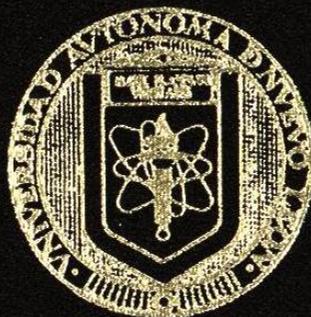


UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA



METODOLOGIAS PARA EL ANALISIS
ECONOMICO Y ELECTRICO DE
PLANTAS DE COGENERACION

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN INGENIERIA ELECTRICA

P R E S E N T A:

JOSE RAMON VEGA GALAZ

CD. UNIVERSITARIA

DICIEMBRE DE 1993

METODOLOGIAS PARA EL ANALISIS
ECONOMICO Y ELECTRICO DE
PLANTAS DE COGENERACION

TD
Z5853
.M2
FIME

1993

V4



1020070705

TD
Z5853
.H2
F1M4
1993
V4

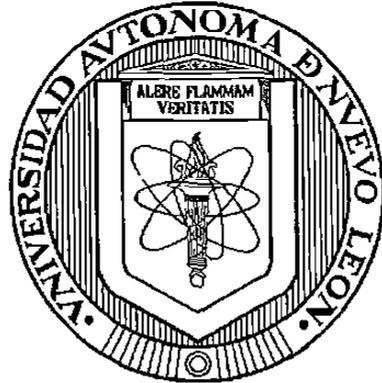


FONDO TESIS

32024

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



**METODOLOGÍAS PARA EL ANÁLISIS ECONÓMICO Y ELÉCTRICO DE
PLANTAS DE COGENERACIÓN**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN INGENIERÍA ELÉCTRICA**

PRESENTA

JOSÉ RAMÓN VEGA GALAZ

MONTERREY, N. L.

DICIEMBRE, 1993

METODOLOGÍAS PARA EL ANÁLISIS ECONÓMICO Y ELÉCTRICO DE PLANTAS DE COGENERACIÓN

Los miembros del Comité aprueban la Tesis
Doctoral de José Ramón Vega Galaz

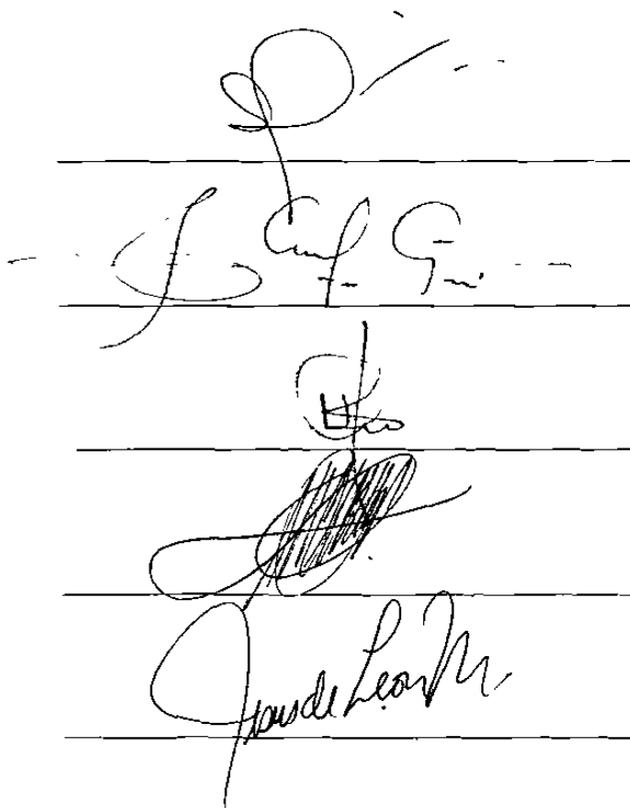
Dr. Salvador Acha Daza
Asesor

Dr. Florencio Aboytes García

Dr. Héctor Jorge Altuve Ferrer

Dr. Oscar Leonel Chacón Mondragón

Dr. Jesús de León Morales



The image shows four handwritten signatures, each written on a horizontal line. From top to bottom, the signatures correspond to the names listed on the left: Salvador Acha Daza, Florencio Aboytes García, Héctor Jorge Altuve Ferrer, and Oscar Leonel Chacón Mondragón. The signatures are written in black ink and are somewhat stylized and cursive.

Copyright © 1993 por José Ramón Vega Galaz
Reservados todos los derechos

A mis padres Ramón Vega Galaz y Cecilia Galaz de Vega. A mis hermanas y hermanos Martha Cecilia, María Guadalupe, Martín Manuel, Ricardo Francisco, Ramón y Juan Pablo. A todos mis parientes y amigos.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia por su paciencia a lo largo de este trabajo que ha esperado ansiosamente su terminación para *ya empezar a producir*.

Al Dr. Salvador Acha Daza, asesor de este trabajo por su continuo impulso, orientación y sugerencias. Igualmente al Dr. Florencio Aboytes García por sus sugerencias y asesoría a proyectos anteriores que de alguna manera están presentes en esta tesis. Al Dr. José Manuel Cañedo Castañeda y al Dr. Oscar Chacón Mondragón por los conocimientos que me transmitieron en las diferentes clases y conversaciones extraclases. De igual modo, extendiendo mi agradecimiento al Dr. Héctor Altuve Ferrer por sus acertados comentarios acerca del enfoque de la tesis y en particular sobre el tema de protecciones. Igualmente a los profesores de la especialidad en Control, especialmente al Dr. Jesús de León Morales por sus comentarios durante la revisión de la tesis.

Agradezco a las personas de Nylon de México, S. A. que me facilitaron información, comentarios y parte de su tiempo para realizar este trabajo. Especialmente al Ing. Carlos Ortiz De La Garza, Ing. Efraín Ramírez, Ing. Norma Aguirre, Ing. Juan Luis Arellanes y demás personal del departamento de proyectos y calderas.

Quisiera también agradecer todos los comentarios hechos a este trabajo por parte de los profesores y alumnos del Programa Doctoral en Ingeniería Eléctrica de la FIME-UANL, los cuales fueron de gran utilidad. A la Srita. Cristina Díaz Miranda por su colaboración en la elaboración de los dibujos y correcciones.

A los responsables y amigos de los Centros Universitarios Montesilla, Monte Real y Sierra Madre por su apoyo moral y bibliográfico en la realización de la tesis.

Finalmente agradezco al CONACYT el apoyo económico brindado para la realización de mis estudios de doctorado.

Diciembre de 1993

RESUMEN

METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS ECONÓMICO Y ELÉCTRICO DE PLANTAS DE COGENERACIÓN

Publicación No. ____

José Ramón Vega Galaz, Dr. en Ing.

Universidad Autónoma de Nuevo León, 1993

Profesor Asesor: Dr. Salvador Acha Daza

Se presenta una metodología para el análisis económico y eléctrico de plantas de cogeneración que utilizan turbinas de vapor.

La metodología para el análisis económico consta de tres partes: disponibilidad de energía de acuerdo a diferentes esquemas posibles para cogenerar, dimensionamiento de la planta y determinación de índices económicos. Además se incluye, dentro del procedimiento para determinar los índices económicos, el modo de calcular los ahorros que se obtienen en industrias con potencial para instalar sistemas de cogeneración, tomando en cuenta todas las alternativas consideradas para su implementación. Se describe como el cálculo de los índices económicos permiten visualizar la mejor de las alternativas en base a criterios aplicados sobre los resultados encontrados. Se incluye además, junto a esta metodología, la formulación del despacho económico partiendo de curvas de costos encontradas a partir de relaciones termodinámicas y una comparación de la relación costo-beneficio de plantas de cogeneración contra una convencional. Asimismo, se presenta un caso de estudio para ejemplificar el uso de la metodología económica.

La metodología para el análisis eléctrico trata específicamente de la operación de la planta en estado transitorio. Se proponen los estudios que deben hacerse y su finalidad, también se hacen algunas consideraciones sobre la problemática de las protecciones en plantas de cogeneración, así como sus diferentes modos en que puede operar y los disturbios a que puede estar sometida durante su operación. Para hacer esos estudios se utilizan modelos

matemáticos que describen el comportamiento dinámico de cada uno de los elementos que componen la planta de cogeneración y posteriormente son integrados según los casos que se deseen simular y analizar. Los componentes de la planta considerados en la modelación y simulación son: la caldera, la turbina y su control de velocidad, el generador eléctrico y sus controles de voltaje y estabilizador, la carga eléctrica y térmica. Los modelos son simulados en una computadora personal PC compatible utilizando el programa SIMNON®. La validación de los resultados de simulación se realiza en base a predicciones teóricas y a datos de experiencia de la operación del elemento o el conjunto de elementos simulados.

Finalmente se proporcionan las conclusiones, aportaciones y posibles trabajos futuros en esta misma línea de investigación.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	v
RESUMEN	vi
LISTA DE FIGURAS	xiii
LISTA DE TABLAS	xx

CAPÍTULOS

INTRODUCCIÓN	1
1.1 Motivación.....	1
1.1.1 Objetiva.....	2
1.1.2 Subjetiva	4
1.2 Consideraciones históricas y filosóficas acerca del conocimiento científico.....	6
1.2.1 Naturaleza del conocer científico	7
1.2.2 Las ciencias positivas.....	8
1.2.2.1 El método de las ciencias	9
1.2.2.2 Resumen histórico de la ciencia.....	11
1.2.2.3 Clasificación de las ciencias.....	13
1.2.3 Ubicación de la ingeniería en este contexto	15
1.2.4 Disciplinas y metodología involucradas en esta tesis.....	16
1.3 Estado actual de la investigación sobre plantas de cogeneración	17
1.3.1 Énfasis en aspectos térmicos y mecánicos	17
1.3.1.1 Tecnologías encaminadas a obtener mayor eficiencia.....	17
1.3.1.2 Análisis de los ciclos térmicos	18
1.3.2 Operación óptima de plantas de cogeneración.....	19
1.3.2.1 Uso de programación lineal (LP).....	19
1.3.2.2 Uso de programación lineal mezclada con entera (MILP).....	20
1.3.2.3 Uso de algoritmos computacionales	22
1.3.3 Cuestiones de análisis y diseño eléctrico.....	22

ÍNDICE (continuación)

1.3.3.1 Aspectos del diseño eléctrico de la planta.....	22
1.3.3.2 Análisis de sistemas eléctricos incluyendo cogeneradores	23
1.3.3.3 Aspectos de planeación, operación y seguridad	24
1.3.4 Cuestiones económicas de plantas de cogeneración.....	25
1.3.4.1 Uso de software.....	25
1.3.4.2 Trabajos misceláneos relacionados con cuestiones económicas	26
1.3.4.3 Aspectos políticos y económicos de plantas de cogeneración.....	26
1.3.4.4 Evaluación del precio de la energía eléctrica.....	27
1.3.5 Conclusiones de la revisión bibliográfica	27
1.4 Alcance y enfoque de la tesis	28
1.4.1 Estructura y contenido de la tesis.....	30
2. METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS ECONÓMICO.....	32
2.1 Introducción.....	32
2.2 Disponibilidad de energía para generar electricidad	33
2.2.1 Análisis del Ciclo Rankine	34
2.2.2 Indicadores del Rendimiento Térmico	41
2.2.2.1 Rendimiento Térmico.....	42
2.2.2.2 Razón de Calor	42
2.3 Capacidad de la planta de cogeneración.....	44
2.3.1 Formulación del problema	46
2.3.2 Comportamiento de la inversión	47
2.3.3 Costos de operación y mantenimiento	48
2.3.4 Costo integrado y capacidad mínima.....	50
2.4 Índices económicos	54
2.4.1 Posibles Alternativas.....	55
2.4.2 Estimación de ahorros	55
2.4.3 Indicadores Económicos: VPN, TIR, FRC, RI y DFE.....	60
2.4.3.1 El valor presente neto VPN.....	61
2.4.3.2 Tasa interna de rendimiento, TIR.	61
2.4.3.3 El factor de recuperación de capital FRC.	62
2.4.3.4 Retorno de la inversión RI.	63

ÍNDICE (continuación)

2.4.3.5 Descuento de flujos de efectivo, DFE.....	63
2.5 Comparación de costos entre una planta convencional y una cogeneración	64
2.6 Despacho económico de unidades cogeneratoras	67
2.7 Caso de estudio.....	72
3. METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS ELÉCTRICO.....	79
3.1 Introducción.....	79
3.2 Modelos utilizados para simular la planta.....	80
3.2.1 Modelo del generador eléctrico.....	80
3.2.1.1 Generador conectado a la compañía suministradora de energía eléctrica y con carga eléctrica local.....	81
3.2.1.2 Cogenerador independiente.....	84
3.2.1.3 Cogenerador conectado a la compañía suministradora de energía eléctrica sin carga eléctrica local.....	85
3.2.1.4 Modelo del sistema de excitación (SE).....	85
3.2.1.5 Modelo del sistema estabilizador (PSS).....	86
3.2.2 Modelos de turbinas de vapor (T) y su control de velocidad (SG).....	87
3.2.2.1 Turbina de contra-presión (TCP)	87
3.2.2.2 Turbina de extracción-condensado (TEC)	88
3.2.2.3 Sistema gobernador (SG).....	90
3.2.3 Modelo de la caldera y sus controles (B).....	92
3.2.4 Modelo de las cargas eléctricas y térmicas	97
3.2.4.1 Cargas eléctricas.....	97
3.2.4.2 Cargas térmicas	97
3.2.5 Verificación de los resultados de la simulación.....	98
3.3 Propuesta de la Metodología	100
3.3.1 Estudios a realizar y su finalidad	100
3.3.2 Problemática de la protección eléctrica en sistemas de cogeneración	102
3.3.3 Disturbios a estudiar	108
3.3.4 Modos de operación.....	110
3.4 Simulación del comportamiento eléctrico de la planta	111
3.4.1 Software y hardware utilizados en la simulación.....	112

ÍNDICE (continuación)

3.4.2 Consideraciones sobre los métodos numéricos	113
3.4.3 Algoritmo paso por paso para realizar la simulación de la planta	118
4. SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO ELÉCTRICO DE PLANTAS CON COGENERACIÓN	121
4.1 Cogenerador independiente con carga eléctrica local en terminales	121
4.1.1 Corto circuito trifásico en terminales del generador durante 0.27 seg., caso inestable	121
4.1.2 Corto circuito trifásico en terminales del generador durante 0.26 seg., caso estable	123
4.2 Cogenerador exportador con variaciones de voltaje en la barra infinita	123
4.2.1 Duración de la variación por 120 ciclos	123
4.2.2 Duración del disturbio por un período de 6 ciclos	125
4.3 Simulación de la caldera tipo domo aislada del sistema de cogeneración	126
4.4 Cogenerador exportador con carga local	128
4.4.1 Aumento en la carga eléctrica local en $t=10$ seg.	128
4.4.2 Cortocircuito trifásico en terminales del generador.....	130
4.4.3 Desconexión de la compañía eléctrica por un lapso de 0.32 seg.....	132
4.4.4 Disminución en la carga térmica.....	134
4.4.5 Aumento en la carga térmica.....	136
4.5 Cogenerador exportador sin carga eléctrica en terminales	139
4.5.1 Cortocircuito trifásico en terminales del generador durante 0.18 seg.	140
4.5.2 Variación de voltaje en la barra infinita a 0.5 p.u. durante 0.43 seg.....	141
4.5.3 Desconexión de la compañía eléctrica por 0.17 seg.	142
4.5.4 Toma de carga del generador sincronizado a la red	143
4.5.5 Simulación de arranque en frío.....	144
4.5.6 Variación de la carga térmica en forma de onda cuadrada	145
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	148
5.1 Conclusiones generales.....	148
5.1.1 Conclusiones del análisis económico	149
5.1.2 Conclusiones del análisis eléctrico.....	151

ÍNDICE (continuación)

5.2 Aportaciones.....	154
5.3 Recomendaciones para trabajos futuros.....	155
REFERENCIAS.....	156
APÉNDICES	177

LISTA DE FIGURAS

1.1	Algunos esquemas de motores primarios de plantas de cogeneración	29
2.1	Ciclo térmico Rankine para cogenerar energía eléctrica y térmica utilizando el vapor generado para la demanda de vapor del proceso, turbina de contra-presión (CP).....	34
2.2	Ciclo Rankine operando a flujo máximo de vapor utilizando turbina de extracción-condensado (EC).	34
2.3	Proceso de transformación del combustible a las formas térmica y eléctrica a través de los distintos elementos que componen la planta	35
2.4	Alternativa (c) del ciclo térmico para cogenerar energía eléctrica y térmica. Puede tener una turbina de contra-presión si la suma de los flujos de vapor es igual a la que requiere el proceso.....	36
2.5	Comportamiento de la eficiencia de la caldera contra flujo máximo	37
2.6	Eficiencia de una turbina para uso industrial a) contra-presión, b) con condensador.....	39
2.7	Comparación de la eficiencia térmica del ciclo convencional de generación de energía eléctrica contra plantas de cogeneración.....	44
2.8	Costo de construcción de una planta de cogeneración contra capacidad.....	45
2.9	Comportamiento del costo total comprando energía a la compañía suministradora de energía eléctrica y cogenerando	52
2.10	Flujo de vapor contra flujo de combustible. La pendiente es el factor de consumo, fc.	58

LISTA DE FIGURAS (continuación)

2.11	Comportamiento del ahorro para diferentes capacidades de generación.....	59
2.12	Distribución en el tiempo de los ahorros anuales producidos por la inversión en $n=0$	59
2.13	Potencia eléctrica generada en función del flujo de vapor para cada tipo de alternativa a comparar	64
2.14	Relación costo-beneficio para cada opción evaluada.	65
2.15	Costo por hora para una cogeneración con turbina EC. Flujo al proceso a 8 Kg/seg	69
2.16	Costo por hora para una cogeneración con turbina CP.....	70
2.17	Costo por hora para una cogeneración con turbina convencional.	70
2.18	Comparación del VPN contra interés para dos alternativas de cogeneración. a) turbina CP, b) turbina EC.....	77
2.19	Descuento de los flujos de efectivo para la turbina EC.....	78
2.20	Descuento de flujos de efectivo para el caso de la turbina CP.....	78
3.1	Diagrama unifilar del generador sin carga local conectado a la barra infinita.....	81
3.2	Esquema del cogenerador operando en forma aislada	84
3.3	Diagrama unifilar del generador sin carga local conectado a la barra infinita.....	85
3.4	Diagrama de bloques del sistema de excitación ST1 del IEEE.....	86

LISTA DE FIGURAS (continuación)

3.5	Diagrama esquemático de una turbina CP.....	87
3.6	Modelo de la turbina CP considerando el efecto de la caldera	88
3.7	Diagrama esquemático de la turbina	88
3.8	Diagrama de bloques de la turbina EC	88
3.9	Diagrama de bloques del sistema gobernador SG1 de velocidad para turbinas de vapor [41].....	90
3.10	Efecto de P_o sobre el tiempo de estabilización de la potencia mecánica (P_m)	91
3.11	Diagrama de bloques del sistema gobernador SG2 del IEEE [56].	92
3.12	Diagrama de bloques de la caldera usada para simulación en estudios de estabilidad	94
3.13	Diagrama de bloques de la caldera de la Fig. 3.12 representada en el dominio de Laplace.	95
3.14	Representación de los efectos de presión de la caldera tipo domo propuesta por IEEE [56]	96
3.15	Esquemas típicos de protección para generadores pequeños operando aislados en un (a) sistema de bajo voltaje (b) sistema de voltaje medio.	104
3.16	Esquemas típicos de protección para generadores de capacidad media.	104
3.17	Esquema típico de protección de un generador de gran capacidad.....	105

LISTA DE FIGURAS (continuación)

3.18 Simulación de un cogenerador exportador al desconectarse la compañía eléctrica por 1.5 seg.	107
3.19 Planta cogeneradora de pequeña capacidad interconectada con el sistema externo.....	108
3.20 Variación instantánea del voltaje en la línea de alimentación de la compañía suministradora de energía eléctrica.....	109
3.21 Esquema del cogenerador operando en forma aislada.....	110
3.22 Esquema del cogenerador operando en paralelo con la compañía suministradora de energía eléctrica.....	111
3.23 Esquema del cogenerador operando en paralelo con la compañía suministradora de energía eléctrica con carga eléctrica local.....	111
3.24 Esquema modular de la planta de Cogeneración mostrando las variables que interactúan entre los subsistemas.....	113
4.1 Cogenerador operando aislado. Comportamiento de variables cuando sucede un c.c. trifásico en terminales durante 0.27 seg. Inestable.....	122
4.2 Cogenerador independiente. Disturbio: corto circuito trifásico en terminales durante 0.26 seg. Permanece estable después del disturbio; tiempo en seg.....	122
4.3 Frecuencia y voltaje en terminales del generador para un abatimiento en el voltaje de la barra infinita a magnitud a) 0.8 y b) 0.0 durante 120 ciclos.....	124
4.4 Variación del voltaje de excitación , voltaje en terminales y potencia reactiva del cogenerador para un abatimiento en el voltaje de la barra infinita a 0.0 p.u. durante 120 ciclos; tiempo en seg.....	124

LISTA DE FIGURAS (continuación)

4.5	Variación de la frecuencia y voltaje en terminales del cogenerador para un abatimiento del voltaje en la barra infinita a valores de a) 0.9 y b) 0.0 durante 6 ciclos, tiempo en seg.	125
4.6	Variación del voltaje en terminales, voltaje de excitación y potencia reactiva del cogenerador para un abatimiento del voltaje en la barra infinita a valores de a) 0.9 y b) 0.0 durante 6 ciclos; tiempo en seg.	125
4.7	Resultados de simulación de la caldera tipo domo aislada del ciclo Rankine.	127
4.8	Resultados de simulación de la caldera tipo domo: Q, ms, Pman, Pt.....	127
4.9	Resultados de simulación del caso sección 4.4.1; cogenerador exportador, aumento de carga local; tiempo en seg.....	129
4.10	Resultados de simulación del caso sección 4.4.1; cogenerador exportador, aumento de carga local, tiempo en seg.....	130
4.11	Resultados de simulación del caso sección 4.4.2; cogenerador exportador, corto circuito trifásico en terminales; tiempo en seg.	131
4.12	Resultados de simulación del caso sección 4.4.2; cogenerador exportador corto circuito trifásico en terminales; tiempo en seg.	131
4.13	Resultados de simulación del caso sección 4.4.3; cogenerador exportador, desconexión de la compañía eléctrica; tiempo en seg.....	133
4.14	Resultados de simulación del caso sección 4.4.3; cogenerador exportador, desconexión de la compañía eléctrica; tiempo en seg.....	133
4.15	Resultados de simulación del caso sección 4.4.3; cogenerador exportador, desconexión de la compañía eléctrica; tiempo en seg.....	135

LISTA DE FIGURAS (continuación)

4.16	Resultados de simulación del caso sección 4.4.4; cogenerador exportador, disminución de la carga térmica; tiempo en seg.....	135
4.17	Resultados de simulación del caso 4.4.4; cogenerador exportador, disminución de la carga térmica, tiempo en seg.....	136
4.18	Resultados de simulación del caso sección 4.4.5; cogenerador exportador, aumento en la carga térmica.....	137
4.19	Resultados de simulación del caso sección 4.4.5; cogenerador exportador, aumento en la carga térmica; tiempo en seg.....	137
4.20	Resultados de simulación del caso sección 4.4.5; cogenerador exportador, aumento en la carga térmica; tiempo en seg.....	138
4.21	Resultados de simulación del caso sección 4.5.2; cogenerador exportador sin carga eléctrica local bajo corto circuito trifásico en terminales; tiempo en seg.....	140
4.22	Resultados de simulación del caso sección 4.5.2; cogenerador exportador sin carga eléctrica local bajo corto circuito trifásico en terminales; tiempo en seg.....	140
4.23	Resultados de simulación del caso sección 4.5.1; cogenerador exportador sin carga eléctrica local con variaciones de voltaje en la barra infinita; tiempo en seg....	141
4.24	Resultados de simulación del caso sección 4.5.1; cogenerador exportador sin carga eléctrica local con variaciones de voltaje en la barra infinita; tiempo en seg....	141
4.25	Resultados de simulación del caso sección 4.5.3; cogenerador exportador desconectado de la compañía eléctrica durante 0.17seg.....	142
4.26	Resultados de simulación del caso sección 4.5.3; cogenerador exportador desconectado de la compañía eléctrica durante 0.17seg.....	142

LISTA DE FIGURAS (continuación)

4.27	Resultados de simulación del caso sección 4.5.4; cogenerador sincronizado y tomando carga; tiempo en seg.	143
4.28	Resultados de simulación del caso sección 4.5.4; cogenerador sincronizado y tomando carga; tiempo en seg.	144
4.29	Resultados de simulación del caso sección 4.5.5; simulación de arranque en frío; tiempo en seg.	145
4.30	Resultados de simulación del caso sección 4.5.6; variación de la carga térmica; tiempo en seg.	146
4.31	Resultados de simulación del caso sección 4.5.6; variación de la carga térmica; tiempo en seg.	146

LISTA DE TABLAS

1.1	Posibles clasificaciones de ciencia.....	14
2.1	Términos que componen la ecuación del ahorro anual.....	66
2.2	Presión, temperatura, flujo máx., edad y volumen de combustible para fuego suplementario.....	85
2.3	Consumo de vapor del proceso, consumo de combustible de la caldera, consumo de energía eléctrica y demanda pico.....	87
2.4	Condiciones de operación del proceso térmico	87
2.5	Datos de operación del condensador de la turbina EC.....	88
2.6	Eficiencias de la caldera, la turbina y el generador.....	89
2.7	Resultados del análisis del ciclo Rankine.....	90
2.8	Datos de los combustibles y tarifa eléctrica.....	90
2.9	Costos de construcción, total y específico.....	91
2.10	Resumen de índices de potencias de generación usando aceite #6	92
2.11	Resumen de índices económicos.....	92
3.1	Representación de funciones de transferencia típicas en el dominio de Laplace y en el dominio del tiempo.....	86
3.2	Protecciones usadas en generadores industriales	103
3.3	Clasificación de generadores eléctricos de acuerdo a su capacidad	103