior de la Tierra. El calor del interior de la Tierra se debe a varios factores, entre los que se puede destacar el gradiente geotérmico y el calor radiogénico. Existen tres tipos de vapor geotérmico que puede utilizarse para generar potencia eléctrica:

- vapor seco
- flash
- binario

En las plantas a vapor seco se toma el vapor de las fracturas en el suelo y se pasa directamente por una turbina, para mover un generador. En las plantas flash se obtiene agua muy caliente, generalmente a más de 200 °C, y se separa la fase vapor en separadores vapor/agua, moviéndose así una turbina con el vapor. En las plantas binarias, el agua caliente fluye a través de intercambiadores de calor, haciendo hervir un fluido orgánico que luego hace girar la turbina. El vapor condensado y el fluido remanente geotérmico de los tres tipos de plantas se inyecta nuevamente en la roca caliente para hacer más vapor. El calor de la tierra es considerado como una fuente de energía sostenible, siendo una fuente tan vasta solo puede extraerse una fracción, por lo que en el futuro este tipo de combustible para la generación eléctrica puede tomar una gran relevancia para suplir las necesidades de energía mundial.

3.2.1.2.1.3 Hidroeléctricas

Una central hidroeléctrica es aquella que se utiliza para la generación de energía eléctrica mediante el aprovechamiento de la energía potencial del agua embalsada en una presa situada a más alto nivel que la central. El agua se lleva por una tubería de descarga a la sala de máquinas de la central, donde mediante enormes turbinas hidráulicas se produce la electricidad en alternadores. Las dos características principales de una central hidroeléctrica, desde el punto de vista de su capacidad de generación de electricidad son:

- La potencia, que es función del desnivel existente entre el nivel medio del embalse y el nivel medio de las aguas debajo de la central y del caudal máximo turbinable, además de las características de la turbina y del generador.
- La energía garantizada en un lapso determinado, generalmente un año, que está en función del volumen útil del embalse, de la pluviometría anual y de la potencia instalada.

La potencia de una central hidroeléctrica puede variar desde unos pocos MW, hasta varios GW. Hasta 10 MW se consideran minicentrales. En China se encuentra la mayor central hidroeléctrica del mundo (la Presa de las Tres Gargantas), con una potencia instalada de 22,500 MW. La segunda es la Represa de Itaipú (que pertenece a Brasil y Paraguay), con una potencia instalada de 14,000 MW en 20 turbinas de 700 MW cada una.

Esta forma de energía posee problemas medioambientales al necesitar la construcción de grandes embalses para contener el agua, la que es sustraída de otros usos, como su utilización urbana en algunas ocasiones.

Actualmente se encuentra en desarrollo la explotación comercial de la conversión en electricidad del potencial energético que tiene el oleaje del mar, en las llamadas centrales mareomotrices. Éstas utilizan el flujo y reflujo de las mareas. En general pueden ser útiles en zonas costeras donde la amplitud de la marea sea amplia y las condiciones morfológicas de la costa permitan la construcción de una presa que corte la entrada y salida de la marea en una bahía. Se genera energía tanto en el momento del llenado como en el momento del vaciado de la bahía.

En Guatemala, siendo un país con muchos recursos hídricos, las hidroeléctricas constituyen una fuente importante de potencia eléctrica. Reflejo de esto es que la planta generadora más grande del país es la hidroeléctrica de Chixoy, que tiene una capacidad de generación de 272 MW. Bajo estas circunstancias existen diversas hidroeléctricas en el país que suministran un importante porcentaje de energía. Las centrales hidroeléctricas pueden tener o no un embalse de agua, si no lo tienen se denominan 'centrales a filo de agua', ya que al no tener embalse utilizan la energía potencial de los ríos.

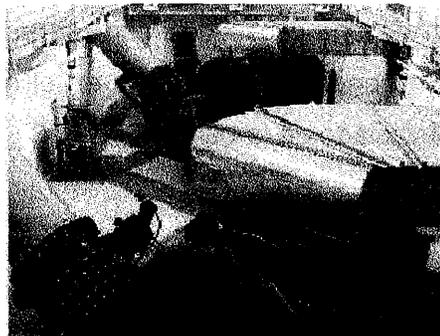
3.2.1.2.1.3.1 Hidroeléctrica Palín II

Esta central se localiza en el municipio de Palín, departamento de Escuintla, la cual fue puesta en operación en el año 2005 y es una central a filo de agua. Consta de dos unidades tipo Francis de eje horizontal, con una capacidad activa instalada de 2.9 MW por unidad.

Su caída neta de diseño es de 81.7 m, con un caudal de diseño de 4 m³/seg por unidad.

En la siguiente figura se muestra parte de esta hidroeléctrica.

Figura 13. Hidroeléctrica Palín II



Fuente: deGuate.com. Sistema de energía eléctrica en Guatemala. Publicación 23-1-08

3.2.1.2.1.3.2 Hidroeléctrica Santa María

Esta central se ubica en el municipio de Zunil, departamento de Quetzaltenango y fue puesta en servicio en 1927. Ésta es considerada de regulación diaria, con un embalse de 215,500 m³ como volumen útil, conduciéndose el agua hacia la casa de máquinas a través de una tubería de presión de 0.614 Km de longitud.

La casa de máquinas cuenta con tres unidades generadoras de diferente capacidad instalada; la unidad No. 1 con 2.48 MW, las unidades Nos. 2 y 3 con 2.2 MW. El salto o caída que utiliza esta central es de 101 m, con un caudal de turbinamiento de 2.35 m³/seg para la unidad No. 1 y No. 2 y 2.42 m³/seg para la unidad No. 3.

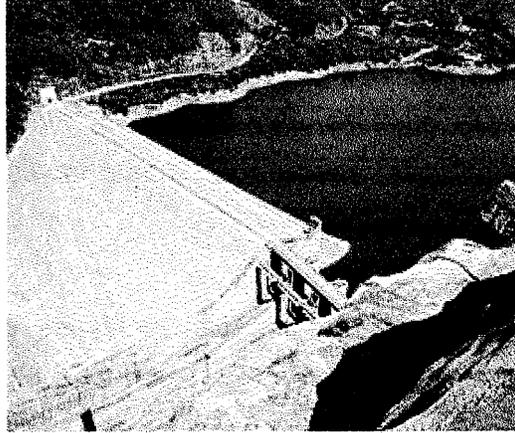
Figura 14. Casa de máquinas de la hidroeléctrica Santa María



Fuente: deGuate.com. Sistema de energía eléctrica en Guatemala. Publicación 23-1-08

En la anterior fotografía puede observarse una panorámica de la casa de máquinas de esta hidroeléctrica y en la siguiente se muestra el embalse de la misma.

Figura 15. Embalse de la hidroeléctrica Santa María



Fuente: deGuate.com. Sistema de energía eléctrica en Guatemala. Publicación 23-1-08

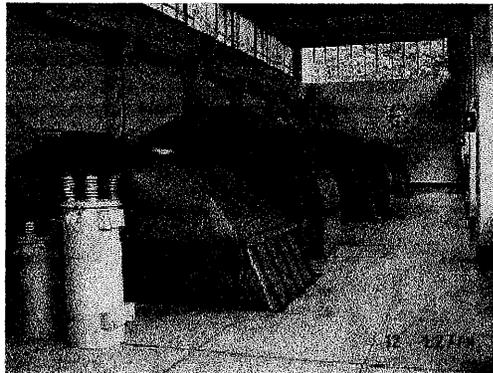
3.2.1.2.1.3.3 Hidroeléctrica Jurún Marinalá

Esta central se encuentra ubicada en la aldea Agua Blanca, interior de la finca el Salto, departamento de Escuintla, está clasificada como una central de regulación diaria. Cuenta con tres unidades generadoras tipo Pelton de eje horizontal, con una capacidad de 20 MW por unidad.

El embalse de regulación posee un volumen total de 112,000 m³ de agua, misma que se trasladada a través de un túnel de presión de 4.03 Km y una tubería de presión de 2.44 Km a la casa de máquinas, utilizando 660 m como caída bruta de diseño para lograr la capacidad de generación con un caudal de 4 m³/seg por unidad.

A continuación se presenta una sección de la casa de máquinas de esta hidroeléctrica.

Figura 16. Sección de la casa de máquinas de hidroeléctrica Jurún Marinalá



Fuente: deGuate.com. Sistema de energía eléctrica en Guatemala. Publicación 23-1-08

3.2.1.2.1.3.4 Hidroeléctrica Aguacapa

Esta central se encuentra ubicada en el departamento de Escuintla, clasificada como una central de regulación diaria. Cuenta con tres unidades generadoras tipo Pelton de eje horizontal, con una capacidad de 30 MW cada una.

Posee un embalse con capacidad de 300,000 m³, de agua, la cual es transportada a través de un túnel de presión de 12.04 Km y de una tubería forzada de 3.65 Km, hasta llegar a la casa de máquinas.

Cuenta con una chimenea de equilibrio para disipar presiones excesivas por golpe de ariete en la tubería de presión. La caída neta de diseño de la central es de 490.6 metros y su caudal de diseño de 7.33 m³/seg por unidad.

A continuación se muestra una fotografía que ilustra la hidroeléctrica de Aguacapa.

Figura 17. Hidroeléctrica de Aguacapa



Fuente: deGuate.com. Sistema de energía eléctrica en Guatemala. Publicación 23-1-08

3.2.1.2.1.3.5 Hidroeléctrica Chixoy

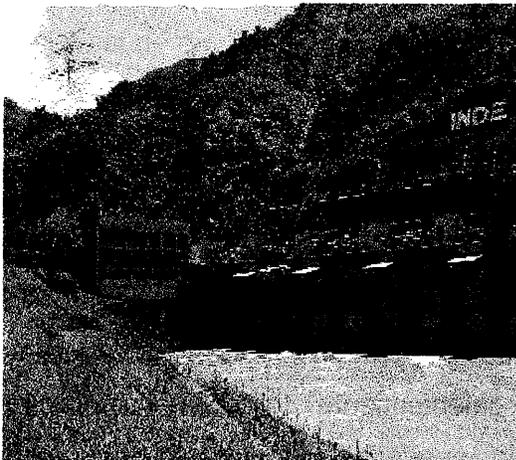
Esta central se encuentra ubicada en la aldea Quixal, municipio San Cristóbal, Departamento de Alta Verapaz. Cuenta con cinco unidades generadoras, con una capacidad máxima de 55 MW cada una.

Posee un embalse de regulación anual, con una capacidad de 460 millones de m³ de agua que a través de un tramo de túnel de aducción de 26 Km lleva el agua para su turbinamiento a la casa de máquinas.

Esta central utiliza una caída neta de diseño de 433 metros y un caudal de diseño por unidad de 15 m³/seg.

En la figura siguiente se muestra una sección de esta hidroeléctrica, que se constituye como la más grande de Guatemala.

Figura 18. Hidroeléctrica de Chixoy



Fuente: deGuate.com. Sistema de energía eléctrica en Guatemala. Publicación 23-1-08

3.2.1.2.2 Energía no renovable

Las plantas generadoras no renovables son aquellas cuyas fuentes de generación las constituyen combustible de índole no renovable, tal es el caso del carbón, los derivados del petróleo y el gas natural. Existen diversos tipos de plantas generadoras que funcionan a base de este tipo de combustibles.

3.2.1.2.2.1 Centrales termoeléctricas

3.2.1.2.2.1.1 Turbina de vapor

Las plantas termoeléctricas con tecnología a base de turbinas de vapor son predominantemente de carácter renovable en época de zafra, ya que utilizan como combustible el bagazo de caña. Empero algunas turbinas son accionadas por combustibles de carácter no renovable fuera de la época de zafra. Tal es el caso de las turbinas que funcionan con derivados pesados del petróleo como el fuel oil, residuo asfáltico y el búnker.

El principio de funcionamiento de las turbinas de vapor a base de combustibles no renovables es el mismo que las que utilizan energía renovable. La combustión genera un trabajo en las turbinas y así se genera energía mecánica, que al accionar un generador convierte esta energía mecánica en energía eléctrica.

Una de las desventajas de las centrales térmicas que funciona a base de estos combustibles, denominados combustibles fósiles, es que liberan a la atmósfera dióxido de carbono (CO_2), considerado el principal gas responsable del calentamiento global. También, dependiendo del combustible utilizado, pueden emitir otros contaminantes como óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, partículas sólidas como el polvo y cantidades variables de residuos sólidos.

3.2.1.2.2.1.2 Turbina de gas

En las centrales termoeléctricas denominadas de ciclo combinado se usan los gases de la combustión del gas natural para mover una turbina de gas. En una cámara de combustión se quema el gas natural y se inyecta aire para acelerar la velocidad de los gases y mover la turbina de gas. Como, tras pasar por la turbina, esos gases todavía se encuentran a alta temperatura (500°C), se reutilizan para generar vapor que mueve una turbina de vapor. Cada una de estas turbinas impulsa un alternador, como en una central termoeléctrica común. El vapor luego es enfriado por medio de un caudal de agua abierto o torre de refrigeración. Además se puede obtener la cogeneración en este tipo de plantas al alternar entre la generación por medio de gas natural y carbón. Este tipo de plantas está en capacidad de producir energía más allá de la limitación de uno de los dos insumos y pueden dar un paso a la utilización de fuentes de energía por combustibles diferentes.

Tanto el gas natural como el petróleo están considerados fuentes de energía no renovable debido al enorme tiempo que se requiere para su reposición en la naturaleza.

Los gases que salen a la atmósfera luego de haberse expandido en la turbina de gas todavía tienen una energía importante. Si éstos son aprovechados, a través de un intercambiador de calor, puede obtenerse lo que comúnmente se conoce como Ciclo Combinado.

3.2.1.2.2.2 Motores de combustión interna

A una máquina que mueve un generador de energía eléctrica a través de un motor de combustión interna se le llama un grupo electrógeno. Éste es comúnmente utilizado cuando hay déficit en la generación de energía de algún lugar, o cuando hay corte en el suministro eléctrico y es necesario mantener la actividad. Una de sus utilidades más comunes es en aquellos lugares donde no hay suministro a través de la red eléctrica, generalmente son zonas agrícolas con pocas infraestructuras o viviendas aisladas. Otro caso es en locales de pública concurrencia, hospitales, fábricas, etc., que a falta de energía eléctrica de red, necesiten de otra fuente de energía alterna para abastecerse en caso de emergencia. Un grupo electrógeno consta de las siguientes partes:

- Motor de combustión interna, es el que acciona el grupo electrógeno. Suele estar diseñado específicamente para ejecutar dicha labor. Su potencia depende de las características del generador. Pueden ser motores de gasolina o diésel.
- Sistema de refrigeración, este sistema suele ser problemático, por tratarse de un motor estático, y puede ser refrigerado por medio de agua, aceite o aire.

- Alternador, es en donde se produce la energía eléctrica de salida. Se encuentra protegido contra salpicaduras, autoexcitado, autorregulado y sin escobillas, acoplado con precisión al motor. El tamaño del alternador y sus prestaciones son muy variables en función de la cantidad de energía que tienen que generar.
- Depósito de combustible y bancada, que es donde se encuentran montados y acoplados el motor y el alternador. Esta bancada de acero incluye un depósito de combustible con una capacidad mínima de funcionamiento a plena carga según las especificaciones técnicas que tenga el grupo en su autonomía.
- Sistema de control, cuya función, como su nombre lo indica, es la de controlar el funcionamiento, salida del grupo y la protección contra posibles fallos en el funcionamiento.
- Interruptor automático de salida, que se utiliza para proteger al alternador, y se encuentra adecuado para el modelo y régimen de salida del grupo electrógeno.
- Regulación del motor, es un dispositivo mecánico diseñado para mantener una velocidad constante del motor con relación a los requisitos de carga. La velocidad del motor está directamente relacionada con la frecuencia de salida del alternador, por lo que cualquier variación de la velocidad del motor afectará a la frecuencia de la potencia de salida.

La generación de potencia eléctrica por combustión interna tiene la desventaja de emitir gases nocivos para el medio ambiente. Esto se debe a que su principio de funcionamiento se basa en la degradación de combustibles derivados del petróleo, como la gasolina o el diesel, emitiendo gases tóxicos.

En términos generales un motor de combustión interna es un tipo de máquina que obtiene energía mecánica directamente de la energía química producida por un combustible que arde dentro de una cámara de combustión. Esta cámara de combustión constituye la parte principal de un motor. Se emplean motores de combustión interna de cuatro tipos:

1. El motor de explosión ciclo Otto, cuyo nombre proviene del técnico alemán que lo inventó, Nikolaus August Otto, es el motor convencional de gasolina que se emplea en automoción y aeronáutica.
2. El motor diésel, llamado así en honor del ingeniero alemán nacido en Francia Rudolf Diesel, funciona con un principio diferente y suele consumir gasóleo. Se emplea en instalaciones generadoras de energía eléctrica, en sistemas de propulsión naval, en camiones, autobuses y automóviles. Tanto los motores Otto como los diésel se fabrican en modelos de dos y cuatro tiempos.
3. El motor rotatorio.
4. La turbina de combustión.

Los motores Otto y los diésel tienen los mismos elementos principales. Ambos cuentan con una cámara de combustión, la cual es un cilindro, por lo general fijo, cerrado en un extremo y dentro del cual se desliza un pistón muy ajustado al cilindro. La posición hacia dentro y hacia fuera del pistón modifica el volumen que existe entre la cara interior del pistón y las paredes de la cámara. La cara exterior del pistón está unida por un eje al cigüeñal, que convierte en movimiento rotatorio el movimiento lineal del pistón.

El sistema de alimentación de combustible consta de un depósito, una bomba de combustible y un dispositivo, carburador, que vaporiza o atomiza el combustible líquido para poder ser quemado. También puede usarse una bomba de inyección para este fin.

3.2.2 Costos de generación en las plantas eléctricas

Las plantas generadoras de energía eléctrica deben realizar análisis y estudios para determinar sus costos de generación y proyectar así los precios de la energía y la potencia a licitar. Para iniciar la generación eléctrica la generadora debe tomar en cuenta los siguientes costos:

- Capital de construcción, que es el costo de inversión inicial, incluyendo los costos de diseño y construcción de la planta, dependiendo de su tecnología.
- Costos de operación y mantenimiento, son los costos que incluyen los pagos de la planilla de salarios, mano de obra de operarios y técnicos, insumos y en general los gastos relativamente constantes en que incurre la generadora para mantener sus máquinas funcionando, tanto en mantenimiento preventivo y correctivo.
- Costos variables de operación y mantenimiento, constituidos por los insumos que pueden variar de precio como los aceites, lubricantes y químicos utilizados en el correcto funcionamiento de la maquinaria, motores y generadores.
- Costos de combustibles, se refiere al costo del combustible de generación.
- En las plantas no renovables se debe tomar en cuenta el costo de control por el impacto de la emisión de dióxido de carbono CO₂.

Las plantas de energía renovable deben tomar en cuenta un costo variable por la disponibilidad de su combustible ya que no se cuenta con un recurso renovable todo el tiempo y se debe prever en los estudios técnicos previos. Por ejemplo, las hidroeléctricas manejan costos diferentes en su combustible en época seca y en época lluviosa; la biomasa se encuentra disponible únicamente en época de zafra y el viento depende de las condiciones atmosféricas que producen las corrientes de aire.

Las plantas de energía no renovable deben tomar en cuenta las posibles fluctuaciones en los precios de sus combustibles, por ejemplo en el caso de los derivados del petróleo y el gas natural, el carbón y el búnker. Estos combustibles se encuentran relativamente disponibles todo el tiempo pero dependiendo del mercado así es el precio al cual se cotizan.

En términos generales, se presentan a continuación los costos aproximados de generación de algunas generadoras con distintas tecnologías. Estos costos fueron determinados en un estudio de costos de generación elaborado en Inglaterra por *The Royal Academy of Engineering*; estos resultados son aplicables a cualquier generadora de la misma tecnología, en cualquier parte del mundo, ya que la tecnología básica es la misma. Los costos están dados en US\$/KWh.

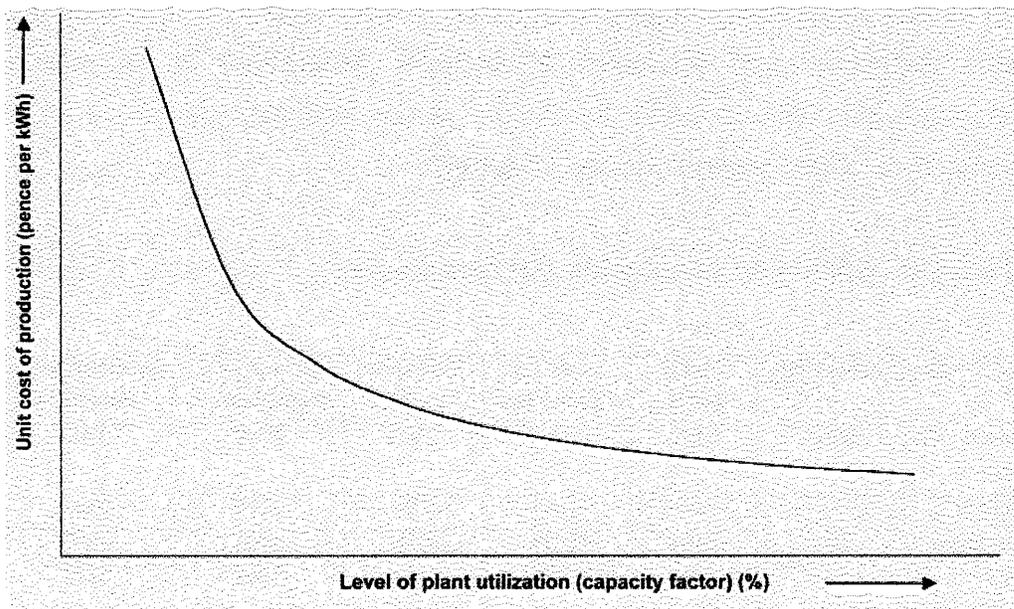
Tabla VI. Costos de generación por tecnología

Tecnología	Combustible	Capital Inicial	Costo del Combustible	Emisiones de CO ₂	Operación y Mantenimiento	Funcionamiento del equipo
Turbina de Vapor	Carbón	0.015	0.018	0.013	0.003	0.005
Biomasa	-----	0.044	0.014	0.00	0.021	0.032
Gas natural	Gas	0.006	0.033	0.008	0.006	0.002
Ciclo Combinado de Gas	Gas	0.006	0.024	0.006	0.002	0.003
Nuclear	Uranio	0.024	0.006	0.00	0.007	0.001
Eólicas	Viento	0.038	0.00	0.00	0.007	0.007

Estos precios fueron convertidos a US\$/KWh, ya que el estudio está en p/KWh, donde p representa peniques que equivale a un céntimo de libra esterlina.

En la siguiente figura se ilustra una gráfica que relaciona el porcentaje de utilización de una planta generadora y su costo de producción, en ella puede observarse que a medida que la planta genera más potencia, menores son los costos de producción. Esto comprueba que a medida que se utilizan los recursos con mayor eficiencia los costos disminuyen notablemente.

Figura 19. Efecto de la utilización de planta en el costo de generación



Fuente: *The Royal Academy of Engineering. The Cost of Generating Electricity.*

Pág. 12

3.2.2.1 Cálculo de costos de plantas generadoras

Los cálculos para determinar los costos de una planta generadora, con el fin de proyectar su rentabilidad, se determinan a partir de la siguiente fórmula:

$$\text{Anualidad de la inversión} = \text{Inversión} * \text{factor de anualidad}$$

- La anualidad de la inversión **-A.I.-** se refiere al costo inicial de la inversión pagado anualmente tomando en cuenta la tasa de interés vigente en el mercado;
- La inversión **-I-** es el monto total a invertir;
- El factor de anualidad **-f.a.-** corresponde a los intereses a pagar, calculados según el monto a invertir.

El factor de anualidad está dado por:

$$f.a. = \frac{i * (1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

Donde *i* es la tasa de interés y *n* el número de años en los cuales se pagará el préstamo de la inversión inicial.

3.2.2.1.1 Fórmula para el cálculo de costo de energía eléctrica

Los costos de producción de energía eléctrica se calculan a partir de:

$$P_E = \text{Costo Fijo} + \text{Costo Variable} = \text{costo total en } \frac{US\$}{MW_h}$$

$$P_E = \frac{AI}{8760h \times P \times f.p.} + \frac{p_c}{\eta \times pcc}$$

En donde:

- **P**, es la potencia a instalar dada en MW, ésta variable es determinada por las necesidades energéticas de la demanda;
- **f.p.**, es el factor de planta, determinado por la planta generadora y se refiere al porcentaje del tiempo en el cual la planta deberá trabajar al total de su capacidad durante el año;

- p_c , se refiere al precio del combustible en \$/(TM, BBL, kg, m3) según sea el caso, este precio es determinado por los precios variables del mercado mundial;
- h , constituye la eficiencia de la planta, siendo un dato de diseño para proyectar la rentabilidad del proyecto;
- pcc , es el poder calorífico del combustible según sea el caso.

Se debe tener presente que las plantas renovables representan únicamente costos fijos, mientras que las no renovables presentan también costos variables.

3.2.2.1.2 Ejemplos de cálculos de costos de generación

Con la finalidad de expresar más claramente lo expuesto en los anteriores incisos, a continuación se presentan tres ejemplos de cálculo de costos para la ejecución de distintos proyectos de implementación de generadoras de distintas tecnologías. Para los cálculos se asumen valores típicos en la eficiencia según tecnología, precio del combustible, factor de planta y costos variables en el mercado.

3.2.2.1.2.1 Ejemplo hidroeléctrica

Se asume la planificación de una planta de generación hidroeléctrica de embalse con capacidad de 200 MW de potencia, una tasa de interés del 9 % anual a un plazo de 25 años; se asume un factor de planta de 0.45.

Solución

$$f.a. = \frac{0.09 \cdot (1+0.09)^{25}}{(1+0.09)^{25} - 1}$$

$$f.a. = 0.101806$$

El costo aproximado por cada MW instalado en una hidroeléctrica es de US\$ 2.5 millones, por lo que la inversión inicial es de US\$ 500,000,000.00.

$$A.I. = I * f.a.$$

$$A.I. = (500 * 10^6) * 0.101806$$

$$A.I. = \text{US\$ } 50,903,000.00$$

$$P_E = \frac{A.I.}{8760 * 200 \text{ MW} * 0.45}$$

$$P_E = 64.56 \text{ US\$/MWh}$$

El precio de la energía es de 64.56 US\$/MWh, para esta hidroeléctrica.

3.2.2.1.2.2 Ejemplo turbina de vapor, combustible carbón

Se planifica una planta generadora con tecnología a base de turbinas de vapor y combustible carbón. Se requiere una potencia de 100 MW, con un préstamo bancario a una tasa del 10 % anual a un plazo de 15 años. Se debe presentar el proyecto por lo que se requiere determinar el precio de la energía. El factor de planta estimado es de 0.90. El precio del MW de potencia instalado para una generadora de turbina de vapor es de US\$ 1,800,000.

Solución

$$f.a. = \frac{0.10 * (1.10)^{15}}{(1.10)^{15} - 1}$$

$$f.a. = 0.13147$$

El costo de la potencia en una generadora de turbina de vapor a base de carbón es de:

$$I = 100 \text{ MW} * (1,800,000 \text{ US\$})$$

$$I = \text{US\$ } 180,000,000$$

$$A.I. = I * f.a.$$

$$A.I. = \text{US\$ } 23,664,600$$

La eficiencia de la planta es del 40 %, el precio del combustible es de 50 US\$/ton. Se asume un poder calorífico del carbón de 3.31 MWh/ton. Como es una planta de energía no renovable se debe tomar en cuenta el precio del combustible, entonces el precio de la energía se calcula a partir de:

$$P_E = \frac{A.I.}{8760 * P * f.p.} + \frac{P_C}{n * P_{CC}}$$

$$P_E = 67.78 \text{ US\$/MWh}$$

El precio de la energía para esta planta de turbina de vapor, cuyo combustible es el carbón, es de 67.78 US\$/MWh.

3.2.2.1.2.3 Ejemplo turbina de vapor, combustible biomasa

Se realiza un estudio de factibilidad para la construcción de una planta generadora de turbinas de vapor y se desea calcular el precio de la energía en época de zafra, ya que el combustible planificado para esa época es la caña (biomasa). La capacidad de la planta debe ser de 100 MW. El costo de la potencia instalada para una planta de turbina de vapor es de 2 millones de US\$/MW. Se obtiene un financiamiento a una tasa de interés anual del 10 % a un plazo de 15 años.

Solución

$$f.a. = \frac{0.10 \cdot (1+0.10)^{15}}{(1+0.10)^{15}-1}$$

$$f.a. = 0.13147$$

$$I = (2,000,000 \text{ US\$}) \cdot (100 \text{ MW})$$

$$I = \text{US\$ } 200,000,000$$

$$A.I. = I \cdot f.a.$$

$$A.I. = \text{US\$ } 26,294,000$$

El precio de la biomasa es despreciable, ya que se trata de una fuente de energía renovable, asimismo ésta se encuentra disponible únicamente durante la época de zafra por lo que su factor de planta es de 0.50, es decir que la zafra se encuentra disponible el 50% del año.

$$P_E = \frac{A.I.}{8760 \cdot P \cdot f.p.}$$

$$P_E = 60.03 \text{ US\$/MWh}$$

El precio de la energía para esta planta que utiliza combustible biomásico es de 60.03 US\$/MWh.

En la siguiente tabla se muestran los datos de los tres ejemplos anteriores, así como sus resultados. Los valores utilizados son típicos y proyectan el costo de la energía según la tecnología de generación, por lo que los precios de la energía obtenidos son también típicos y aplicables a proyectos reales de plantas generadoras.

Tabla VII. Precios de energía de tres tipos de plantas generadoras

Ejemplo	1	2	3
Tecnología de la planta	Hidroeléctrica	Turbina de vapor (carbón)	Turbina de vapor (biomasa)
Potencia MW	200	100	100
Factor de planta	0.45	0.90	0.50
Costo por MW instalado de energía Millones US\$	2.5	1.8	2
Total inversión inicial Millones US\$	500	180	200
Tasa interés Anual	9 %	10 %	10 %
Plazo Años	25	15	15
Eficiencia (Plantas no renovables)	_____	40 %	_____
Precio del combustible (Plantas no renovables)	_____	50 US\$/Ton	_____
Poder calorífico del combustible (Plantas no renovables)	_____	3.31 MWh/Ton	_____
Precio de la energía US\$/MWh	64.56	67.78	60.03

3.3 Otras fuentes de generación de energía eléctrica

Existen otras fuentes de generación eléctrica que en Guatemala aún no han sido explotadas dado que utilizan tecnologías aún no disponibles o muy incipientes en el país. Con el fin de proteger el medio ambiente el ser humano a desarrollado formas de generar energía y potencia eléctrica de formas que no contaminen, utilizando fuentes energéticas de índole renovable y no contaminante, tal es el caso de la energía solar, eólica y una mejor utilización de los recursos hídricos.

En Guatemala está iniciando la implementación de tecnologías que aprovechan la enorme energía solar, o la energía del viento.

En el campo de la ingeniería es vital mantener una continua retroalimentación de los avances en el mundo de estas nuevas formas de generación energética, ya que éstas constituyen el futuro, un futuro en el cual es imperativo disminuir la emisión de gases tóxicos y la ineficiente utilización del agua.

Por esta razón, a continuación se realiza una breve descripción de plantas generadoras de energía que en países más desarrollados se encuentran en su apogeo, pero que en el medio centroamericano se están empezando a implementar, tal es el caso de la energía solar y la eólica, o que aún no se han implementado por la complejidad de sus operaciones, tal es el caso de la energía nuclear.

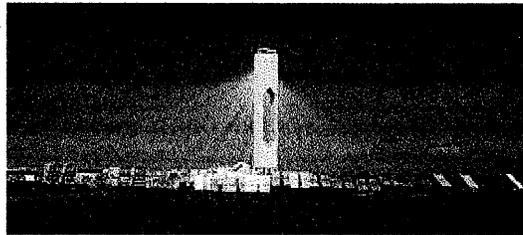
3.3.1 Centrales térmicas solares

Una central térmica solar o central termosolar es una instalación industrial en la que, a partir del calentamiento de un fluido mediante radiación solar y su uso en un ciclo termodinámico convencional, se produce la potencia necesaria para mover un alternador para generación de energía eléctrica como en una central térmica clásica.

En este tipo de generadoras es necesario concentrar la radiación solar para que se puedan alcanzar temperaturas elevadas, de 300 °C hasta 1000 °C y obtener así un rendimiento aceptable en el ciclo termodinámico, que no se podría obtener con temperaturas más bajas. La captación y concentración de los rayos solares se hacen por medio de espejos con orientación automática que apuntan a una torre central donde se calienta el fluido, o con mecanismos más pequeños de geometría parabólica. El conjunto de la superficie reflectante y su dispositivo de orientación se denomina heliostato. Su principal problema medioambiental es la necesidad de grandes extensiones de territorio que dejan de ser útiles para otros usos, como los agrícolas o forestales.

En la siguiente fotografía puede observarse una central termosolar ubicada en Sevilla, España, país en el cual se ha desarrollado notablemente la generación eléctrica de manera más limpia y menos perjudicial para el medio ambiente.

Figura 20. Central termosolar en Sevilla, España



Fuente: Wikipedia. Generación de energía eléctrica. 16-8-2009

3.3.2 Generación de energía por tecnología eólica

La energía eólica es la que se obtiene del viento, es decir de la energía cinética generada por efecto de las corrientes de aire o de las vibraciones que dicho viento produce.

Los molinos de viento se han usado desde hace muchos siglos para moler el grano, bombear agua u otras tareas que requieren una energía. En la actualidad se usan aerogeneradores para generar electricidad, especialmente en áreas expuestas a vientos frecuentes como zonas costeras, alturas montañosas o islas. La energía del viento está relacionada con el movimiento de las masas de aire que se desplazan de áreas de alta presión atmosférica hacia áreas adyacentes de baja presión, con velocidades proporcionales al gradiente de presión.

El impacto medioambiental de este sistema de obtención de energía es relativamente bajo. Puede mencionarse el impacto estético, la muerte de aves por choque con las aspas de los molinos o la necesidad de extensiones grandes de territorio. Además este tipo de energía está condicionada por las condiciones climatológicas, siendo aleatoria la disponibilidad de las mismas.

3.4 Demanda energética en Guatemala

En los últimos años la demanda energética en Guatemala ha crecido de forma significativa por lo que se vaticina una posible crisis energética derivada del crecimiento de la demanda de este servicio en el país, que estaría a merced de un colapso, de no haber inversión en la materia y de no concretarse la compra del insumo a otra nación.

Existen varios proyectos de compra de energía, tal es el caso del proyecto de interconexión con México, contrato firmado recientemente, que daría la opción de compra de aproximadamente 120 MW, medida que podría paliar la crisis de demanda energética. Es de suma importancia tomar medidas a mediano y largo plazo para evitar posibles racionamientos en el futuro. En las horas pico, cuando la demanda llega a su máximo valor de electricidad, se acopla al sistema de electrificación del país una central generadora de energía, la cual es una turbina conocida como “reserva rápida” ubicada en el departamento de Escuintla.

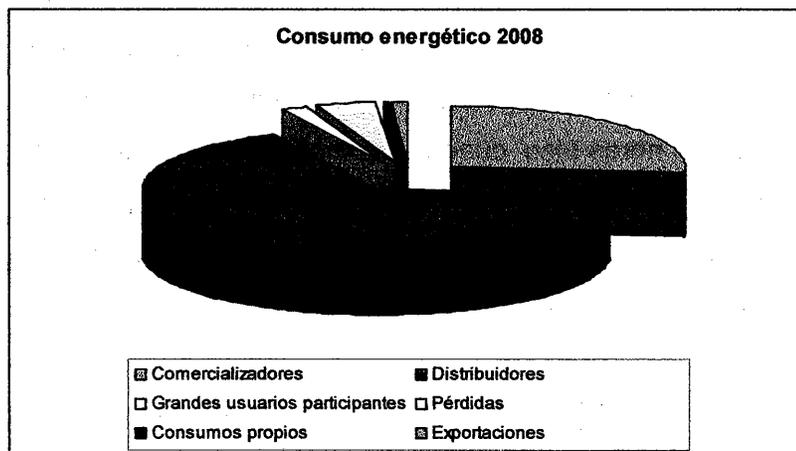
La demanda del servicio en el país, en los últimos cinco años, ha superado en 247% el ritmo de crecimiento de la generación de fluido eléctrico y disminuye a niveles riesgosos la denominada reserva técnica o la capacidad de entregar más electricidad en las horas pico. Esto quiere decir que la demanda está superando por mucho a la oferta, lo que en una situación de mercado económico desemboca en un encarecimiento de los precios.

En la siguiente tabla se muestra el consumo de energía total durante el año 2008 por consumidor, así como su respectiva gráfica. Los comercializadores se refieren a los Grandes Usuarios que compran por medio de comercializadores.

Tabla VIII. Composición por tipo de consumo de energía

Tipo de consumo	Consumo de energía en GWh	%
Distribuidores	5260.76	66.4
Comercializadores	2080.28	26.3
Pérdidas	313.85	4.0
Grandes Usuarios	147.14	1.8
Exportaciones	76.04	1.0
Consumos propios	43.99	0.5
TOTAL	7922.06	100.0

Figura 21. Gráfica de consumo de energía en 2008



Estudios han revelado que la pérdida de interés de los inversionistas comenzó aproximadamente en el año 2000, cuando la oferta de energía dejó de crecer a la velocidad que aumentaba la demanda. Esto se debe también la crisis económica mundial, el acelerado crecimiento de China y la quiebra de Enron, entre otros aspectos.

El acuerdo firmado con México, que es un contrato de compra-venta de energía eléctrica, entre el INDE y la Comisión Federal de Electrificación - CFE- brinda la opción a adquirir los antes mencionados 120 MW de potencia firme, con posible ampliación a 200 MW, ya que la CFE cuenta con excedentes suficientes para cubrir dicha potencia. Asimismo este contrato permitirá a la CFE adquirir energía del mercado eléctrico guatemalteco en caso de ser necesario por alguna contingencia o necesidad. La firma de este contrato es de suma importancia para ambas naciones ya que el intercambio de energía entre Guatemala y México es uno de los proyectos más importantes del Plan Puebla Panamá.

Esta interconexión facilitará las transacciones de energía y marca el inicio de la integración del Sistema Eléctrico Mexicano con el Mercado Eléctrico Centroamericano. Este proyecto de interconexión consiste en la construcción de una línea de transmisión de energía eléctrica de 200 KV y 103 Km, de los cuales 32 Km se ubican del lado mexicano y 71 Km del lado guatemalteco y la expansión de dos subestaciones, una en Tapachula, México y la otra en Los Brillantes, Retalhuleu, Guatemala. La ampliación de la subestación Los Brillantes fue licitada por el INDE y la CFE ganó dicha licitación.

La compra de energía proveniente de México servirá para aumentar la oferta energética en Guatemala con el fin de estabilizar los precios e incrementar la confiabilidad del sistema de transmisión eléctrico guatemalteco en cuanto a calidad, estabilidad y seguridad.

El proyecto energético guatemalteco avanza para satisfacer las demandas del mercado a un precio competitivo. Dado que el crecimiento de la demanda eléctrica se espera en un 8.06 % Guatemala tiene que aumentar su capacidad instalada, para suplir dicho crecimiento, por lo que se necesita de al menos una capacidad de 1000 MW adicionales para el año 2011.

Para satisfacer la creciente demanda se han desarrollado además planes de expansión, los cuales tienen como objeto incrementar la oferta.

3.4.1 Plan de Expansión del Sistema de Transporte 2008-2018

El Plan de Expansión del Sistema de Transporte se basa en desarrollar la red de transmisión con una topología anillada o mallada, con la finalidad que el mismo cumpla con el criterio de seguridad operativa N-1, lo que significa que si se pierde un elemento de la red puede continuar operando con su desempeño normal. En la actualidad el SNI presenta una topología radial, siendo vulnerable ante la pérdida de uno de sus elementos.

En la tabla siguiente se enumeran a grandes rasgos las obras del Plan de Expansión del Sistema de Transporte 2008-2019, así como la división de sus respectivos anillos.

Tabla IX. Obras del Plan de Expansión del Sistema de Transporte

Anillo	Ubicación Geográfica	Km. De líneas aprox.	No. Subestaciones, ampliaciones y refuerzos	Costo Estimado (millones de US\$)
Metropacífico	Región Central y Sur	144	17	119.10
Hidráulico	Región Noroccidental	464.3	8	108.70
Atlántico	Región Nororiental	585	4	115.80
Oriental	Región Suroriental	55	4	16.70
Occidental	Región Suroccidental	146	7	61.70
Otras obras	Interconexión Guatemala - México			73.00
TOTAL		1394.40	40	495.00

3.4.2 Plan de Expansión Indicativo del Sistema de Generación 2008-2022

El Plan de Expansión Indicativo del Sistema de Generación tiene como objeto estimar cual es la expansión óptima del sistema considerando restricciones o condiciones tales como costos de inversión, costos de operación, combustibles y entrada mínima y máxima en operación de las distintas centrales eléctricas.

En la siguiente tabla se muestra el promedio de los tres escenarios de demanda (bajo, medio y alto) de la capacidad a instalar en el período 2008-2022 y el costo promedio de inversión en valores presentes referidos al año 2008.

Tabla X. Capacidad y costos promedio a instalar en el período 2008-2022

Tipo	MW	%	Costo Promedio de Inversión (millones US\$)
Renovables	1608	59	3,365.00
No Renovables	850	31	
Interconexión Guatemala-México	200	7	
Total	2658	98	

El costo marginal de la demanda promedio de los tres escenarios de demanda tiende a reducirse y estabilizarse en el largo plazo, únicamente existe una variación de la época seca y lluviosa; en la época seca es de US\$ 95 / MWh y en la época lluviosa de US\$ 85 / MWh.

Para la elaboración del Plan se tomó en cuenta la información técnica y comercial que cada generadora proyectó por medio de sus análisis internos.

Los costos de inversión de las plantas son estimados a valores presentes sobre la base de estudios publicados por organismos internacionales para cada tecnología empleada.

El Plan incluye la construcción de plantas generadoras para incrementar la oferta. Éstas son tanto de carácter no renovable como renovable. Algunas están en fase de construcción o de estudio para su ingreso al sistema generador del país. A continuación se muestran las plantas de recursos no renovables, así como sus costos aproximados proyectados en millones de US\$ y el combustible utilizado en la generación.

Tabla XI. Plantas termoeléctricas candidatas de recursos no renovables

No.	Termoeléctrica	Potencia MW	Inicio de operaciones	Costo de Inversión aproximado (Millones US\$)	Tecnología	Situación actual
1	Motor-Amatitlán	25	2008-2009	20	Motor CI	En Construcción
2	Comb. Base-Villa nueva	22	2008-2009	26	Turbina de Vapor	En Construcción
3	Motor-Chimaltenango	35	2008-2009	28	Motor CI	En Construcción
4	Ingenio-Costa Sur	50	2008-2009	60	Turbina de Vapor	En Construcción
5	Ciclo Combinado Búnker	4.5	2008-2009	15	Turbina de Vapor	En Operación
6	Comb. Base-Sta. Rosa	75	2010-2011	120	Turbina de Vapor	En Construcc.

7	Comb. Base CNEE-126-2007	275	2012-2013	600	Turbina de Vapor	Candidata
8	Motor I	120	2010-2022	100	Motor CI	Candidata
9	Comb. Base I	200	2014-2022	300	Turbina de Vapor	Candidata
10	Comb. Base II	200	2015-2022	300	Turbina de Vapor	Candidata
11	Comb. Base III	200	2016-2022	300	Turbina de Vapor	Candidata
12	Motor II	100	2012-2022	100	Motor CI	Candidata
13	Motor III	100	2013-2022	100	Motor CI	Candidata
14	Gas I	50	2011-2022	40	Turbina de Gas	Candidata
15	Gas II	50	2014-2022	40	Turbina de Gas	Candidata
16	Motores- Zacapa	40	2013-2022	32	Motor CI	Candidata
17	Comb. Base Sur	80	2010-2022	100	Turbina de Vapor	Candidata
18	Ciclo Combinado I	200	2016-2022	360	Turbina de Vapor	Candidata
19	Ciclo Combinado II	200	2019-2022	360	Turbina de Vapor	Candidata
	Total	2026.50				

En la siguiente tabla se muestran las plantas generadoras de energía renovable, en estudio de viabilidad o en construcción para ser parte del Plan de Expansión Indicativo del Sistema de Generación 2008-2022. Al igual que en la anterior tabla se incluye información del año en que iniciarán operaciones, su potencia en MW, la tecnología que utiliza y si es candidata o ya se inició su construcción.

Tabla XII. Plantas candidatas de energía renovable

No.	Planta Generadora	Potencia MW	Inicio de operaciones	Costo de inversión aprox. (millones US\$)	Tecnología	Situación actual
1	Hidro-AV VI	16	2016-2022	40	Hidroeléctrica	Candidata
2	Hidro Zacapa	32	2011-2022	80	Hidroeléctrica	En Construcción
3	Hidro-Quiché I	94	2011-2022	235	Hidroeléctrica	En Construcción
4	Hidro-San Marcos I	50	2013-2022	150	Hidroeléctrica	Candidata
5	Hidro-AV I	181	2015-2022	312	Hidroeléctrica	Candidata
6	Hidro-Quiché II	80	2020-2022	200	Hidroeléctrica	Candidata
7	Hidro-Reu	25	2014-2022	62	Hidroeléctrica	Candidata
8	Hidro-BV I	19	2019-2022	47	Hidroeléctrica	Candidata
9	Hidro-Izabal	10	2012-2022	25	Hidroeléctrica	Candidata
10	Hidro-AV II	20.6	2012-2022	55	Hidroeléctrica	Candidata
11	Hidro-Xela	35	2014-2022	87	Hidroeléctrica	Candidata
12	Hidro-AV III	163	2011-2022	400	Hidroeléctrica	Candidata
13	Hidro-San Marcos II	16.5	2015-2022	41	Hidroeléctrica	Candidata
14	Hidro- AV IV	340	2018-2022	800	Hidroeléctrica	Candidata
15	Hidro-Quiché III	40	2018-2022	500	Hidroeléctrica	Candidata
16	Distribuidora I	30	2012-2022	74	Hidroeléctrica	Candidata
17	Distribuidora II	30	2016-2022	74	Hidroeléctrica	Candidata
18	Distribuidora III	30	2020-2022	74	Hidroeléctrica	Candidata
19	Distribuidora IV	30	2022-2022	74	Hidroeléctrica	Candidata
20	Hidro-San Marco III	15.7	2018-2022	39	Hidroeléctrica	Candidata
21	Hidro-San Marco IV	11	2018-2022	27	Hidroeléctrica	Candidata
22	Hidro-Huehue I	198	2012-2022	255	Hidroeléctrica	Candidata

23	Hidro-Huehue II	114	2013-2022	204	Hidroeléctrica	Candidata
24	Hidro- AV VI	19	2009-2022	34	Hidroeléctrica	Candidata
25	Usumacinta I	200	2016-2022	625	Hidroeléctrica	Candidata
26	Usumacinta II	200	2018-2022	625	Hidroeléctrica	Candidata
27	Usumacinta III	200	2020-2022	625	Hidroeléctrica	Candidata
28	Usumacinta IV	200	2022	625	Hidroeléctrica	Candidata
29	Hidro-Paz	70	2018-2022	175	Hidroeléctrica	Candidata
30	Geo-I	44	2010-2022	75	Geotermia	Candidata
31	Ingenio-Costa Sur	50	2008-2022	60	Turbina de Vapor (Biomasa)	En Construcción
	Total	2663.80				

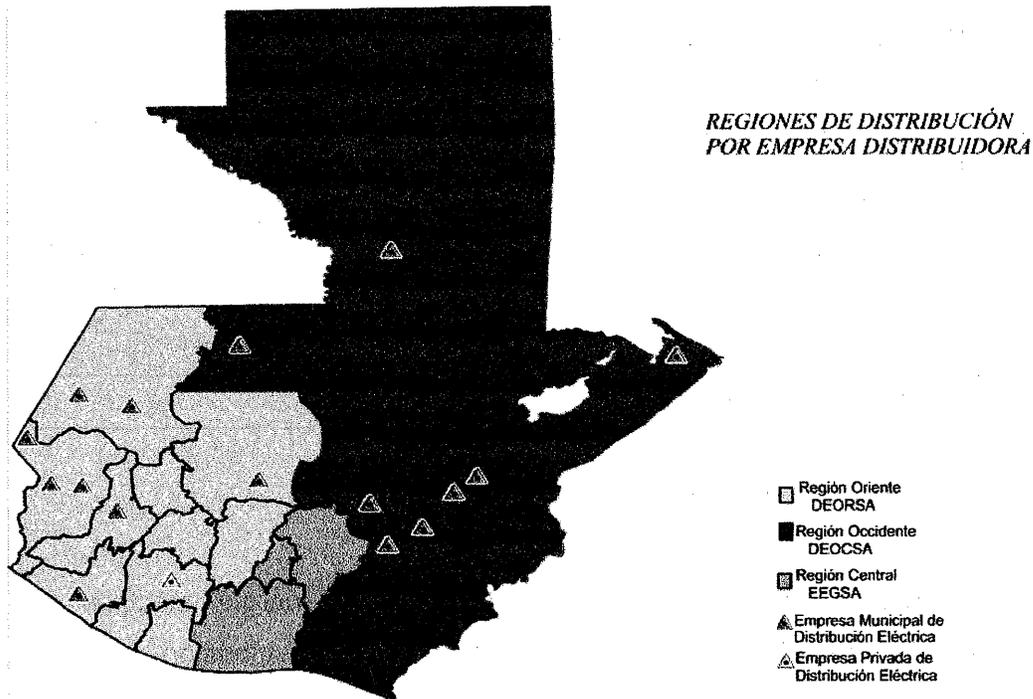
3.4.3 Distribución de potencia y energía eléctrica

El Sistema de Distribución de potencia y energía eléctrica en Guatemala está integrado por la infraestructura de distribución que está constituido por las líneas de transmisión, subestaciones y las redes de distribución que operan en tensiones menores a 34.5 KV. Las principales empresas distribuidoras de energía eléctrica, coordinadas por el Administrador del Mercado Mayorista, son:

- La Empresa Eléctrica de Guatemala -EEGSA-, que presta el servicio en el área central del país.
- La Distribuidora de Electricidad de Occidente -DEOCSA-, presta el servicio en los departamentos del occidente.
- Distribuidora de Electricidad de Oriente- que se encarga de prestar el servicio en los departamentos del oriente.
- Empresas Eléctricas Municipales.

En el siguiente mapa puede observarse de forma gráfica el área que cada empresa distribuidora de energía eléctrica abarca en Guatemala.

Figura 22. Región de distribución por empresa distribuidora en Guatemala



Fuente: Ministerio de Energía y Minas. Consultado el 21-8-09 en mem.gob.gt

3.4.4 Grandes usuarios

El Gran Usuario es aquel cuya demanda de potencia excede al límite estipulado en el Reglamento de la Ley General de Electricidad, es decir que requiere una demanda superior a los 100 KW. El Gran Usuario no se encuentra sujeto a regulaciones de precio y sus condiciones de suministro son libremente pactadas con el distribuidor o con cualquier otro suministrador.

3.5 Sistema Nacional Interconectado

El Sistema Nacional Interconectado -SNI- es la red eléctrica por la cual se entrega la energía al usuario final.

El SNI está conformado por generadores de energía, líneas eléctricas de transmisión y distribución, subestaciones eléctricas, centros de transformación monofásicos y trifásicos y el usuario final.

En Guatemala la red nacional de energía está constituida por equipos eléctricos desde las plantas generadoras hasta los transformadores, que pueden ser bancos trifásicos con unidades monofásicas. Los transformadores convierten la potencia que viene de las líneas de transmisión a valores convenientes para uso residencial.

Una red eléctrica es básicamente un circuito eléctrico serie paralelo en el cual voltajes y corrientes así como la potencia fluyen desde las plantas de generación hasta el usuario final, es decir el consumidor residencial.

Los precios de generación entre las plantas varían según la hora, ya sea ésta una hora pico o una hora de baja demanda. Esto se debe a que el precio es distinto a diferentes horas del día. También se debe tomar en cuenta que el precio del KWh de energía varía dependiendo del combustible que se utilice para generar la energía eléctrica. Dadas estas circunstancias, una planta hidráulica es más económica que una termoeléctrica, una eólica o una solar, pero con el inconveniente de que no cuenta con la misma capacidad de generación en época seca y en época lluviosa.

Debido a estos factores surge la necesidad de realizar análisis automatizados que determinen un balance óptimo de la energía a comprar a distintas plantas generadoras, dependiendo de la época del año, la tecnología de generación y la disponibilidad del combustible utilizado por cada planta.

En la siguiente ilustración se presenta un esquema simplificado del Sistema Nacional Interconectado. En esta figura se muestran las líneas de transmisión de potencia de 69, 138 y 230 KV.

Figura 23. Sistema Nacional Interconectado



Fuente: José Luis Ola García. Tarifa eléctrica y facturación en Guatemala. Pág. 4

4. OPTIMIZACIÓN DE PORTAFOLIO DEL MERCADO ENERGÉTICO EN GUATEMALA

4.1 Optimización económica

La optimización en el campo de la economía es en términos generales la forma neoclásica de la racionalidad. Esto quiere decir que trata de ponderar entre distintas posibilidades y elegir de entre ellas la mejor opción. La optimización busca la mejor solución, es decir la minimización de algo malo o la maximización de algo bueno; para resolver un problema desde el punto de vista matemático, se compone de los siguientes elementos:

- Selección de las variables fijas
- Una función a optimizar
- El espacio de las posibilidades

Deben tenerse claras las restricciones del caso, es decir a qué restricción en el tipo de regla monetaria está sujeto el proceso de optimización.

4.1.1 La teoría neoclásica

La teoría neoclásica es el paradigma dominante en las ciencias económicas y por ello se la señala también como *Mainstream* o la ortodoxia. Ésta caracteriza a la economía no tanto como un sistema cerrado sino como un método de optimización, el que es aplicable a la sociedad en su totalidad.

4.1.1.1 Los paradigmas

Los paradigmas son conceptos y visiones del mundo. Éstos pueden considerarse útiles herramientas para ordenar la realidad al punto que puede decirse que estructuran el pensamiento.

En las ciencias económicas hay tres paradigmas:

- El neoclásico, que se basa en el individualismo metodológico.
- El keynesianismo, que se basa en los agregados y que entiende la sociedad como una máquina compleja.
- La economía política, que surge de las clases sociales e investiga los intereses de los distintos actores socioeconómicos.

4.2 Concepto de portafolio

El portafolio es un concepto utilizado para determinar un grupo de instrumentos u opciones que pueden ser utilizados para hallar la solución a un problema u operación dada.

En el ámbito del mercado de compra y venta de potencia y energía eléctrica puede decirse que un portafolio energético es el grupo de instrumentos compuesto por todas las ofertas de energía disponibles en el mercado.

Estas ofertas disponibles están constituidas por aquellas plantas generadoras, independientemente de su tecnología y combustible utilizado, que estén dispuestas a ofertar en una determinada licitación.

El programa de optimización de portafolio tiene como objetivo analizar todas las ofertas disponibles en un determinado portafolio y busca la solución óptima de compra de potencia.

4.2.1 Optimización de portafolio para la compra y venta de potencia y energía eléctrica

La optimización de un portafolio energético tiene como objetivo primordial optimizar, es decir buscar la mejor opción entre varias ofertas disponibles, buscando el mínimo costo al momento de comprar potencia y energía eléctrica dependiendo de las necesidades que la demanda requiera. El proceso de licitación se da en el momento en que el comprador, es decir la demanda, necesita analizar las opciones disponibles en el mercado para tomar una decisión de compra. Esta decisión debe ser optimizada para minimizar los costos de operación. En este proceso de minimización de costos se requiere de un análisis del portafolio de generadoras disponibles, es decir la oferta. Este análisis debe tomar en cuenta cuáles son las mejores opciones de compra dependiendo de la potencia máxima y mínima, la energía disponible y el mínimo de años que requiere ser contratada cada planta generadora. En definitiva, los datos de entrada que son la potencia pico requerida por la demanda, la potencia máxima y mínima y el costo de la potencia y la energía de la oferta, son analizados junto con las restricciones lineales del sistema que deben cumplirse, para dar solución a la función objetivo, que en este caso es minimizar los costos.

Debido a todas estas características tales como las restricciones lineales, variables, función y celda objetivo, es que el programa de optimización de portafolio es básicamente una programación lineal cuyas características se analizaron en el tema 1.

4.3 Programa de optimización de portafolio para la compra y venta de potencia y energía eléctrica en Guatemala

4.3.1 Software aplicable a doce variables para optimizar la compra y venta de potencia y energía eléctrica

El programa de optimización de portafolio para la compra y venta de energía y potencia eléctrica en el mercado guatemalteco se diseñó en el programa Excel con capacidad de procesar la información correspondiente a doce variables de entrada. Las hojas de cálculo que componen el libro completo se encuentran relacionadas entre sí, dependiendo de la información que se maneje en cada una de ellas. La optimización se realiza a partir de los datos proporcionados por el ofertante, la potencia y energía máxima y mínima que puede suministrar, así como el período a lo largo del cual puede suministrarla.

La potencia eléctrica a contratar se analiza por año mientras que la energía por mes. El período a calcular es de diez años y en la hoja de solución se concreta la información para determinar la potencia y la energía a contratar, así como las plantas que cubrirán la demanda requerida. Un aspecto importante a tomar en cuenta es que, dependiendo de la demanda máxima, el pico de potencia requerido por ésta debe ser cubierto todo el tiempo por la oferta, por lo que debe contratarse la combinación óptima de generadoras que satisfagan esta condición.

4.3.1.1 Oferta disponible en el mercado

Los datos de entrada del ofertante, deben incluir la potencia máxima y mínima disponible en su planta, los años mínimos a los que debe ser contratada, la tecnología que utiliza para generar su energía, es decir qué tipo de planta generadora es; asimismo el tipo de combustible que utiliza para la generación.

Las generadoras que ingresen su oferta al mercado energético deben realizar diversos análisis internos para determinar el costo de su mantenimiento y de sus operaciones, calcular sus pérdidas por funcionamiento y su factor de planta. El factor de planta se determina según el porcentaje anual en que una planta opera a su máxima capacidad, es por eso que una planta cuyo combustible es no renovable tiene un alto factor de planta, mientras que una cuyo combustible es renovable tiene un factor de planta menor. Deben tomar en cuenta, según el combustible que utilicen, el precio del mismo en el mercado, ya sean plantas de energía renovable o no renovable. Con estos datos las generadoras pueden determinar la eficiencia en su producción, asimismo debe tomarse en cuenta las condiciones y normas del mercado energético.

Tomando en cuenta todos estos aspectos las generadoras que cumplan con los requerimientos necesarios para comercializar energía en el mercado deben determinar, con base en sus análisis internos, si pueden o no ofertar en una determinada licitación.

Al momento de ofertar se debe ingresar los datos antes mencionados. El número de años mínimos para ser contratada depende de su rentabilidad y lo determina la generadora, así como el factor de planta, la eficiencia (que depende del combustible utilizado), su precio variable de la energía (en el caso de las plantas de energía renovable), sus costos de operación y mantenimiento. Con estos datos la planta generadora puede determinar el precio de la energía que suministrará.

4.3.1.1.1 Cálculo del precio de la energía

El precio de la energía depende de los siguientes factores:

- Eficiencia
- El combustible que utiliza la planta
- El precio variable de la energía
- Costos de operación y mantenimiento

Este precio se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$\text{Precio de Energía} = (\text{Eficiencia} * \text{Combustible} * 1000) + \text{Precio Variable de la Energía} + \text{Operación y Mantenimiento}$$

Las dimensionales del precio de la energía son US\$/MWh, y el factor 1000 se utiliza para convertir los KWh en los cuales está dada la eficiencia, en MWh.

- a. La eficiencia la determina la planta generadora, basándose en sus estudios internos, para determinar qué tanto de la energía consumida para producir potencia y energía eléctrica es aprovechada, en la siguiente relación:

$$\text{Eficiencia} = \text{Energía producida} / \text{Energía consumida}$$

la eficiencia está dada en BTU/KWh.

- b. El combustible se refiere a los insumos utilizados para generar energía y potencia eléctrica, puede ser de carácter renovable como el agua, la biomasa, o no renovable como el gas natural, diesel y demás derivados del petróleo. El combustible está dado en US\$/BTU.

4.3.1.2 Demanda

La demanda la establece el interesado en contratar la potencia eléctrica y es el que establece la potencia máxima y mínima requerida.

El demandante determina, según sus necesidades, la potencia y energía que requerirá. Al igual que el ofertante, el demandante presenta la potencia por año y la energía por mes.

En el programa de optimización la hoja denominada 'Demanda' es la destinada a presentar los datos de potencia y energía que el demandante requiere.

4.3.1.2.1 Potencia a contratar

La potencia a contratar se proyecta por año, a un plazo de diez años, incluyendo la distribución mensual de la potencia a utilizar, información que proyecta qué porcentajes de potencia se utiliza en cada mes del año que componen el cien por ciento de la potencia consumida a lo largo del mismo.

El interesado en comprar potencia eléctrica, el demandante, publica la demanda a contratar; la misma se expresa en MW y este dato se multiplica por la cantidad de horas del año para obtener la energía a contratar en GWh.

La energía se contrata por mes. Si se está licitando en un contrato de potencia la energía a contratar se determina tomando la potencia que se consumirá por hora en un mes y la suma de todos los meses debe ser igual al total de energía por año a contratar. Si se licita en un contrato de energía, el demandante ingresa la energía mensual que requerirá sin que ésta se determine a partir de la potencia.

En definitiva, el interesado en contratar la potencia eléctrica determina sus necesidades energéticas en una licitación, con base al pico de potencia que debe suministrar al usuario final.

Tanto el que demanda como el que oferta deben tomar en cuenta que el pico de potencia que se da al momento de consumir la máxima energía, debe estar disponible todo el tiempo, es decir el demandante debe contratar una potencia igual a la potencia máxima requerida, aunque no se consuma toda la energía disponible todo el tiempo, sino que únicamente en los picos de consumo. Esto es debido a que siempre debe estar disponible el mayor consumo de energía aunque ésta sea consumida únicamente en las horas pico del día.

En la siguiente figura se ilustra la hoja de información que el interesado en contratar la potencia presenta. En ella se observa que el dato de entrada resaltado es la demanda a contratar; a partir de este dato se obtiene la energía mensual que se necesitará, o bien puede ingresarse ésta de forma manual mes a mes.

Figura 25. Hoja 'Demanda' en el programa de optimización de portafolio

Fecha Inicial de contratación				
Número de años a contratar				
Año Inicial				
Año	Demanda a contratar	Horas/año	factor de carga	GWh
0	1	8760	0.00	
1	2	8760	0.00	
2	3	8760	0.00	
3	4	8760	0.00	
4	5	8760	0.00	
5	6	8760	0.00	
6	7	8760	0.00	
7	8	8760	0.00	
8	9	8760	0.00	
9	10	8760	0.00	
10	11	8760	0.00	

Distribución anual				
	Ene	Feb	Abr	May
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				0.00%

Año	Mes	Horas	Energía Anual GWh	Energía Mensual GWh	Distribución anual	Energía Mensual MWh
0	11	730		0.00	0.0000	0.00
0	12	730		0.00	0.0000	0.00
1	1	730		0.00	0.0000	0.00
1	2	730		0.00	0.0000	0.00
1	3	730		0.00	0.0000	0.00
1	4	730		0.00	0.0000	0.00
1	5	730		0.00	0.0000	0.00
1	6	730		0.00	0.0000	0.00
1	7	730		0.00	0.0000	0.00
1	8	730		0.00	0.0000	0.00
1	9	730		0.00	0.0000	0.00
1	10	730	0.00	0.00	0.0000	0.00
1	11	730		0.00	0.0000	0.00
1	12	730		0.00	0.0000	0.00
2	1	730		0.00	0.0000	0.00
2	2	730		0.00	0.0000	0.00
2	3	730		0.00	0.0000	0.00
2	4	730		0.00	0.0000	0.00
2	5	730		0.00	0.0000	0.00
2	6	730		0.00	0.0000	0.00
2	7	730		0.00	0.0000	0.00
2	8	730		0.00	0.0000	0.00
2	9	730		0.00	0.0000	0.00
2	10	730	0.00	0.00	0.0000	0.00
2	11	730		0.00	0.0000	0.00
2	12	730		0.00	0.0000	0.00

4.3.1.3 Solución a la optimización de portafolio energético

La solución a la optimización se presenta en una hoja del programa, denominada hoja 'Solución'. En esta hoja se sintetiza la información de la oferta y la demanda.

4.3.1.3.1 Potencia a contratar

La potencia a contratar es una variable del sistema que puede tomar cualquier valor entre la potencia mínima y máxima, determinada por la capacidad del ofertante.

Este valor variable lo determina el programa tomando en cuenta las restricciones. En la columna 'suma de potencia', se suma cada potencia a contratar a cada generadora que compone el portafolio energético y este valor debe ser igual a la demanda total de potencia, que es un dato proporcionado por el demandante.

4.3.1.3.2 Variable de estado

La variable de estado es una variable del programa que es representada por un número binario que puede tomar valores de 0 ó 1. Este número representa el estado activo, uno, o inactivo, cero, en que se encuentra una generadora. Es decir el momento en que se encuentra contratada o activa en el sistema.

4.3.1.3.3 Variable de arranque

La variable de arranque es, al igual que la variable de estado, un número binario y denota el momento óptimo en que debe iniciarse la contratación de una determinada generadora.

Este número puede ser activo una sola vez ya que la generadora se contrata y permanece en ese estado al menos los años mínimos de contratación.

En la siguiente figura se ilustra el cuadro de la variable de arranque, donde puede observarse que se activa una determinada generadora con un uno, una sola vez, y el resto son ceros pero la planta ya se encuentra activa en el sistema al menos la cantidad mínima de años de contratación, hasta diez años plazo. En la figura, cada fila representa un año distinto, y cada columna una planta generadora.

Figura 26. Cuadro de variable de arranque

Variable de Arranque												
HIDRO 1	HIDRO 2	VAPOR 1	Vacio	INGENIO 1	CARBON ERA 2	VPS	VAPORS A	Vacio	CAÑA I	GEO 1	GAS NATURAL	Déficit
1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0

En el cuadro 'suma de variable de estado' se muestra la cantidad de años en que se contratará una generadora, según el análisis óptimo del programa, asimismo este número debe ser mayor a los años seguidos mínimos en que debe ser contratada la misma generadora, como lo determinan las restricciones del programa.

Figura 27. Cuadro de la suma de variable de estado

Suma Var. De Estado											
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Déficit
10	10	10	7	10	10	0	10	0	0	0	0

En la hoja destinada a la solución del programa se muestran también los costos de potencia en \$/KW-mes, así como los precios monómicos que son los precios combinados de potencia y energía; asimismo se muestra la potencia máxima y mínima de cada planta generadora ya que estos datos establecen los límites entre los cuales puede variar la potencia a contratar. Estos datos se obtienen del ofertante.

4.3.1.3.4 Generación máxima

La generación máxima se determina a partir de la potencia máxima multiplicada por el factor de planta y proyectada a un valor mensual, es decir por las horas que tiene un mes, que es en promedio 730 horas. En resumen la fórmula de generación máxima es:

$$\text{Generación máxima} = \text{potencia a contratar} * \text{factor de planta} * 730$$

4.3.1.3.5 Energía

La energía a contratar, como dato del sistema, se sintetiza en el cuadro de 'energía', y sus valores son variables del sistema que pueden tomar valores entre cero y la generación máxima disponible.

La suma total de energía disponible debe ser igual a la energía establecida en la demanda, la cual se analiza mensualmente a lo largo de los diez años.

4.3.1.3.6 Función Objetivo

La solución a la función objetivo es el fin último del programa, en este cuadro se maneja los costos de la potencia y la energía a contratar.

La fórmula para determinar la función objetivo es:

$$\text{F.O.} = (\text{costo de la potencia} * \text{potencia a contratar} * 1000) + (\text{energía a contratar} * \text{costo de la energía})$$

El costo final lo determina la suma total de todos los costos finales por mes durante diez años. El objetivo del programa de optimización de portafolio es hacer este costo mínimo, valor expresado en la celda objetivo.

4.3.1.3.7 Aplicación de la herramienta Solver

La herramienta Solver en el programa de optimización es la que optimiza el resultado, minimizando los costos, tomando en cuenta las restricciones y determinando las variables.

4.3.1.3.7.1 Restricciones del programa

Las restricciones del programa, que tienen como objeto darle forma al proceso de optimización, son las siguientes:

- La energía a contratar debe ser menor o igual a la máxima energía total generada.
- La suma total de la energía a contratar debe ser igual a la energía demandada.
- La potencia a contratar debe ser menor o igual a la potencia máxima generada por la oferta, debiendo estar activa (uno binario) la planta que genera dicha potencia.
- La potencia a contratar debe ser mayor o igual a la potencia mínima generada por la oferta, debiendo estar activa dicha planta generadora.
- La potencia a contratar debe ser exactamente igual a la potencia requerida por la demanda.

- La variable de arranque debe ser un número binario que puede tomar valores de cero y uno, siendo uno el valor que toma la variable cuando se inicia la contratación de la generadora y cero mientras permanece inactiva o no contratada.
- La planta puede activarse, o contratarse, una sola vez; el programa no permite activar, desactivar y volver a activar una misma planta generadora.
- La fórmula de arranque debe ser mayor o igual a cero, es decir es un número binario que determina si la generadora se ha contratado (uno) o no se ha contratado aún (cero).
- La variable de estado debe ser un número binario que toma valores entre cero y uno.
- Los años a contratar determinada planta debe ser mayor o igual al mínimo de años que requiere la oferta para ser contratada.

La celda objetivo representa el objetivo del modelo de optimización, es decir el costo mínimo en US\$ que se debe pagar por la potencia requerida. Este valor se obtiene de la óptima combinación de todas las generadoras ofertantes en el mercado durante al menos el mínimo de años en que cada una debe ser contratada.

La celda objetivo refleja el trabajo del programa de optimización, el cual obedece a la programación lineal y su función es dar el resultado óptimo obedeciendo a todas y cada una de las restricciones, tomando en cuenta el 'n' número de variables del sistema.

Para este caso, el programa de optimización de portafolio, la función objetivo está diseñada para que calcule el mínimo costo.

4.3.1.3.7.2 Variables del programa

Las variables son los valores que puede tomar la solución óptima, ajustándose a las restricciones. En el programa las variables son:

- La potencia a contratar, que oscila entre la potencia mínima y la potencia máxima de la generadora, determinándose en un punto óptimo.
- La variable de estado, que determina el momento más apropiado para que una determinada generadora inicie contrato con el demandante.
- La energía a contratar, la cual debe oscilar entre cero y la energía disponible que puede entregar la generadora, encontrando un punto óptimo.
- La variable de arranque que determina el momento óptimo, en qué mes de qué año, se debe iniciar el contrato con una determinada planta generadora.

La variable 'déficit' se toma como una entrada de oferta extra, para que se incluya en las restricciones, dándole valores específicos en cada cuadro con la finalidad de estabilizar el sistema. Sin esta variable extra la solución podría oscilar entre varias posibles soluciones, en el caso que no se encuentre ninguna solución viable. Esto quiere decir que si el programa no encuentra una solución, ya que las ofertas no cumplen con lo que se necesita, la solución encontrada pero sumamente costosa será el déficit, ya que se le asignan valores flexibles para este fin.

Por ejemplo en el costo de potencia y energía se le da un valor elevado, para que en condiciones normales el programa no lo tome en cuenta y para los años mínimos a contratar se da el valor de un año, para flexibilizar la restricción.

En definitiva a esta variable se le asignan valores grandes de potencia y energía, a un elevado costo, muy por encima de las otras ofertas, con una mínima cantidad de años de contrato con el fin de que, al existir una solución óptima entre las ofertas existentes en el portafolio, el déficit no sea tomado en cuenta.

Por el contrario si no existe una solución y el programa queda permanentemente oscilando entre posibles soluciones, pero no encuentra ninguna, le dé valores a la opción déficit, tomando esta variable en cuenta para la solución. Es así como el déficit funciona como un estabilizador del sistema. Las características de esta variable son, que su potencia mínima es cero, la máxima es muy grande, no tiene límite de años a contratarse y sus costos son muy elevados.

Si el déficit resulta como una solución del sistema debe interpretarse como la ausencia de una solución adecuada y viable, esto quiere decir que el portafolio de las plantas generadoras no satisface a la demanda requerida y se debe licitar nuevamente para encontrar nuevas ofertas para esa demanda.

4.3.1.4 Soluciones gráficas

En el programa se han incluido gráficas para analizar y visualizar los datos obtenidos de una forma más simple y objetiva. Por medio de las gráficas puede analizarse la potencia a contratar por cada planta generadora en cada año estacional, la demanda y energía a contratar, la energía que se tendrá disponible por mes durante los diez años licitados y finalmente una gráfica que ilustra los precios monómicos, es decir los precios combinados de potencia y energía para visualizar el costo total, tanto en época seca como en época lluviosa.

A continuación se muestra la aplicación del programa de optimización de portafolio en el mercado eléctrico guatemalteco.

4.3.1.5 Aplicación del programa de optimización de portafolio a una licitación para la compra y venta de energía y potencia eléctrica

Los requerimientos de la demanda se muestran en la siguiente figura:

Figura 28. Potencia a contratar en MW

Año		Demanda a contratar	Horas/año	Factor de carga	GWh
2010	2011	300	8760	0.6	1576.80
2011	2012	325	8760	0.6	1708.20
2012	2013	350	8760	0.6	1839.60
2013	2014	375	8760	0.6	1971.00
2014	2015	400	8760	0.6	2102.40
2015	2016	425	8760	0.6	2233.80
2016	2017	450	8760	0.6	2365.20
2017	2018	475	8760	0.6	2496.60
2018	2019	500	8760	0.6	2628.00
2019	2020	550	8760	0.6	2890.80
2020	2021		8760		0.00

Se contratará potencia por un lapso de diez años, iniciándose el primero de mayo del año 2010, por lo que el período a licitar abarca desde mayo del 2010 hasta abril del 2020. La distribución mensual de la potencia anual a contratar, según previos estudios proyectados por el interesado en comprar la potencia, se muestra en la siguiente tabla.

Tabla XIII. Distribución mensual de la potencia anual a contratar

Distribución mensual %	Mes
7.44	Enero
7.20	Febrero
9.85	Marzo
9.25	Abril
8.10	Mayo
8.35	Junio
8.05	Julio
8.85	Agosto
7.01	Septiembre
9.25	Octubre
7.00	Noviembre
9.65	Diciembre
100.0	Total

Dado que este ejemplo describe un contrato de potencia, la energía la calcula el programa a partir de la potencia, el factor de carga y la proyección de la distribución mensual. Si por el contrario el contrato fuera de energía, ésta la determina la demanda y la ingresa como dato mensual a lo largo de los años a contratar.

En este caso licitaron diez ofertas, las especificaciones de cada una de estas ofertas se detallan en las tablas siguientes.

Tabla XIV. Datos para la potencia

No. Ofertas	Potencia máxima MW	Potencia Mínima MW	Precio de la potencia US\$/KW-mes	Años seguidos mínimos a ser contratada	Tecnología	Combustible
1	200	5	10	1	Hidro	Agua
2	200	0	15	2	Hidro	Agua
3	120	0	5	2	Turbina de vapor	Carbón
4	150	5	10	1	Turbina de vapor	Bagazo/Carbón
5	120	15	10	1	Turbina de vapor	Carbón
6	200	5	15	1	Turbina de vapor	Pet Coke
7	200	10	8	2	Motor CI	Diesel
8	200	5	10	2	Turbina de vapor	Biomasa
9	100	20	20	1	Geotermia	Vapor de agua
10	200	20	5	1	Turbina de Gas	Gas natural

Tabla XV. Datos para la energía

No. Ofertas	Factor de planta	Eficiencia BTU/KWh	Precio de combustible US\$/BTU	Precio variable de la energía US\$/MWh	Operación y mantenimiento
1	0.55	0	0	25	2
2	0.50	0	0	20	2
3	0.90	9500	$4.0 \cdot 10^{-6}$	0	2
4	0.80	8000	$4.3 \cdot 10^{-6}$	2	2
5	0.90	10500	$5.5 \cdot 10^{-6}$	0	2
6	0.95	9000	$6.58 \cdot 10^{-6}$	0	2
7	0.95	8500	$4.56 \cdot 10^{-6}$	0	3
8	0.70	0	0	5	5
9	0.90	0	0	15	5
10	0.95	9000	$7.03 \cdot 10^{-6}$	0	3

Estos datos se sintetizan en la hoja solución, desde donde se aplica la herramienta Solver, obteniendo los siguientes datos para la potencia a contratar.

Figura 29. Potencia a contratar optimizada

Año Estacional		HIDRO 1	HIDRO 2	VAPOR 1	Vacio	INGENI O 1	CARBO NERA 2	VPS	VAPORSA	Vacio	CAÑA 1	GEO 1	GAS NATURA L	Déficit	Suma Potencia
2010	2011	20	0	80	0	0	0	0	0	0	200	0	0	0	300
2011	2012	43	0	82	0	0	0	0	0	0	200	0	0	0	325
2012	2013	66	0	84	0	0	0	0	0	0	200	0	0	0	350
2013	2014	89	0	86	0	0	0	0	0	0	200	0	0	0	375
2014	2015	104	0	96	0	0	0	0	0	0	200	0	0	0	400
2015	2016	117	0	108	0	0	0	0	0	0	200	0	0	0	425
2016	2017	131	0	119	0	0	0	0	0	0	200	0	0	0	450
2017	2018	145	0	110	0	0	0	0	0	0	200	20	0	0	475
2018	2019	158	0	120	0	0	0	0	0	0	200	22	0	0	500
2019	2020	189	0	120	0	0	0	0	0	0	200	20	21	0	550

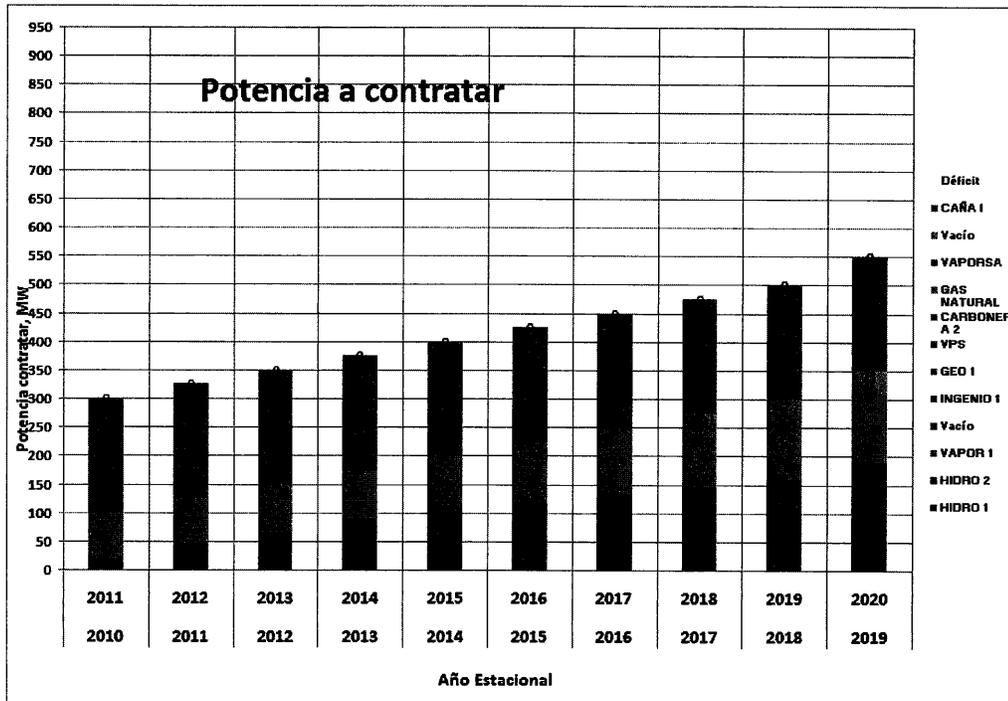
En este ejemplo se asumen los datos de la energía de las plantas generadoras como constantes a lo largo de los 120 meses.

La celda objetivo determina un costo mínimo de US\$ 877,775,296 como costo mínimo para la compra de potencia y energía eléctrica durante diez años, considerando una demanda de potencia creciente año con año.

Puede observarse en la figura 31 que las plantas Hidro 1, Vapor 1 y Caña 1 son contratadas todo el tiempo, siendo la planta Caña 1 la opción que se contratará a su máxima potencia durante los diez años. La planta Geo 1 debe contratarse a partir del octavo año y la de Gas Natural debe contratarse únicamente en el último año con 21 MW. Las demás generadoras no serán contratadas, según el modelo de solución para este ejemplo.

A continuación se muestra la gráfica de potencia a contratar.

Figura 30. Gráfica potencia a contratar



5. INTERFACE DE AUTOMATIZACIÓN DEL PROGRAMA DE OPTIMIZACIÓN DE PORTAFOLIO

5.1 Descripción del programa

El programa de interface del software de optimización de portafolio se realizó en el programador Progress con la finalidad de automatizar dicho programa de optimización, para facilitar su uso por el usuario. Esta interface establece un ambiente amigable para que el usuario pueda hacer uso de las opciones y beneficios del programa de optimización.

La finalidad del programa de automatización es facilitar el ingreso de los datos de entrada del sistema, ya sea el ofertante o el demandante, para encontrar una solución óptima de compra. Asimismo por medio de este programa se pueden almacenar las distintas licitaciones surgidas por las necesidades del mercado. Cada licitación puede manejar una demanda con sus respectivas doce ofertas.

El programa en sí sirve de guía tanto para el interesado en comprar la potencia eléctrica, como para el que desea venderla. El programa se diseñó y realizó para que manejara el ingreso de los datos, así como poder visualizarlos en cualquier momento.

Si el usuario es el interesado en comprar potencia, el programa solicita que sean ingresadas la potencia y energía requeridas. En este caso puede ingresarse la potencia a contratar, tal es el caso de un contrato de potencia, pero si el contrato es de energía generada, se puede ingresar la energía a contratar, sin necesidad de una potencia asociada.

Al momento de ser un ofertante el usuario, el programa requiere que le sean ingresados los datos de potencia máxima y mínima, los costos de energía y potencia y los años mínimos a ser contratados, llevando así un control de las ofertas en una licitación específica.

En definitiva, este programa facilita el ingreso de los datos de entrada para ser distribuidos en sus respectivas hojas de Excel, luego estos datos son almacenados en la hoja 'solución', hoja desde la cual debe ser llamado el Solver que es la herramienta que realiza la optimización de la función objetivo para dar como resultado un costo mínimo en la compra de potencia y energía eléctrica. Finalmente el programa brinda al usuario la opción de visualizar los resultados en cualquiera de las formas gráficas que maneja el software de Optimización de Portafolio.

5.2 Diseño del programa

El programa se diseñó para que el sistema requiera de Usuario registrado y clave para poder acceder, mostrando la siguiente ventana.

Figura 31. Cuadro de ingreso de Usuario y contraseña



Acceso a Dream Office

CNEE Versión 5
Application

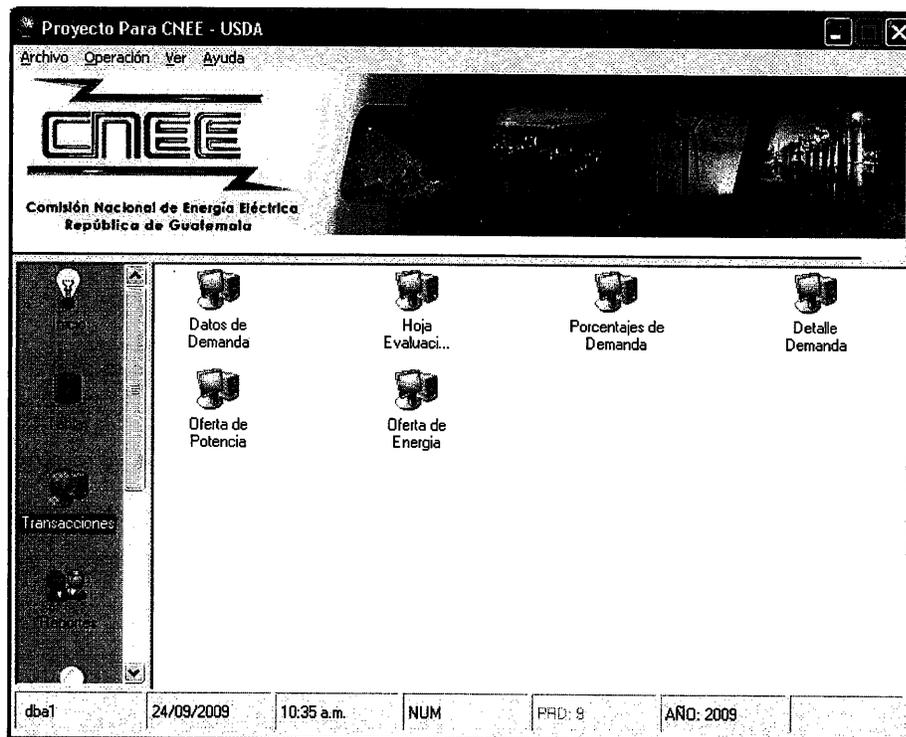
Usuario :

Contraseña:

Aceptar Cerrar

Luego de ingresar usuario y palabra clave correctas el sistema presentara el módulo completo, dónde pueden visualizarse los distintos íconos que presentan las opciones del sistema.

Figura 32. Módulo inicial del programa de automatización



5.2.1 Opción tablas

Al ingresar a la opción tablas, se presenta el ícono ofertas, desde el cual se crea una nueva oferta. Se inicia creando una nueva licitación o una nueva oferta en una licitación ya existente. El programa solicita el número de subasta, es decir la oferta, los años mínimos a ser contratada, la tecnología y el combustible de generación. Como se muestra en el cuadro siguiente.

Figura 33. Cuadro de ofertas

No. Evento	No. Oferta	Años Mínimos a ser Contratado	Tecnología	Tipo Combustible
001	1		10:HIDROELECTRICO	AGUA
001	2		10:HIDROELECTRICO	AGUA

Licitación: 001
No. de Subasta: 1
Años Mínimos: 10
Codigo Tecnología: 1
Codigo Combustible: 1

HIDROELECTRICO
AGUA

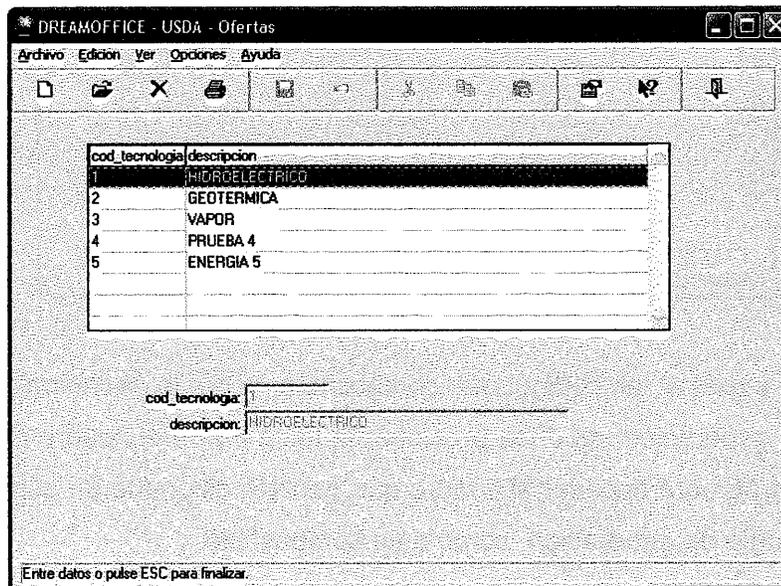
Entre datos o pulse ESC para finalizar.

En este cuadro pueden ingresarse las ofertas, con los datos de tecnología, combustible y años mínimos a ser contratada; esta información es sintetizada ordenando cada oferta con su respectiva licitación, en un grupo indefinido de licitaciones.

Para ingresar una oferta aún no existente, se presiona la hoja en blanco en la barra de herramientas, lo que permite ingresar una nueva oferta, así como los datos de ésta. En este cuadro se da la opción de ingresar la fecha inicial de contratación, el primer mes a contratar la potencia, así como el respectivo año y el número de años que se requieren contratar.

Si se desea ingresar un nuevo código de tecnología puede presionarse F8 en el cuadro de la figura anterior, mostrándose en el sistema la siguiente figura, en la cual puede asignarse un nuevo código a una tecnología, o ingresar una tecnología nueva.

Figura 36. Cuadro de códigos de tecnología de generación



5.2.2 Opción transacciones

Esta opción permite acceder a una serie de íconos que dan las opciones necesarias para ingresar los datos de demanda, los datos de potencia y energía de las ofertas y la optimización de portafolio.

5.2.2.1 Datos de demanda

Al presionar este ícono, se despliega un cuadro de diálogo que permite ingresar la demanda de potencia a contratar en MW, el factor de carga y las horas del año; datos a partir de los cuales el sistema determina la energía a contratar.

El programa copia a lo largo de todos los años de contratación los datos ingresados, pero se pueden cambiar individualmente, posicionando el cursor directamente en el dato a cambiar. Automáticamente el programa presenta todos los años que se desean contratar, dependiendo de los datos ingresados al momento de crear la licitación.

Figura 37. Datos de demanda

5.2.2.2 Porcentajes de demanda

En esta subrutina el sistema solicita que el interesado en comprar potencia ingrese sus datos proyectados de distribución mensual, para determinar, a partir del factor de carga anual, la energía a contratar mensualmente. La suma total de todas las distribuciones mensuales debe ser 100 %, de lo contrario el programa solicita que se revise la distribución de cada mes.

Figura 38. Porcentajes de demanda

Licitación	Año contratar	Procesar
001	2008	10

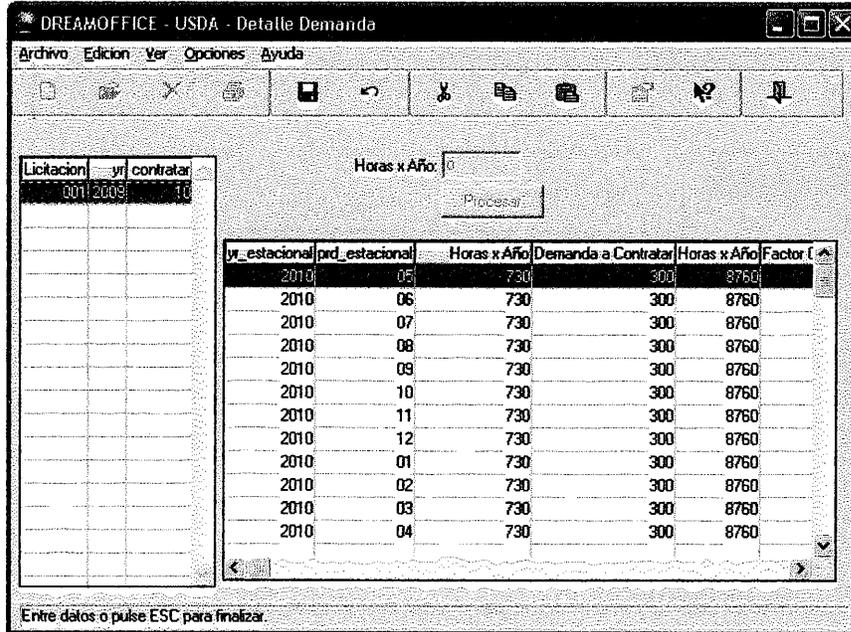
línea	Mes	% de Distribución
1	01	007.44
2	02	007.20
3	03	009.85
4	04	009.25
5	05	008.10
6	06	008.35
7	07	008.05
8	08	008.85
9	09	007.01
10	10	009.25
11	11	007.00
12	12	009.65

Entre datos o pulse ESC para finalizar.

5.2.2.3 Detalle demanda

En esta opción se permite ingresar las horas que componen los meses y se presentan detalladamente los datos de la demanda. Estos datos incluyen los años estacionales de la contratación divididos en meses ya que se presentan los datos de la energía a contratar. Esta energía es calculada automáticamente por el programa, a partir del factor de carga, las horas del año y la distribución mensual de consumo. Sin embargo si se desea licitar en un contrato de energía generada, se puede ingresar la energía a contratar manualmente, anulando la fórmula. Este proceso se realiza colocando el cursor sobre el dato de energía a modificar e ingresando el dato deseado.

Figura 39. Detalle demanda



5.2.2.4 Oferta de potencia

En la opción oferta de potencia, el programa muestra año por año, a lo largo de los años a contratar, la potencia máxima y mínima de la generadora ofertante y el precio de la potencia. Para ingresar los datos de una oferta nueva se debe presionar el botón 'Nuevo' en la barra de herramientas; esta instrucción permite ingresar una nueva potencia máxima y mínima, así como el precio de la misma. Debe tenerse en cuenta que no puede modificarse una oferta ya existente. Ésta debe borrarse y crearse en el ícono tablas, descrito en el apartado 5.2.1. Esto significa que en este cuadro puede ingresarse los datos de potencia de una oferta ya creada, pero que aún esté vacía.

Figura 40. Oferta de potencia

Licitación	no. oferta
001	2

Potencia Maxima: porc_potencia: Potencia Minima:

Precio Potencia: No. Oferta:

Linea	Inicial	Final	Potencia Maxima	Potencia Minima	Precio Potencia
1	2010	2011	200	20000	1.00
2	2011	2012	200	20000	1.00
3	2012	2013	200	20000	1.00
4	2013	2014	200	20000	1.00
5	2014	2015	200	20000	1.00
6	2015	2016	200	20000	1.00
7	2016	2017	200	20000	1.00
8	2017	2018	200	20000	1.00
9	2018	2019	200	20000	1.00
10	2019	2020	200	20000	1.00

Entre datos o pulse ESC para finalizar.

5.2.2.5 Oferta de energía

En el cuadro de oferta de energía el sistema solicita que el ofertante ingrese su factor de planta, eficiencia, precio del combustible, precio variable de la energía y los costos de operación y mantenimiento. El sistema determina automáticamente el precio de la energía. Asimismo pueden observarse todas las ofertas de todas las licitaciones en el subcuadro izquierdo, permitiendo agregar información automáticamente a las ofertas que estén vacías; si se desea crear o borrar una oferta debe hacerse desde el ícono tablas. La información de las ofertas puede modificarse manualmente colocándose sobre el dato a modificar e ingresando el nuevo valor.

Figura 41. Oferta de energía

Licitación	no. oferta
001	2

FP: 0.00
 CTUN EFICIENCIA: 0
 COMBUSTIBLE: 0.0000
 PRECIO VAR. ENERGIA: 0.00
 DYM: 0
 PRECIO ENERGIA: 0.00

Año Estacional	Mes	F.P.	CTUNG	Eficiencia	Combustible	Precio Variabl
2010	05	0.95	0	0	0.0000	25.0
2010	06	0.95	0	0	0.0000	25.0
2010	07	0.95	0	0	0.0000	25.0
2010	08	0.95	0	0	0.0000	25.0
2010	09	0.95	0	0	0.0000	25.0
2010	10	0.95	0	0	0.0000	25.0
2010	11	0.95	0	0	0.0000	25.0
2010	12	0.95	0	0	0.0000	25.0
2010	01	0.95	0	0	0.0000	25.0

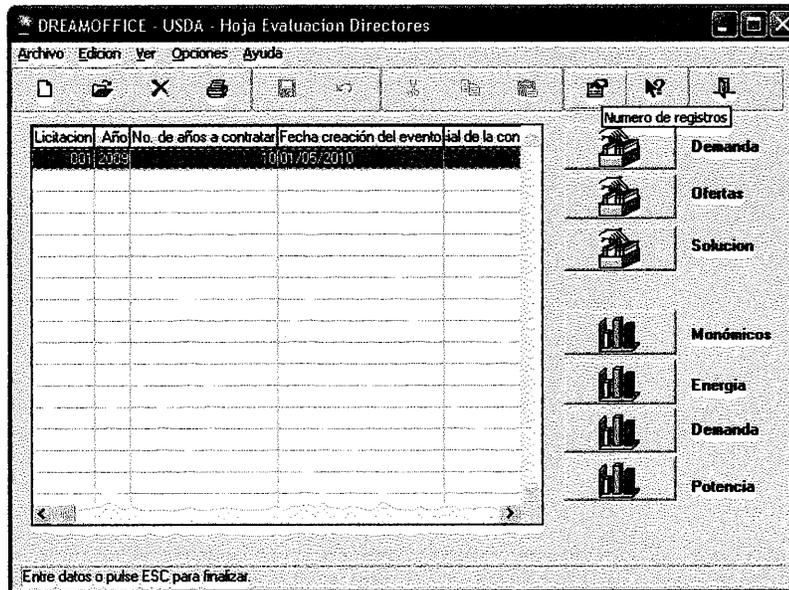
Entre datos o pulse ESC para finalizar.

5.2.2.6 Optimización de portafolio

Es en esta opción en que se sintetizan los datos de la oferta y la demanda. En esta opción se debe presionar el botón 'Nuevo' y posteriormente 'Guardar' para que el sistema actualice las hojas de Excel con los datos ingresados. Al momento de estar creado el archivo, este cuadro permite visualizar la demanda, la oferta, o darle solución a la licitación. Para dar solución, el sistema ingresa en la hoja 'Solución' de Excel y desde allí puede aplicarse la herramienta Solver versión 5.5.

Esta opción también permite visualizar las soluciones gráficas del sistema.

Figura 42. Optimización de portafolio



5.3 Aplicación del programa de interface

El programa permite movilizarse a cualquier ícono en cualquier momento, es decir no es estrictamente secuencial, lo que permite modificar datos y analizarlos en cualquier momento.

Para salir de cualquier ventana se puede realizar con la tecla Esc, para guardar cambios y para crear licitaciones se deben presionar los botones 'Nuevo' seguido de 'Guardar', en la barra de herramientas.

El programa está diseñado para poder ser modificado según sean las necesidades del usuario, es decir, la interface puede adaptarse a futuros cambios realizados en el programa de optimización de portafolio. Para adaptar la interface a dichos cambios las modificaciones deben realizarse directamente en el esquema del programa.

En el programa de automatización se han dejado íconos vacíos, para que el usuario pueda optimizar el programa según sean sus necesidades. Tal es el caso de la opción Ayuda y los íconos Reportes, Consultas, Diarios y Cierres. Asimismo se ha dejado la opción de incluir manuales y noticias de relevancia para la Comisión Nacional de Energía Eléctrica.

En definitiva, el programa interface de automatización del programa de optimización de portafolio constituye una útil herramienta para controlar los datos de entrada y salida de las licitaciones del mercado energético. A su vez este programa puede ser modificado para adaptarse a futuros cambios en el programa de optimización y en él se han dejado opciones abiertas para que pueda ser mejorado por el usuario y así cumplir eficientemente su función de automatizar.

CONCLUSIONES

1. La programación lineal es una útil herramienta en el área de la optimización, ya que al optimizar se debe minimizar una desventaja o maximizar un beneficio, procedimiento que se realiza automáticamente por un programa lineal que cumpliendo las restricciones le da solución a una función objetivo que es la que realiza el procedimiento de optimización.
2. La comercialización energética en Guatemala se basa en un libre mercado donde un comprador puede realizar transacciones con las distintas ofertas existentes en dicho mercado, condiciones que se dieron al privatizar parte de la generación de energía eléctrica en el país. Las reglas de comercialización son reguladas por el Administrador del Mercado Mayorista, el ente regulador de las tarifas y precios de la energía es la Comisión Nacional de Energía y el rector del subsector eléctrico es el Ministerio de Energía y Minas.
3. El desarrollo de Guatemala ha traído consigo una creciente demanda energética, la cual ha superado a la oferta, por lo que se han elaborado planes para nivelar la misma y estabilizar los precios de la potencia y la energía eléctrica.
4. Con el avance de los programas de computación es posible simplificar la optimización de un portafolio energético compuesto por doce ofertas y una demanda, realizando la minimización del costo de compra de potencia y energía eléctrica a dichas ofertas en pocos segundos manejando aproximadamente 2000 variables.

5. Es posible automatizar el sistema de optimización de portafolio mediante una interface con el usuario, para facilitar el proceso de licitación de una demanda energética a un usuario que no se encuentre familiarizado con la optimización del portafolio de energía eléctrica.

RECOMENDACIONES

1. La programación lineal es una útil herramienta que al ser utilizada en economía aplicada a la ingeniería proporciona grandes beneficios en la maximización de beneficios o minimización de costos.
2. La utilización de restricciones acertadas son de vital importancia en la resolución de una función objetivo, que tenga como objetivo el minimizar los costos de compra en un proyecto.
3. Se deben tener claras las normas de comercialización de energía, así como La Ley General de Electricidad, las plantas generadoras de energía eléctrica y las necesidades de la demanda en el medio guatemalteco para poder participar de forma eficiente y rentable en el mercado energético.
4. Con el apoyo de las herramientas computacionales adecuadas se puede combinar las distintas ramas de la ingeniería y la economía para automatizar sistemas que faciliten la comercialización de cualquier producto, en este caso la energía y potencia eléctrica.
5. Con los resultados obtenidos a través de ejemplos simulados con valores típicos de generación y demanda de energía eléctrica se pueden perfeccionar los sistemas de optimización de portafolio, haciendo así más eficiente la toma de decisiones cuando se emprende un proyecto comercial.

BIBLIOGRAFÍA

1. Asociación Nacional de Generadores. **Estructura del sector eléctrico en Guatemala.** Guatemala: s.e. 2009.
2. Frontline System Inc. **Premium Solver Platform version 5.5.** s.l. s.e. 2003. 224 pp.
3. Lomba, N.P. **Linear Programming: An introductory analysis.** New York: Editorial McGraw-Hill. 1964.
4. Ministerio de Energía y Minas y Comisión Nacional de Energía Eléctrica. **Ley General de Electricidad.** Guatemala. 1996. 18 pp.
5. Ministerio de Energía y Minas y Comisión Nacional de Energía Eléctrica. **Reglamento de la Ley General de Electricidad.** Guatemala. 1997. 43 pp.
6. Ministerio de Energía y Minas y Comisión Nacional de Energía Eléctrica. **Reglamento del Administrador del Mercado Mayorista.** Guatemala. 1998. 26 pp.
7. Ministerio de Energía y Minas. **La energía en Guatemala.** Guatemala: s.e. 2007. 44 pp.
8. Progress App Builder. **Manual de Programación, versión 9.1.** s.l. s.e. 2001.

BIBLIOGRAFÍA ELECTRÓNICA

1. amm.gob.gt, consultado el 9-8-2009.
2. cnee.gob.gt, consultado el 9-8-2009.
3. De Guate.com, Economía y finanzas. **Sistema de energía eléctrica en Guatemala.** Publicación Guatemala 2008.
4. investinguatemala.org, consultado el 21-8-2009.
5. López Martínez, Germán. **Turbina de vapor para generación eléctrica.** Consultado en uamerica.edu.com, el 16-8-2009.
6. Mastrángelo, Sabino. **Conceptos de generación termoeléctrica: combustibles utilizados e impactos ambientales. Primera parte.** Consultado en cnea.gov.ar el 24-8-2009.
7. mem.gob.gt, consultado el 21-8-2009.
8. Wikipedia. **Generación de energía eléctrica.** Consultado en Wikipedia.org. el 16-8-2009.