



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

ESCUELA DE POSTGRADO
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS

**“OPTIMIZACIÓN PREDICTIVA HÍBRIDA DE CENTRALES DE CICLO
COMBINADO”**

ROBERTO ESTEBAN ZÚÑIGA ROBLERO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN EVALUADORA

Sra. DORIS SÁEZ HUEICHAPAN, PROFESOR GUÍA
SR. LUIS VARGAS DÍAZ
SR. RODRIGO PALMA BEHNKE
SR. ALDO CIPRIANO ZAMORANO

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN
CIENCIAS DE LA INGENIERÍA, MENCIÓN ELÉCTRICA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA

SANTIAGO DE CHILE
MAYO, 2006

RESUMEN DE TESIS PARA OPTAR AL
GRADO DE MAGÍSTER EN INGENIERÍA
ELÉCTRICA
POR : ROBERTO ESTEBAN ZÚÑIGA ROBLERO.
FECHA : 01/05/2006
PROF. GUÍA : Sra. DORIS SÁEZ H.

OPTIMIZACIÓN PREDICTIVA HÍBRIDA DE CENTRALES DE CICLO COMBINADO.

En este trabajo se desarrolla un esquema de control predictivo híbrido para optimizar el funcionamiento de una central de ciclo combinado. La principal ventaja de este esquema es la capacidad de incorporar, a la vez, tanto características dinámicas como lógicas inherentes al funcionamiento de las centrales térmicas y además incluir restricciones operacionales que aseguran un funcionamiento seguro y robusto.

El diseño del controlador predictivo híbrido se basa en la modelación de cuatro elementos principales del proceso: El primer elemento tiene relación con capturar la dinámica asociada a la turbina de gas y a la turbina de vapor junto a sus correspondientes sistemas de control. Este elemento es particularmente interesante en el caso de la turbina a gas donde ciertas señales de control quedan determinadas mediante un proceso de conmutación, gobernado por sentencias lógicas. El segundo elemento está dado por los modos de partida, señales de encendido y apagado, y mínimos tiempos de encendido y apagado de las turbinas, los cuales son también representados a través de sentencias lógicas. El tercer elemento corresponde a las restricciones operacionales que permiten que el funcionamiento de la central térmica sea seguro. El último elemento corresponde a la acción de ciertos factores asociados a la ubicación geográfica de las centrales, los cuales tienden a modificar de manera importante la eficiencia de las turbinas. De estos factores, en este trabajo se considera, en forma novedosa, la acción que tiene la temperatura ambiente sobre la eficiencia de las centrales de ciclo combinado. Dicho efecto se modela mediante sistemas lineales a tramos y mediante un nuevo enfoque basado en lógica difusa que permite suavizar las transiciones entre modelos.

El controlador predictivo híbrido se diseñó para optimizar el funcionamiento de la central de ciclo combinado desde el punto de vista económico, es decir, maximizar las ganancias relativas a la operación del proceso junto con asegurar un funcionamiento adecuado del mismo. Para resolver esto, el nuevo controlador fue planteado como un problema de optimización lineal entera mixta para el cual existen herramientas de solución eficientes.

La evaluación del enfoque predictivo híbrido se realizó por simulación para una central de ciclo combinado con cogeneración mostrando resultados bastante interesantes, como la minimización del consumo de combustible, la decisión automática de la estrategia de encendido y apagado de las turbinas y el cumplimiento de restricciones lógicas. Posteriormente se efectuaron pruebas más complejas mediante la simulación de una central de ciclo combinado real, Nehuenco II (Quillota). En este caso el controlador mostró logros importantes como la determinación automática de las señales de encendido, la disminución del tiempo de asentamiento y sobreoscilaciones con respecto al esquema de control convencional, la aminoración del efecto de las variaciones de temperatura sobre la producción de potencia y la disminución en el consumo de combustible promedio en un 3%. Todo esto es destacable considerando que el proceso real consiste en un sistema de múltiples entradas y salidas junto con diversas condiciones lógicas de operación.

El trabajo futuro consiste en modelar el estrés térmico que sufren las turbinas durante el proceso de partida de manera de optimizar el proceso de partida. De esta forma se podrá disminuir el tiempo de partida y mejorar el funcionamiento completo del proceso.

A mis padres...

AGRADECIMIENTOS

Índice general

1. Introducción	10
2. Control Predictivo Basado en Modelo (MPC)	13
2.1. Modelación de Sistemas Híbridos	16
2.1.1. PieceWise Affine (PWA) Systems	16
2.1.2. Mixed Logical Dynamical (MLD) Systems	17
2.1.3. Linear Complementary (LC) Systems	17
2.1.4. Extended Linear Complementary (ELC) Systems	18
2.1.5. Min - Max - Plus - Scaling (MMPS) Systems	18
2.2. Descripción de Modelos MLD	19
2.2.1. Definición	20
2.2.2. Estabilidad de Sistemas MLD	21
2.3. Esquemas de Control para Sistemas Híbridos	21
2.3.1. Control Óptimo de Sistemas MLD	22
2.3.2. Control Predictivo Basado en Modelos MLD	23
3. Clases de Problemas de Optimización Entera-Mixta	27
3.1. Optimización Lineal Entera-Mixta	28
3.2. Optimización Cuadrática Entera-Mixta	29

ÍNDICE GENERAL

3.3.	Optimización de Funciones Lineales por Tramos [1]	30
3.4.	Aplicaciones: MPC	33
4.	Optimización de la Operación de una Central Térmica de Ciclo Combinado	41
4.1.	Descripción de Bloques Funcionales	42
4.1.1.	Turbina a Gas	43
4.1.2.	Caldera	44
4.1.3.	Turbina a Vapor	46
4.1.4.	Condensador	47
4.1.5.	Sistema de Agua de Alimentación	47
4.1.6.	Generador Eléctrico	48
4.2.	Control de Plantas de Ciclo Combinado	49
4.2.1.	Principales Lazos de Control	52
4.2.2.	Optimización del Proceso de Partida de una Central de Ciclo Combinado	52
4.3.	Modelación de la Central de Ciclo Combinado	54
4.3.1.	Dinámica de la Central de Ciclo Combinado	54
4.3.2.	Características Híbridas	56
4.3.3.	Modelo MLD de la Central Térmica de Ciclo Combinado	58
4.3.4.	Ampliación del Modelo Híbrido	62
4.4.	Transformación del Problema de Optimización Económica en un Problema de Control Predictivo Híbrido	71
4.4.1.	Costos	72
4.4.2.	Derivación del Problema de Optimización Entera-Mixta	75
4.4.3.	Experimentos	78
4.4.4.	Comentarios	90

ÍNDICE GENERAL

5. Optimización del Complejo Térmico Nehuenco	93
5.1. Descripción del Complejo Térmico Nehuenco	94
5.2. Descripción General de Nehuenco II	95
5.3. Modelación de Nehuenco II	97
5.3.1. Consideraciones Previas	98
5.3.2. Modelación de Turbina a Gas	99
5.3.3. Modelación del Sistema de Control de la Turbina a Gas	102
5.3.4. Modelación de Turbina a Vapor y su Sistema de Control	105
5.4. Modelación del Efecto de la Temperatura Ambiente	108
5.5. Estrategia de Control Supervisor Predictivo Híbrido	115
5.6. Pruebas por Simulación	120
5.6.1. Control de la Turbina a Gas	120
5.6.2. Control de la Turbina a Vapor	124
5.6.3. Control de Nehuenco II	127
5.7. Conclusiones y Análisis de Resultados	132
6. Discusión y Conclusiones	135
A. Demostración de Equivalencia	139
B. Transformación de un problema MILP a uno LP	142
C. Consideraciones Termodinámicas en la Operación de Máquinas Térmicas	146
D. Temperatura Ambiente: Integración en Esquema MLD	151
D.1. Modelación Lineal a Tramos: Caso Off-Line	151
D.2. Modelación Lineal a Tramos: Caso On-Line	152
D.3. Modelación Difusa: Caso Off-line	153

ÍNDICE GENERAL

D.4. Modelación Difusa: Caso On-line	154
E. Datos Utilizados en la Modelación de Nehuenco II	159
E.1. Turbina a Gas	159
E.2. Turbina a Vapor	161

Índice de figuras

3.1. Evolución del sistema(3.4.1): (a) Estado $x(t)$. (b) Valor de δ	37
3.2. Evolución de sistema con controlador MPC (Índice cuadrático)	38
3.3. Evolución de sistema bajo controlador MPC (Índice lineal a tramos)	39
3.4. Error de Seguimiento: (a) Caso MPC Cuadrático . (b) Caso MPC Lineal	39
4.1. Configuración Estándar de Central de Ciclo Combinado	42
4.2. Esquema de turbina a vapor	47
4.3. Sistema de agua de alimentación	48
4.4. Secuencia de partida de la turbina a gas de un ciclo combinado	51
4.5. Secuencia de partida de la turbina a vapor de un ciclo combinado	51
4.6. Diagrama de Bloques de una planta de CC con cogeneración	55
4.7. Eficiencia ciclo combinado usando agua refrigerada en torre de enfriamiento	64
4.8. Esquemas de modelación para turbina a gas	67
4.9. Esquemas de modelación para turbina a vapor	69
4.10. Mínimo horizonte de predicción	79
4.11. Cambio en mínimo horizonte de predicción	81
4.12. Penalización de las entradas	82
4.13. Mínimo tiempo de funcionamiento	83

ÍNDICE DE FIGURAS

4.14. Máximo tiempo de funcionamiento	84
4.15. Resultados al aplicar restricciones de rampa ($M = 3$)	85
4.16. Resultados al aplicar restricciones de rampa ($M = 8$)	85
4.17. Perfil de temperatura diario	86
4.18. Variaciones del consumo de combustible	87
4.19. Funciones de pertenencia para turbina a gas	88
4.20. Funciones de pertenencia para turbina a vapor	88
4.21. Variaciones del consumo de combustible	89
5.1. Esquema entrada-salida-control de turbina a gas	103
5.2. Esquema entrada-salida de turbina a vapor y sistema de control	106
5.3. Datos reales de la operación de la turbina a gas	108
5.4. Datos reales de la operación de la turbina a vapor	109
5.5. Datos reales de la operación de la turbina a gas	110
5.6. Datos reales de la operación de la turbina a gas	111
5.7. Concepto de Esquema de Control Supervisor	115
5.8. Control supervisor para Nehuenco II	119
5.9. Estrategia de control PID de turbina a gas	121
5.10. Estrategia de control predictivo híbrido de turbina a gas	122
5.11. Control predictivo híbrido de turbina a gas	123
5.12. Control PID de la turbina a vapor	124
5.13. Control predictivo híbrido de la turbina a vapor	126
5.14. Demanda eléctrica	127
5.15. Temperatura ambiente	128
5.16. Control supervisor predictivo híbrido: Variables controladas	130
5.17. Control supervisor predictivo híbrido: Variables manipuladas	130

ÍNDICE DE FIGURAS

5.18. Control supervisor predictivo híbrido: Variables de encendido (Superpuestas)	131
C.1. Diagrama temperatura-entropía.	147
C.2. Primer principio de la termodinámica	149
C.3. Comparación de Eficiencias Turbina a Gas Vs Ciclo Combinado	150
C.4. Eficiencia ciclo combinado usando agua refrigerada en torre de enfriamiento	150
E.1. Potencia eléctrica	159
E.2. Consumo de combustible	160
E.3. Flujo de aire que ingresa al compresor	160
E.4. Modelo potencia eléctrica	160
E.5. Modelo de temperatura de gases de escape	161
E.6. Potencia eléctrica	161
E.7. Flujo de vapor	162
E.8. Modelo potencia eléctrica	162

Índice de tablas

4.1. Diferentes modos de partida	57
4.2. Límites inferiores y superiores de referencias	78
4.3. Consumo de combustible en función de la temperatura ambiente para modelo PWM off-line	86
4.4. Consumo de combustible en función de la temperatura ambiente para modelo difuso off-line	89
4.5. Consumo de combustible en función de la temperatura ambiente para modelo PWM y difuso on-line	90
5.1. Información descriptiva del complejo térmico Nehuenco	94
5.2. Errores de identificación de turbina a gas	101
5.3. Errores de identificación de turbina a vapor	107
5.4. Comparación entre controladores	123
5.5. Sensibilidad con respecto al horizonte de predicción	132

Capítulo 1

Introducción

La modelación de sistemas dinámicos ha sido un tema fundamental en la teoría de control automático, ya que permite conocer su funcionamiento y sirve para predecir su comportamiento en el futuro. Para modelar un sistema se puede utilizar la modelación fenomenológica que tiene relación con utilizar conocimientos de las leyes físicas que gobiernan el proceso y plasmar este conocimiento en ecuaciones dinámicas que consideran parámetros y variables como entradas, salidas, estados, etc. Sin embargo, si la física que gobierna el proceso es demasiado compleja se puede realizar una modelación del proceso usando una segunda técnica que consiste en identificarlo a partir de la información contenida en los datos de entrada y salida del mismo. Ambos procedimientos han sido bastante estudiados y han permitido modelar sistemas lineales y no-lineales altamente complejos. Sin embargo, siempre han existido problemas en la modelación de sistemas que no están completamente definidos en términos de ecuaciones diferenciales o algebraicas. Por ejemplo, existen sistemas que utilizan condiciones lógicas durante su funcionamiento, las que no pueden ser incluidas en la física del proceso pues no son inherentes a él sino que forman parte del procedimiento estándar de operación que busca maximizar

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

las prestaciones del sistema en cuestión. Este tipo de sistemas que combinan características continuas y lógicas son conocidos como sistemas híbridos y han atraído la atención de la comunidad científica asociada a sistemas de control y ciencias computacionales durante los últimos años.

Las centrales termoeléctricas pertenecen a esta clase de sistemas, pues, a pesar del entendimiento que se tiene acerca de la termodinámica del proceso, no es posible modelar condiciones como "cuando la máquina ha estado inoperativa por más de k horas es necesario ponerla en marcha basándose en el procedimiento de partida fría; en caso contrario los materiales pueden sufrir fatiga mecánica". Esta clase de condiciones lógicas propias del funcionamiento de unidades electromecánicas puede ser incluido en estos nuevos esquemas de modelación y con ello lograr una mejor representación del sistema.

En este contexto, el objetivo principal de este trabajo consiste en optimizar económicamente el funcionamiento de una central de ciclo combinado, es decir, maximizar las ventas de energía eléctrica y minimizar los costos de operación de la central. Para ello se utiliza un controlador predictivo basado en un modelo híbrido, que considere los procesos de partida, operación normal y apagado. De esta forma se podrá disponer de un control integral que sea capaz de actuar de manera óptima en los distintos modos de operación del proceso en cuestión. La principal novedad de este controlador será la capacidad de reaccionar ante variaciones de la temperatura ambiente, las que afectan principalmente la eficiencia de las turbinas y la temperatura de los gases de escape de la turbina a gas.

El alcance de este trabajo tiene relación principalmente con mejorar el funcionamiento de la central mediante modificaciones en las referencias del sistema de control convencional de forma respetar el despacho económico junto a las restricciones

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

impuestas por las características constructivas de la misma.

Para abordar este problema se comienza estudiando la modelación y el control de sistemas híbridos cuyos resultados principales se muestran en el capítulo II. El capítulo III describe las metodologías actuales empleadas en la solución de problemas de optimización que involucran variables continuas y binarias, de manera de poder decidir cual será la estrategia que se utilizará para resolver el problema de optimización asociado al control predictivo híbrido. Luego se procede a estudiar el funcionamiento de las centrales de ciclo combinado, en particular sus bloques funcionales y modos de operación con el propósito de comenzar el proceso de modelación. Además, se estudia el efecto que tienen las variaciones de la temperatura ambiente en la eficiencia de las turbinas de gas y vapor. Los resultados del estudio se muestran en el capítulo IV. Finalmente se presenta una prueba, mediante simulaciones, de la eficacia de este esquema de control en una central de ciclo combinado real cuyos resultados son mostrados en el capítulo V.

Capítulo 2

Control Predictivo Basado en Modelo (MPC)

El control predictivo basado en modelo o MPC¹ [2] es una técnica de control bastante utilizada en control de procesos industriales complejos; su principal idea es considerar un modelo del proceso para predecir su comportamiento futuro al aplicarle una secuencia de acciones de control. Además, se necesita diseñar un funcional adecuado para los requerimientos de control que se deseen obtener. De esta manera, el controlador optimiza el funcional sujeto a la dinámica del modelo. Una representación matemática formal de la planta puede ser:

$$x(k+1) = f(x(k), u(k)), \quad x(0) = x_0. \quad (2.0.1)$$

donde $k > 0$ es el tiempo, $x(k) \in X$ define el estado del sistema y $u(k) \in U$ define las entradas del sistema. X y U son espacios definidos de manera adecuada.

Además, se considera una acción de control realimentada $\mu : X \rightarrow U$. El sistema

¹Del ingles Model Predictive Control

CAPÍTULO 2. CONTROL PREDICTIVO BASADO EN MODELO (MPC)

en lazo cerrado es entonces:

$$x(k+1) = F(x(k)) = f(x(k), \mu(x(k))), \quad x(0) = x_0. \quad (2.0.2)$$

La estrategia de control predictivo basado en modelo calcula la acción de control μ de la siguiente forma:

1. Dado $T > 0^2$, un funcional de costos es seleccionado.

$$J[\hat{x}(\cdot), \hat{u}(\cdot)] = \sum_{\tau=0}^{T-1} f_0(\hat{x}(\tau), \hat{u}(\tau)), \quad (2.0.3)$$

el cual debe estar bien definido para cada

$$\hat{x} : [0 : T - 1] \rightarrow X, \quad \hat{u} : [0 : T - 1] \rightarrow U. \quad (2.0.4)$$

2. Entonces, al tiempo $k > 0$, con $x(k) \in X$ el estado actual de la planta, se escoge

$$\mu(x(k)) = u^*(0), \quad (2.0.5)$$

donde la función $u^* : [0 : T - 1] \rightarrow U$ está dada por

$$u^* = \operatorname{argmin} J[\hat{x}(\cdot), \hat{u}(\cdot)], \quad (2.0.6)$$

s.a.

$$\hat{x}(\tau+1) = f(\hat{x}(\tau), \hat{u}(\tau)), \quad \tau \in [0 : T - 2],$$

$$\hat{x}(0) = x(k)$$

² T es conocido como horizonte de predicción.

CAPÍTULO 2. CONTROL PREDICTIVO BASADO EN MODELO (MPC)

Hoy en día existe una extensa literatura relativa a las propiedades de los controladores obtenidos mediante este procedimiento. En particular, existen resultados de estabilidad y robustez. En [3] se puede encontrar un resumen de dichas características.

Una de las grandes ventajas que posee esta técnica tiene relación con el hecho de incluir de manera natural restricciones operacionales, es decir, límites sobre distintas variables que actúan en el proceso de optimización. De esta forma se pueden agregar restricciones del tipo $\Delta u_{min} \leq \Delta u^* \leq \Delta u_{max}$, para poder evitar esfuerzos sobre los actuadores y prolongar su vida útil.

Claramente, el modelo predictivo a utilizar puede ser cualquiera, por ejemplo, algo sencillo como un modelo lineal o algo más complejo como una red neuronal o un modelo difuso. Sin embargo, el uso de modelos no-lineales implica que el proceso de optimización es no-lineal por lo que necesariamente se deben utilizar métodos iterativos para encontrar el óptimo del problema de optimización asociado lo que acarrea dificultades como caída en óptimos locales o esfuerzo computacional excesivo, dichas desventajas pueden impedir su aplicación en procesos reales. Estos tópicos serán abordados más adelante cuando se analicen los algoritmos de solución existentes.

En la siguiente sección se explican brevemente algunos de los esquemas de modelación que se han desarrollado para incluir variables dinámicas y condiciones lógicas. Cada uno de ellos ha sido usado frecuentemente en la modelación de esta clase de procesos y presentan ciertas características distintivas que los hacen particularmente interesantes en ciertas aplicaciones.

2.1. Modelación de Sistemas Híbridos

En la actualidad existen variados esquemas de modelación para realizar una representación unificada de los sistemas híbridos, algunos de los más importantes son:

2.1.1. PieceWise Affine (PWA) Systems

En [4] se presentan los sistemas lineales por tramos como una simple extensión de los modelos lineales y que permite la modelación de sistemas no-lineales con precisión arbitraria. Su formulación es la siguiente:

$$x(k+1) = A_i x(k) + B_i u(k) + f_i \quad (2.1.1)$$

$$y(k) = C_i x(k) + D_i u(k) + g_i$$

donde $[x(k), u(k)]^T \in \Omega_i$, con Ω_i un poliedro convexo (es decir, formado por una cantidad finita de inecuaciones) en el espacio de entrada/salida. Las variables $x(k) \in \mathbb{R}^n$, $u(k) \in \mathbb{R}^m$ e $y(k) \in \mathbb{R}^l$ denotan el estado, la entrada y la salida respectivamente.

Su estudio ha nacido debido a que constituyen la primera aproximación a la modelación de varios sistemas no lineales y procesos no suaves, además son capaces de tratar sistemas híbridos con precisión arbitraria.

2.1.2. Mixed Logical Dynamical (MLD) Systems

Esta clase de sistemas son introducidos en [5], su formulación es la siguiente:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + B_1u(k) + B_2\delta(k) + B_3z(k) \\ y(k) &= Cx(k) + D_1u(k) + D_2\delta(k) + D_3z(k) \\ E_1x(k) + E_2u(k) + E_3\delta(k) + E_4z(k) &\leq e_5 \end{aligned} \quad (2.1.2)$$

donde $x(k) = [x_r^T(k) \quad x_b^T(k)]^T$ con $x_r(k) \in \mathbb{R}^{n_r}$ y $x_b(k) \in \{0, 1\}^{n_b}$ ($y(k)$ y $u(k)$ tienen una estructura similar), y donde $z(k) \in \mathbb{R}^{r_r}$ y $\delta \in \{0, 1\}^{r_b}$ son variables auxiliares.

Para esta clase de sistemas existen varios resultados interesantes relativos a la modelación, control, estimación de estado y detección de fallas.

2.1.3. Linear Complementary (LC) Systems

Esta clase de sistemas son estudiados en [6]. La formulación de esta clase de sistemas es la siguiente:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + B_1u(k) + B_2\omega(k) \\ y(k) &= Cx(k) + D_1u(k) + D_2\omega(k) \\ v(k) &= E_1x(k) + E_2u(k) + E_3\omega(k) + e_4 \\ 0 &\leq v(k) \perp \omega(k) \leq 0 \end{aligned} \quad (2.1.3)$$

con $v(k), \omega(k) \in \mathbb{R}^s$ y donde \perp denota la ortogonalidad de vectores. $v(k)$ y $\omega(k)$ son llamadas las variables complementarias.

2.1.4. Extended Linear Complementary (ELC) Systems

La formulación de esta clase de sistemas es la siguiente:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + B_1u(k) + B_2d(k) \\ y(k) &= Cx(k) + D_1u(k) + D_2d(k) \\ E_1x(k) + E_2u(k) + E_3d(k) &\leq e_4 \end{aligned} \quad (2.1.4)$$

$$\sum_{i=1}^p \prod_{j \in \phi_i} (e_4 - E_1x(k) - E_2u(k) - E_3d(k))_j = 0 \quad (2.1.5)$$

donde $d(k) \in \mathbb{R}^r$ es una variable auxiliar.

Debido a la condición (2.1.4), (2.1.5) es equivalente a

$$\prod_{j \in \phi_i} (e_4 - E_1x(k) - E_2u(k) - E_3d(k))_j = 0$$

para cada i . Esto implica que (2.1.4) - (2.1.5) corresponden a un set de inecuaciones lineales, donde hay p grupos de inecuaciones (un grupo por cada set ϕ_i) tal que en cada grupo hay al menos una inecuación que debe mantenerse como igualdad.

2.1.5. Min - Max - Plus - Scaling (MMPS) Systems

Una expresión MMPS f de las variables es definida por la siguiente gramática:

$$f := x_i | \alpha | \max(f_k, f_l) | \min(f_k, f_l) | f_k + f_l | \beta f_k \quad (2.1.6)$$

con $i \in \{1 \dots n\}$, $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$ y f_k, f_l nuevamente expresiones MMPS. El símbolo $|$ corresponde al OR lógico y la definición es recursiva. Además debido a que $\min(f_k, f_l) = -\max(-f_k, -f_l)$, la función \min no es explícitamente necesaria.

Luego un sistema MMPS está descrito por

$$\begin{aligned}x(k+1) &= \mathcal{M}_x(x(k), u(k), d(k)) \\ y(k) &= \mathcal{M}_y(x(k), u(k), d(k))\end{aligned}\tag{2.1.7}$$

Además de la restricción:

$$\mathcal{M}_c(x(k), u(k), d(k)) \leq c\tag{2.1.8}$$

donde \mathcal{M}_x , \mathcal{M}_y y \mathcal{M}_c son expresiones MMPS en términos de las componentes de $x(k)$, $u(k)$ y la variable auxiliar $d(k)$.

Como se puede observar existen variados esquemas unificados para la modelación de sistemas híbridos, y por supuesto, tienen asociados resultados interesantes en variados tópicos relativos a estabilidad [5], observabilidad, controlabilidad [7], etc. Además, han existido avances importantes en la demostración de la equivalencia entre los distintos esquemas [8] lo que permite importar ciertos resultados desde un tipo de esquema a otro, posibilitando elegir el esquema más adecuado a la aplicación particular que se desea estudiar.

2.2. Descripción de Modelos MLD

Como se mencionó anteriormente, ya ha sido demostrada la equivalencia de una gran cantidad de clases de esquemas para modelar sistemas híbridos, por lo tanto, en este trabajo se utilizará sólo el esquema de modelación MLD. La elección se basa en la facilidad de incluir restricciones lógicas como inecuaciones que involucran variables continuas y cuantizadas, las que pueden ser naturalmente incluidas en un problema de optimización entera mixta.

2.2.1. Definición

Como ya se mencionó anteriormente, un modelo MLD tiene la siguiente estructura general:

$$x(k+1) = A_k x(k) + B_{1k} u(k) + B_{2k} \delta(k) + B_{3k} z(k) \quad (2.2.1a)$$

$$y(k) = C_k x(k) + D_{1k} u(k) + D_{2k} \delta(k) + D_{3k} z(k) \quad (2.2.1b)$$

$$E_{2k} \delta(k) + E_{3k} z(k) \leq E_{1k} u(k) + E_{4k} x(k) + E_{5k} \quad (2.2.1c)$$

con $k \in \mathbb{Z}$, $x = [x_c \ x_l]^T$, $x_c \in \mathbb{R}^{n_c}$, $x_l \in \{0, 1\}^{n_l}$, $n \triangleq n_c + n_l$ es el estado del sistema, cuyos componentes están distinguidos entre continuos x_c y 0-1 x_l . $y = [y_c \ y_l]^T$, $y_c \in \mathbb{R}^{p_c}$, $y_l \in \{0, 1\}^{p_l}$, $p \triangleq p_c + p_l$ es el vector de salida, $u = [u_c \ u_l]$, $u_c \in \mathbb{R}^{m_c}$, $u_l \in \{0, 1\}^{m_l}$, $m \triangleq m_c + m_l$ es la señal de entrada que contiene comandos continuos u_c y binarios u_l , quienes toman valores sobre un conjunto finito de reales modelados como secuencias de valores 0-1, $\delta \in \{0, 1\}^{r_l}$ y $z \in \mathbb{R}^{r_c}$ representando las variables auxiliares lógicas y continuas respectivamente.

El modelo descrito por las ecuaciones (2.2.1) involucra una dinámica lineal de tiempo discreto lo que corresponde a una restricción hecha a la forma del modelo debido a que permitirá obtener esquemas de control que pueden ser tratados computacionalmente mediante un algoritmo. Sin embargo, se cree que esta formulación puede permitir la descripción de una gran cantidad de clases de sistemas.

Una de las primeras discusiones que se plantea al examinar la naturaleza del sistema planteado en (2.2.1c), es que puede ser satisfecha por muchos valores de $\delta(t)$ y/o $z(t)$. Sin embargo, existen ciertas definiciones que permiten asegurar que la trayectoria que sigue el sistema debe ser única. En [5] se pueden encontrar las condiciones que debe cumplir un sistema para que su trayectoria sea única.

2.2.2. Estabilidad de Sistemas MLD

En el caso de definir la estabilidad de este tipo de sistemas se recurre a adaptar las definiciones estándares, pero tomando en cuenta que los estados están constituidos por variables reales y lógicas que evolucionan dentro de un polígono \mathcal{C} .

Definición 2.2.1. Un vector $x_e \in \mathbb{R}^{n_c} \times \{0, 1\}^{n_l}$ es considerado un estado de equilibrio para (2.2.1) y entrada $u_e \in \mathbb{R}^{m_c} \times \{0, 1\}^{m_l}$ si $[x_e' \ u_e'] \in \mathcal{C}$ y $x(t, t_0, x_e, u_e) = x_e, \forall t \geq t_0, \forall t_0 \in \mathbb{Z}$. El par (x_e, u_e) se dice ser un par de equilibrio.

Definición 2.2.2. Dado un par de equilibrio $(x_e, u_e), x_e \in \mathbb{R}^{n_c} \times \{0, 1\}^{n_l}$ se dice ser estable si, dado $t_0 \in \mathbb{Z}, \forall \epsilon > 0 \exists \delta(\epsilon, t_0)$ tal que $\|x_0 - x_e\| \leq \delta \Rightarrow \|x(t, t_0, x_0, u_e) - x_e\| \leq \epsilon, \forall t \geq t_0$.

Definición 2.2.3. Dado un par de equilibrio $(x_e, u_e), x_e \in \mathbb{R}^{n_c} \times \{0, 1\}^{n_l}$ se dice ser asintóticamente estable si x_e es estable y $\exists r > 0$ tal que $\forall x_0 \in B(x_e, r)$ y $\forall \epsilon > 0 \exists T(\epsilon, t_0)$ tal que $\|x(t, t_0, x_0, u_e) - x_e\| \leq \epsilon, \forall t \geq T$.

Definición 2.2.4. Dado un par de equilibrio $(x_e, u_e), x_e \in \mathbb{R}^{n_c} \times \{0, 1\}^{n_l}$ se dice ser exponencialmente estable si x_e es asintóticamente estable y $\exists \delta > 0, \alpha > 0, 0 \leq \beta < 1$ tal que $\forall x_0 \in B(x_e, \delta)$ y $\|x(t, t_0, x_0, u_e) - x_e\| \leq \alpha \beta^{t-t_0} \|x_0 - x_e\|$.

El estudio de la estabilidad de un modelo MLD no es una tarea sencilla y constituye un área de investigación actual. Resultados interesantes sobre este tópico se pueden encontrar en [9] y [10].

2.3. Esquemas de Control para Sistemas Híbridos

En las secciones anteriores se presentaron las principales características de los modelos MLD donde las características cuantizadas pueden ser modeladas por de-

sigualdades que involucran variables binarias y continuas. Esta descripción calza perfectamente en un esquema de control MPC, pues, las restricciones de desigualdad son fácilmente incluidas en él. Por ello, esta sección esta dedicada a estudiar algunos esquemas de control MPC que utilizan sistemas MLD como modelos predictivos.

2.3.1. Control Óptimo de Sistemas MLD

El problema que se quiere resolver es el siguiente: Dado un estado inicial x_0 y tiempo final T , encontrar la secuencia de control $u_0^{T-1} \triangleq \{u(0), u(1), \dots, u(T-1)\}$ que lleva el estado desde x_0 hasta x_f y que minimiza el siguiente índice de desempeño:

$$\begin{aligned}
 J(u_0^{T-1}, x_0) \triangleq & \sum_{k=0}^{T-1} \|u(k) - u_f\|_{Q_1}^2 + \|\delta(k, x_0, u_0^k) - \delta_f\|_{Q_2}^2 + \\
 & \|z(k, x_0, u_0^k) - z_f\|_{Q_3}^2 + \|x(k, x_0, u_0^{k-1}) - x_f\|_{Q_4}^2 + \\
 & \|y(k, x_0, u_0^{k-1}) - y_f\|_{Q_5}^2
 \end{aligned} \tag{2.3.1}$$

s.a.

$$x(T, x_0, u_0^{T-1}) = x_f$$

y al sistema MLD definido en (2.2.1) donde $\|x\|_Q^2 \triangleq x'Qx$, $Q_i = Q_i' \geq 0$, $i = 1, \dots, 5$ son matrices ponderadoras, y x_f, u_f, δ_f, y_f son vectores referencias.

Este problema es resuelto utilizando programación cuadrática entera mixta, pues si $x(k)$ es la notación compacta de $x(k, x_0, u_0^{k-1})$ y se utiliza la misma convención para $\delta(k)$, $z(k)$ se puede obtener la solución para el sistema definido en la ecuación

(2.2.1a) (caso sistema lineal invariante en el tiempo):

$$x(k) = A^k x_0 + \sum_{i=0}^{k-1} A^i [B_1 u(k-1-i) + B_2 \delta(k-1-i) + B_3 z(k-1-i)] \quad (2.3.2)$$

donde la relación entre $x(k)$ y x_0, u_0^{k-1} es sólo aparentemente lineal, porque $\delta(k), z(k)$ ocultan la dependencia no lineal sobre x_0 y u_0^{k-1} . Reemplazando la ecuación (2.3.2) en las ecuaciones (2.2.1c) y (2.3.2), y definiendo los vectores

$$\Omega \triangleq \begin{bmatrix} u(0) \\ \vdots \\ u(T-1) \end{bmatrix}, \quad \Delta \triangleq \begin{bmatrix} \delta(0) \\ \vdots \\ \delta(T-1) \end{bmatrix}, \quad \Xi \triangleq \begin{bmatrix} z(0) \\ \vdots \\ z(T-1) \end{bmatrix}, \quad \mathcal{V} \triangleq \begin{bmatrix} \Omega \\ \Delta \\ \Xi \end{bmatrix}$$

se obtiene la siguiente formulación equivalente

$$\begin{aligned} \min_{\mathcal{V}} \quad & \mathcal{V}' S_1 \mathcal{V} + 2(S_2 + x_0' S_3) \mathcal{V} \\ \text{s.a.} \quad & F_1 \mathcal{V} \leq F_2 + F_3 x_0, \end{aligned} \quad (2.3.3)$$

donde las matrices $S_i, F_i, i = 1, 2, 3$, están definidas adecuadamente. Entonces la existencia, unicidad, y continuidad con respecto a x_0 de la secuencia de control óptimo puede ser investigada como factible, única y continua con respecto a los parámetros de la solución de un problema MIQP (Mixed Integer Quadratic Problem). La demostración de (2.3.3) se presenta en el apéndice A.

2.3.2. Control Predictivo Basado en Modelos MLD

La principal idea del control predictivo [5] consiste en usar un modelo para predecir la evolución futura del sistema. Basado en dicha predicción, a cada paso de

tiempo k el controlador selecciona la secuencia de futuras entradas a través de una optimización en línea que apunta a maximizar el desempeño de seguimiento mientras se le obliga a respetar ciertas restricciones. Sólo la primera muestra de la secuencia óptima es aplicada a la planta en el tiempo k . En el tiempo $k + 1$ una nueva secuencia es evaluada para reemplazar la anterior.

La formulación considera un par de equilibrio (x_e, u_e) y sea (δ_e, z_e) definitivamente admisible, es decir, que pueden ser alcanzados por el sistema. Sean los componentes $\delta_{e,i}, z_{e,j}, i \notin \mathcal{I}, j \notin \mathcal{J}$, corresponden a los valores de régimen permanente para las variables auxiliares. Sea t el tiempo actual, y $x(t)$ el estado actual. Considere el siguiente problema de optimización

$$J(v_0^{T-1}, x(t)) \triangleq \sum_{k=0}^{T-1} \|v(k) - u_e\|_{Q_1}^2 + \|\delta(k|t) - \delta_e\|_{Q_2}^2 + \|z(k|t) - z_e\|_{Q_3}^2 + \|x(k|t) - x_e\|_{Q_4}^2 + \|y(k|t) - y_e\|_{Q_5}^2 \quad (2.3.4)$$

$$\text{s.a } \begin{cases} x(T|t) = x_e \\ x(k+1|t) = Ax(k|t) + B_1v(k) + B_2\delta(k|t) + B_3z(k|t) \\ y(k|t) = Cx(k|t) + D_1v(k) + D_2\delta(k|t) + D_3z(k|t) \\ E_2\delta(k|t) + E_3z(k|t) \leq E_1v(k) + E_4x(k|t) + E_5 \end{cases} \quad (2.3.5)$$

Donde $Q_1 = Q'_1 > 0, Q_2 = Q'_2 \geq 0, Q_3 = Q'_3 \geq 0, Q_4 = Q'_4 > 0, Q_5 = Q'_5 \geq 0, x(k|t) = x(t+k, x(t), v_0^{k-1})$, y $\delta(k|t), z(k|t), y(k|t)$ están definidas de manera similar³. Asumiendo por el momento que la solución óptima $\{v_t^*(k)\}_{k=0, \dots, T-1}$ existe. De

³ Q' corresponde a la traspuesta de Q

CAPÍTULO 2. CONTROL PREDICTIVO BASADO EN MODELO (MPC)

acuerdo con la filosofía del horizonte móvil ("receding horizon") se obliga a que

$$u(t) = v_t^*(0) \quad (2.3.6)$$

descartando las siguientes entradas óptimas $v_t^*(1), \dots, v_t^*(T-1)$, y se repite el problema de optimización completo en el instante $t + 1$. La señal de control obtenida por (2.3.4) - (2.3.6) será llamada como la ley de control predictiva entera mixta (mixed integer predictive control) MIPC.

La estrategia de control MPC ha demostrado ser una estrategia efectiva de control con un gran rango de aplicación en la industria, por ejemplo: Sistemas con gran retardo, sistemas de fase no mínima, sistemas inestables, sistemas multivariables y sistemas con restricciones. Para el caso del funcional citado en (2.3.4) el vector de optimización es el siguiente:

$$\mathcal{X} = \left[u(k), \dots, u(k + N - 1), \delta(k), \dots, \delta(k + N - 1), z(k), \dots, z(k + N - 1) \right]^T \quad (2.3.7)$$

y el número de variables a optimizar es $L = N(m_l + r_l)^4$, con N una cierta función.

En el peor de los casos el tiempo de optimización se incrementa exponencialmente con el número de variables binarias de optimización, es por ello que en la literatura especializada se pueden encontrar ejemplos de control predictivo aplicado a sistemas híbridos donde los aportes principales tienen relación con nuevas aplicaciones ó nuevos algoritmos de solución destinados a minimizar el tiempo empleado en resolver el problema de optimización.

Como se puede observar, un punto muy importante para poder aplicar control predictivo a una planta tiene relación con poder resolver el problema de opti-

⁴De acuerdo a la notación utilizada en 2.2.1

CAPÍTULO 2. CONTROL PREDICTIVO BASADO EN MODELO (MPC)

mización asociado. Es por ello que se dedicará un capítulo especial a estudiar los problemas de optimización que están más relacionados con los funcionales típicamente usados en aplicaciones de control.

Capítulo 3

Clases de Problemas de Optimización

Entera-Mixta

Un problema de optimización entera mixta se caracteriza por un funcional y restricciones que contienen variables continuas y cuantizadas. Por ello, no es posible utilizar los clásicos métodos iterativos basados en el gradiente y ha sido necesario crear nuevos algoritmos ad-hoc. En general, los métodos más utilizados para solucionar esta clase de problemas combinan métodos iterativos basados en gradiente con sistemas de búsqueda del tipo arboles de decisión. Por supuesto, también ha sido necesario explotar cierta estructura que tiene el problema para construir algoritmos especializados, por ello no es raro encontrar ciertas herramientas especializadas ("solvers") para problemas de optimización lineal entera-mixta u optimización cuadrática entera mixta, etc. A continuación, se presenta una descripción general de los algoritmos más populares y una más detallada del algoritmo que se utilizará para la aplicación desarrollada en este trabajo.

3.1. Optimización Lineal Entera-Mixta

Esta clase de problema se caracteriza por tener un funcional objetivo lineal junto a restricciones lineales, es decir:

$$\min \quad px \quad (3.1.1)$$

$$s.a.$$

$$Ax \leq b$$

donde x corresponde al vector de optimización que está constituido por variables continuas y enteras, p es un vector columna de escalares, A y b son matrices de dimensiones adecuadas que condensan las restricciones del problema.

Para encontrar el óptimo de esta clase de problemas se utiliza una combinación entre el método "simplex", que corresponde al método clásico de búsqueda de la solución en programación lineal, y "Branch and Bound" que es un algoritmo que permite crear ramas de búsqueda y se utiliza para encontrar soluciones enteras. Esta combinación permite encontrar una solución óptima que este compuesta de una parte real y otra entera.

Una de las problemáticas existentes en la búsqueda de soluciones para esta clase de problemas es que el algoritmo "Branch and Bound" puede llegar a generar una gran cantidad de ramas de búsqueda y ello implica que el tiempo de solución se incremente exponencialmente con la cantidad de variables enteras que tenga el problema de optimización.

Otro punto interesante es que este tipo de problema ha sido generalizado al caso en que la función objetivo es lineal por tramos o corresponde a una suma de funciones lineales por tramos [1], es decir, el problema de optimización toma la siguiente

forma:

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{i=1}^m k_i p_i(x) & (3.1.2) \\ \text{s.a.} \quad & \\ & Ax \leq b \end{aligned}$$

donde $x = [x_1 \cdots x_m]^T$ es el vector de optimización, $k_i, i = 1 \dots m$ son coeficientes escalares, $p_i(x), i = 1 \dots m$ son funciones lineales por tramos definidas sobre el vector de optimización. Este problema también puede ser resuelto de forma similar a la recién descrita.

3.2. Optimización Cuadrática Entera-Mixta

Este problema está caracterizado por la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \min \quad & x^T H x + f x & (3.2.1) \\ \text{s.a.} \quad & \\ & Ax \leq b \end{aligned}$$

donde x es el vector de optimización que involucra variables enteras y continuas, H y f son matrices de dimensiones adecuadas. A y b también son matrices de dimensiones adecuadas que sintetizan las restricciones asociadas al problema.

Uno de los algoritmos más utilizados para resolver esta clase de problemas es "Branch and Bound", cuyo funcionamiento está basado en resolver primero un problema relajado donde toda variable se asume continua y luego se adjuntan restricciones de cotas sobre las variables que debiesen ser cuantizadas generando ramas

de búsqueda. Una descripción detallada del algoritmo se puede encontrar en [11].

La característica que hace a este problema complejo es que corresponde a una clase de problemas "NP-Hard", es decir, el tiempo utilizado en resolverlo aumenta exponencialmente con el número de variables de optimización. El algoritmo "Branch and Bound" es capaz de encontrar la solución óptima, pero el número de iteraciones puede ser muy grande lo que puede dificultar su aplicación en problemas de control.

Alternativas a este método son, por ejemplo, enumeración explícita que consiste en enumerar todas las posibles combinaciones de solución y usar la que minimice el funcional objetivo, pero esta solución no se considera en problemas complejos debido al gran esfuerzo computacional asociado; aplicación de algoritmos genéticos también puede ser una alternativa, pero no se asegura la obtención del óptimo global, en un número finito de iteraciones, usando esta técnica.

3.3. Optimización de Funciones Lineales por Tramos [1]

Esta sección está dedicada a brindar una explicación profunda sobre como se pueden optimizar funciones lineales por tramos cuando las restricciones son lineales, ya que este desarrollo se utilizará posteriormente. Para ello, se supone que existe una función de costos compuesta por m funciones lineales por tramos, así el problema toma la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{i=1}^m k_i p_i(x_i) \\ \text{s.a.} \quad & \\ & Ax \leq b \end{aligned} \tag{3.3.1}$$

CAPÍTULO 3. CLASES DE PROBLEMAS DE OPTIMIZACIÓN ENTERA-MIXTA

donde $k_i, i = 1, \dots, m$ son escalares, $p_i(x_i), i = 1, \dots, m$ son funciones lineales que están definidas sobre la variable real x_i , A y B son matrices adecuadas que definen la región factible para la variable real $x_i, i = 1, \dots, m$. La i -ésima función lineal por tramos $p_i(x_i)$ está compuesta por n_i funciones lineales:

$$p_i(x_i) = \begin{cases} a_{i,1}x_i + b_{i,1} & \text{if } x_i \in [l_{i,1}, u_{i,1}] \\ a_{i,2}x_i + b_{i,2} & \text{if } x_i \in [u_{i,1}, u_{i,2}] \\ \vdots & \vdots \\ a_{i,n_i}x_i + b_{i,n_i} & \text{if } x_i \in [u_{i,n_i-1}, u_{i,n_i}] \end{cases}, i = 1, \dots, m \quad (3.3.2)$$

Para poder obtener la formulación lineal entera-mixta (o MILP, en inglés) de este problema es necesario introducir variables auxiliares lógicas y reales. La cantidad de variables auxiliares es $n_i - 1$ reales y $n_i - 1$ lógicas para cada función $p_i(x_i)$.

Las variables lógicas δ se definen de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \delta_{i,1} = 1 &\iff x_i \geq u_{i,1} \\ \delta_{i,2} = 1 &\iff x_i \geq u_{i,2} \\ &\vdots \\ \delta_{i,n_i-1} = 1 &\iff x_i \geq u_{i,n_i-1} \end{aligned} \quad (3.3.3)$$

Las variables lógicas $\delta_{i,j}, i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n_i - 1$ están relacionadas por las siguientes ecuaciones:

$$\delta_{i,j} = 1 \implies \delta_{i,s} = 1 \quad \forall s < j, j = 2, \dots, n_i - 1 \quad i = 1, \dots, m \quad (3.3.4)$$

CAPÍTULO 3. CLASES DE PROBLEMAS DE OPTIMIZACIÓN ENTERA-MIXTA

Ahora se definen las variables reales z de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 z_{i,1} &= \begin{cases} \text{if } \delta_{i,1} = 1, a_{i,2}x_i + b_{i,2} \\ \text{else} & a_{i,1}x_i + b_{i,1} \end{cases} \\
 z_{i,2} &= \begin{cases} \text{if } \delta_{i,2} = 1, (a_{i,3} - a_{i,2})x_i + (b_{i,3} - b_{i,2}) \\ \text{else} & 0 \end{cases} \\
 &\vdots \\
 z_{i,n_i-1} &= \begin{cases} \text{if } \delta_{i,n_i-1} = 1, (a_{i,n_i} - a_{i,n_i-1})x_i + (b_{i,n_i} - b_{i,n_i-1}) \\ \text{else} & 0 \end{cases}
 \end{aligned}$$

Finalmente se define la variable real \tilde{z}_i dada por la suma de las variables $z_{i,j}, j = 1, \dots, n_i - 1$:

$$\tilde{z}_i = z_{i,1} + z_{i,2} + \dots + z_{i,n_i-1}. \quad (3.3.5)$$

De esta forma es posible transformar el problema inicial (3.3.1) a un problema MILP:

$$\min \quad KV \quad (3.3.6)$$

s.a.

$$FV \leq G$$

donde:

$$V = \begin{bmatrix} V' \\ V'' \end{bmatrix}, \quad V' = \begin{bmatrix} \tilde{z}_1 \\ \vdots \\ \tilde{z}_m \\ z_{1,1} \\ \vdots \\ z_{1,n_1-1} \\ z_{2,1} \\ \vdots \\ z_{2,n_2-1} \\ \vdots \\ z_{m,1} \\ \vdots \\ z_{m,n_m-1} \end{bmatrix}, \quad V'' = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_m \\ \delta_{1,1} \\ \vdots \\ \delta_{1,n_1-1} \\ \delta_{2,1} \\ \vdots \\ \delta_{2,n_2-1} \\ \vdots \\ \delta_{m,1} \\ \vdots \\ \delta_{m,n_m-1} \end{bmatrix} \quad (3.3.7)$$

$K = [k_1 \dots k_m \dots 0]$, donde el número de ceros es igual a $\sum_{i=1}^m 2(n_i - 1) + 1$. F y G son matrices de dimensiones adecuadas que consideran la restricción $Ax \leq B$ y las inecuaciones enteras mixtas.

3.4. Aplicaciones: MPC

Las técnicas de optimización anteriormente descritas serán evaluadas en un problema simple para poder compararlas y elegir cual será finalmente utilizada en la aplicación más compleja que corresponde al control de la planta de ciclo combinado.

El ejemplo se basa en construir un controlador predictivo para el siguiente sistema [5]:

$$x(t+1) = 0,8 \begin{bmatrix} \cos(\alpha(t)) - \sin(\alpha(t)) \\ \sin(\alpha(t)) \cos(\alpha(t)) \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t) \quad (3.4.1a)$$

$$y(t) = [1 \ 0]x(t) \quad (3.4.1b)$$

$$\alpha(t) = \begin{cases} \frac{\pi}{3} & \text{if } [1 \ 0]x(t) \geq 0 \\ -\frac{\pi}{3} & \text{if } [1 \ 0]x(t) < 0 \end{cases} \quad (3.4.1c)$$

$$x(t) \in [-10, 10] \times [-10, 10] \quad (3.4.1d)$$

$$u(t) \in [-1, 1] \quad (3.4.1e)$$

En este caso es necesario utilizar una variable binaria δ que está asociada a la sentencia $\delta = 1 \Leftrightarrow [1 \ 0]x(t) \geq 0$.

Con ello es posible definir el estado $x(t+1)$ como la suma de dos funciones, es decir:

$$x_1(t+1) = z_1(t) + z_3(t)$$

$$x_2(t+1) = z_2(t) + z_4(t)$$

$$z_1(t) = \delta(t)f_{11}(t)$$

$$z_2(t) = \delta(t)f_{21}(t)$$

$$z_3(t) = (1 - \delta(t))f_{12}(t)$$

$$z_4(t) = (1 - \delta(t))f_{22}(t)$$

donde $f_{11}(t)$ corresponde a la función que determina el estado de x_1 en el siguiente instante cuando $[1 \ 0]x(t) \geq 0$, en caso contrario la función utilizada es f_{12} . El significado de f_{21} y f_{22} es análogo para la evolución de x_2 .

CAPÍTULO 3. CLASES DE PROBLEMAS DE OPTIMIZACIÓN ENTERA-MIXTA

Las variables que llevan asociadas desigualdades enteras mixtas son z_1, z_2, z_3 y z_4 pues corresponden a multiplicaciones entre variables continuas y binarias. Su formulación entera mixta es la siguiente:

$$\begin{aligned}z &= \delta f(x) \\z &\leq M\delta, \\z &\geq m\delta, \\z &\leq f(x) - m(1 - \delta), \\z &\geq f(x) - M(1 - \delta),\end{aligned}$$

en el caso de que $z = (1 - \delta)f(x)$, simplemente se reemplaza δ por $1 - \delta$ para obtener su formulación entera mixta.

Además es necesario modelar la condición $\delta = 1 \iff [1 \ 0]x(t) \geq 0$, la cual es realizada considerando $f(x) = [1 \ 0]x(t)$, luego:

$$\begin{aligned}\delta = 1 &\iff f(x) \geq 0 \\-m\delta &\leq f(x) - m \\-(M + \epsilon)\delta &\leq -f(x) - \epsilon\end{aligned}$$

donde M y m corresponde al máximo y mínimo de $f(x)$, respectivamente y ϵ corresponde a un escalar real positivo pequeño.

Finalmente se puede transformar el sistema (3.4.1) a un esquema MLD:

$$\begin{aligned}x(t + 1) &= [I \ I]z(t) \\y(t) &= [1 \ 0]x(t)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} -10 \\ -10 - \epsilon \\ -M_x \\ -M_x \\ M_x \\ M_x \\ M_x \\ M_x \\ -M_x \\ -M_x \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \delta + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ I & 0 \\ -I & 0 \\ 0 & I \\ 0 & -I \\ I & 0 \\ -I & 0 \\ 0 & I \\ 0 & -I \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} z(t) \leq \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ B \\ -B \\ B \\ -B \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ -1 \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ A_1 \\ -A_1 \\ A_2 \\ -A_2 \\ I \\ -I \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 10 \\ -\epsilon \\ 0 \\ 0 \\ M_x \\ M_x \\ M_x \\ M_x \\ 0 \\ 0 \\ N \\ N \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.4.2a)
 \end{aligned}$$

donde $B = [0 \ 1]'$, A_1 y A_2 son obtenidas de (3.4.1) cuando $\alpha = \frac{\pi}{3}, -\frac{\pi}{3}$, respectivamente. $M_x = 4(1 + \sqrt{3})[1 \ 0]' + B$ y $N = 10[1 \ 0]'$. $z = [z_1 z_2 z_3 z_4]'$ y ϵ es una constante positiva pequeña.

Como se puede observar, el sistema que parecía simple en su forma original (Lineal por tramos) toma una forma bastante más compleja al ser transformado a MLD. Esto se refleja claramente en la cantidad de desigualdades asociadas a las variables auxiliares, i.e., δ y z . Sin embargo, estas pueden ser fácilmente incluidas en esquemas de control MPC como restricciones sobre la optimización del funcional.

Es necesario recalcar que se debe definir el dominio donde el sistema antes descrito evolucionará de manera de poder calcular ciertos parámetros requeridos para llevar a cabo la transformación a MLD.

La evolución del sistema partiendo de $x(0) = [1 \ 0]$ y $u(t) \equiv 0$ es la siguiente:

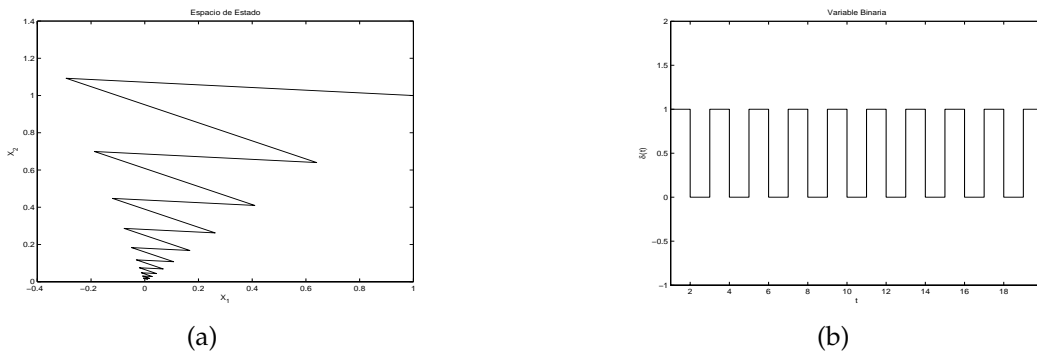


Figura 3.1: Evolución del sistema(3.4.1): (a) Estado $x(t)$. (b) Valor de δ

Como se puede observar el sistema es estable, en lo que se refiere a las variables continuas, pero no en las discretas ya que δ se mantiene oscilante. Ahora se formularán 2 controladores MPC, uno considerará un funcional a minimizar cuadrático y el otro uno lineal por tramos.

- Control MPC usando funcional cuadrático:

En este caso el problema de optimización es el siguiente:

$$\begin{aligned}
 & \text{Min} \sum_{i=1}^T (y(t+i) - r)^2 + \lambda u(t+i-1)^2 \\
 & \text{S.A. Sistema (3.4.2)}
 \end{aligned} \tag{3.4.3}$$

Se escogió $T = 2$ y $\lambda = 0,1$ para realizar la simulación [5].

Los resultados de la figura 3.2 muestran que el controlador MPC es capaz de hacer que el sistema siga la referencia $\sin(t/8)$. Sin embargo los "peaks" no pueden ser alcanzados debido a la restricción existente sobre $u(t)$. Acerca del problema de optimización, el vector de optimización tiene un largo de $8T - 1$ variables, donde sólo $T - 1$ son binarias y la cantidad de restricciones son $26T$.

El tiempo de simulación escogido fue de 120 segundos y el tiempo de ejecución fue de 30 segundos.

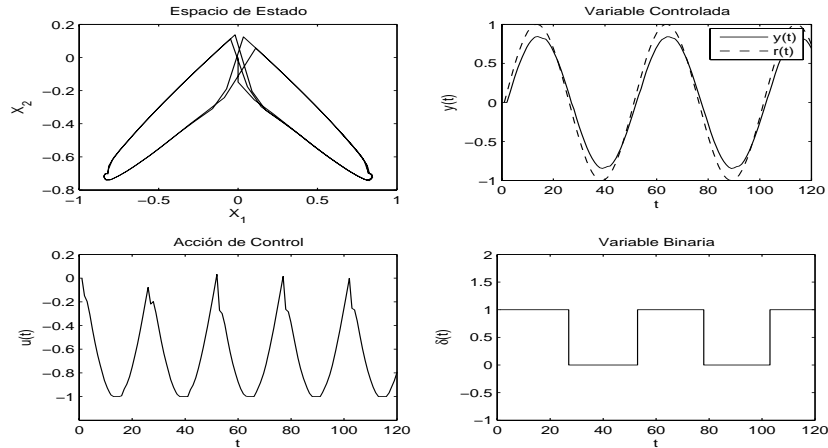


Figura 3.2: Evolución de sistema con controlador MPC (Índice cuadrático)

- Control MPC usando funcional lineal a tramos:

En este caso el problema de optimización¹ es el siguiente:

$$\begin{aligned}
 & \text{Min} \sum_{i=1}^T |y(t+i) - r| + \lambda |u(t+i-1)| \\
 & \text{S.A. Sistema (3.4.2)}
 \end{aligned} \tag{3.4.4}$$

Se escogió $T = 2$ y $\lambda = 0,1$ para realizar la simulación.

En la figura 3.3 se puede observar que el controlador MPC también es capaz de llevar el sistema a la referencia, excepto durante los "peaks", lo que también se explica por la restricción existente sobre $u(t)$. Acerca del problema de optimización, el vector de optimización tiene un largo de $14T - 1$ variables, donde $3T - 1$ son binarias y la cantidad de restricciones son $42T$. El tiempo de

¹Se utilizó el procedimiento mostrado en la sección 3.3 para transformar la función valor absoluto a su expresión lineal

CAPÍTULO 3. CLASES DE PROBLEMAS DE OPTIMIZACIÓN ENTERA-MIXTA

simulación escogido fue de 120 segundos y el tiempo de ejecución fue de 60 segundos.

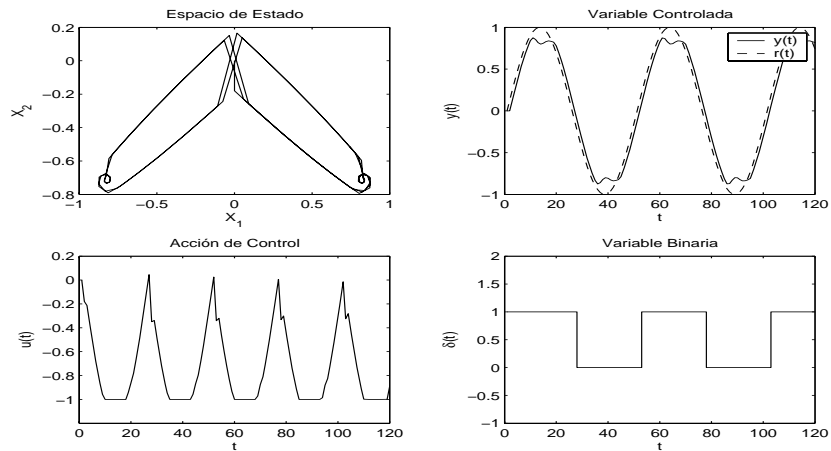


Figura 3.3: Evolución de sistema bajo controlador MPC (Índice lineal a tramos)

■ Comparación

A partir de las figuras 3.2 y 3.3 se puede observar que el controlador MPC con índice lineal sigue la referencia de mejor forma durante las subidas y bajadas de la señal senoidal. Sin embargo, el MPC lineal muestra un salto durante los "peaks" de la referencia que no se ven en el caso de utilizar un controlador MPC con índice cuadrático.

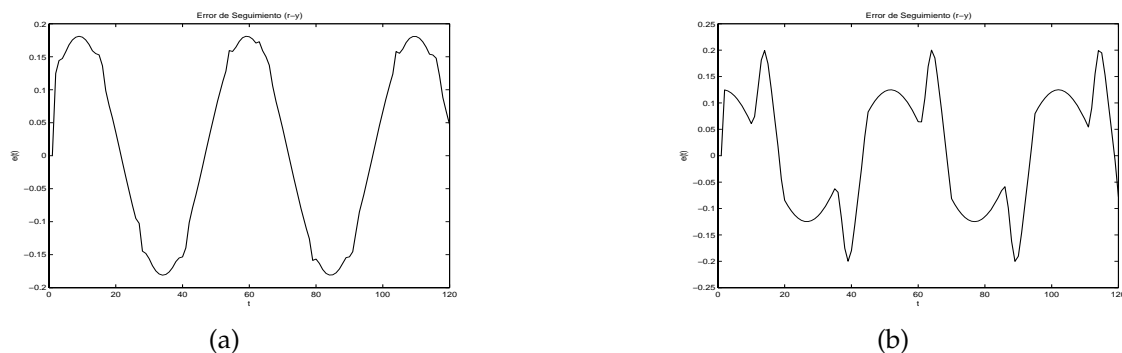


Figura 3.4: Error de Seguimiento: (a) Caso MPC Cuadrático . (b) Caso MPC Lineal

La figura 3.4 muestra el error de seguimiento de la referencia para ambos controladores. El error cuadrático medio en el seguimiento de la referencia es de 0,1139 en el caso lineal y 0,1326 en el caso cuadrático, lo cual es bastante interesante, pues el error cuadrático no beneficia al funcional cuadrático como se podría pensar a priori. Esto hace pensar que el controlador MPC con índice lineal es mejor, pero este tarda el doble de tiempo en calcular las soluciones debido principalmente a la existencia de una mayor cantidad de variables binarias en su formulación.

Según lo observado en esta simulación, el control MPC que utiliza un funcional lineal presenta una mejor performance que su congénere cuadrático lo que se explica principalmente por la alta penalización que recibe la acción de control en el último caso. Además, a pesar de que el problema MILP tiene asociada una mayor cantidad de variables de optimización, el "solver" utilizado fue siempre capaz de encontrar la solución al problema; en cambio, en el problema MIQP, el solver no siempre fue capaz de encontrar la solución al problema lo que se traduce en una menor robustez. Por estas razones, se preferirá utilizar un funcional lineal en la aplicación final desarrollada en este trabajo.

Con lo que se ha recopilado hasta ahora es posible concluir que existen las herramientas para poder aplicar control predictivo basado en modelos MLD a un sistema real. Por ello se procederá a enunciar el problema real al que se aplicará control predictivo y que tiene relación con optimizar la operación de centrales eléctricas de ciclo combinado.

Capítulo 4

Optimización de la Operación de una Central Térmica de Ciclo Combinado

Hoy en día, el tipo de central termoeléctrica que posee la mejor eficiencia en el uso de la energía es la central de ciclo combinado. Este tipo de central combina el uso de dos turbinas para generar electricidad: una turbina a vapor y una turbina a gas. La operación de estas centrales está sujeta a respetar una gran cantidad de restricciones, en especial durante las partidas y detenciones.

En varias partes del mundo, la generación de energía eléctrica está inserta en un mercado liberalizado donde existe una alta competencia, lo que implica que cada empresa trata de minimizar sus costos mediante una operación lo más óptima posible. Además, existen legislaciones medioambientales que deben ser respetadas, lo que obliga a una operación sujeta a restricciones sobre nivel de emanaciones, seguridad, etc. Los esquemas de control actualmente utilizados no pueden tomar en cuenta todas estas variables, por lo que necesariamente se cae en una operación sub-óptima. Por estas razones existe un gran incentivo a investigar y desarrollar mejores esquemas de control, los que deben partir por mejorar la modelación de estos procesos.

CAPÍTULO 4. OPTIMIZACIÓN DE LA OPERACIÓN DE UNA CENTRAL TÉRMICA DE CICLO COMBINADO

Para poder obtener un buen modelo del sistema en cuestión, es necesario entender el funcionamiento de cada bloque constitutivo y conocer cuales son sus restricciones de operación. Por ello a continuación se hará una descripción¹ de los bloques más importantes, como se relacionan entre si y las restricciones que poseen.

4.1. Descripción de Bloques Funcionales

Hoy en día existen diversos tipos de centrales de ciclo combinado, sin embargo una de las configuraciones más utilizadas es mostrada en la figura 4.1.

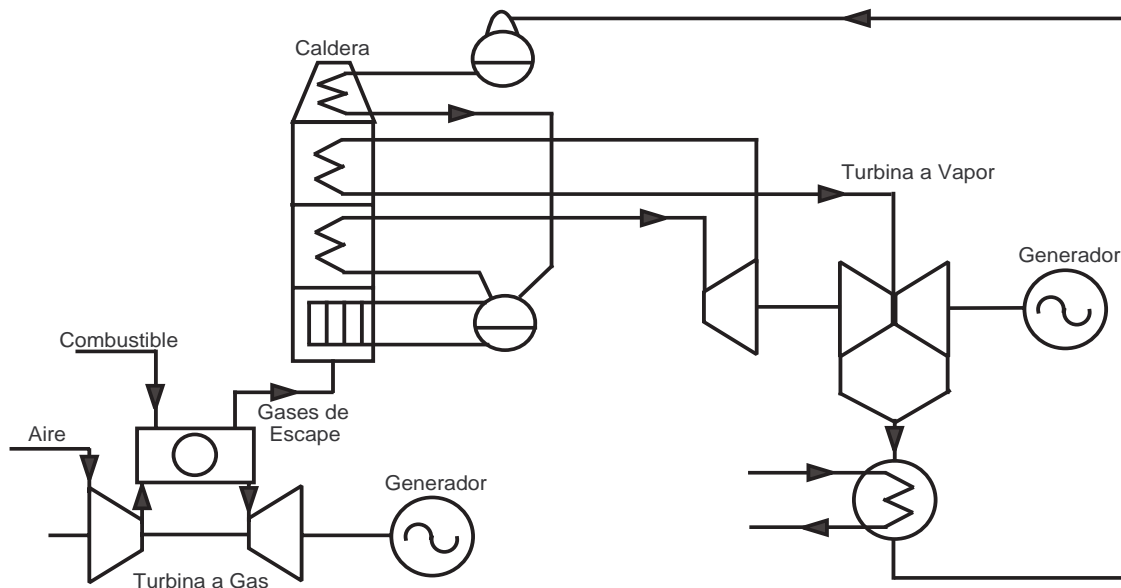


Figura 4.1: Configuración Estándar de Central de Ciclo Combinado

En este caso, los gases de escape de la turbina a gas son utilizados en la producción de vapor mediante una caldera ("heat recovery steam generator": HRSG). La caldera extrae el calor de los gases de escape para incrementar los parámetros del vapor (temperatura y presión).

¹La mayoría de la información mostrada en esta sección puede ser encontrada, con mayor detalle, en [12]

CAPÍTULO 4. OPTIMIZACIÓN DE LA OPERACIÓN DE UNA CENTRAL TÉRMICA DE CICLO COMBINADO

Los principales componentes de una central de ciclo combinado son los siguientes:

- a) Turbina a gas (incluida la cámara de combustión y el compresor) y generador.
- b) Fuentes de aire y combustible para la turbina a gas.
- c) Turbina a vapor con generador.
- d) Condensador.
- e) Caldera.
- f) Fuentes de aire y combustible para la caldera.
- g) Sistema de agua de alimentación para la turbina a vapor.

Una descripción más detallada de cada componente será entregada en las siguientes subsecciones.

4.1.1. Turbina a Gas

La principal función de la turbina a gas es transformar la energía contenida en el combustible, ya sea líquido o gaseoso, en energía cinética rotatoria. Para ello, se quema una mezcla de combustible y aire produciendo gases a altísima temperatura ($\sim 1200^{\circ}C$) los que luego son dirigidos hacia la turbina propiamente tal. Los gases se expanden dentro de la turbina produciendo movimiento rotatorio en el eje principal y a la vez pierden presión y temperatura. Finalmente, los gases de escape salen de la turbina y pueden ser dirigidos a la caldera o simplemente al medio ambiente en caso de operación en ciclo abierto de una central de ciclo combinado.

CAPÍTULO 4. OPTIMIZACIÓN DE LA OPERACIÓN DE UNA CENTRAL TÉRMICA DE CICLO COMBINADO

Generalmente el aire entra a un compresor con 17 etapas, por ejemplo. Cada etapa comprime el aire hasta cierta presión y luego pasa a la siguiente etapa. También se considera una cámara de combustión que posee un sistema de alimentación del combustible y además considera un sistema de lubricación. Luego se ubica la turbina propiamente tal, que puede tener 3 etapas y, finalmente, se encuentra el ducto por donde son evacuados los gases de escape.

Como ya se mencionó anteriormente, este tipo de turbinas pueden operar en ciclo abierto o cerrado. La etapa de compresión y la turbina pueden estar juntas o separadas en múltiples etapas, y de esta manera trabajar en distintas condiciones de presión y temperatura.

4.1.2. Caldera

La principal función de la caldera consiste en proveer un fin útil a los gases de escape que genera la turbina a gas. Este fin consiste en usar la energía calórica presente en los gases de escape para producir vapor a alta presión y temperatura, que luego será utilizado en la turbina a vapor para producir potencia eléctrica.

Las calderas pueden agruparse dentro de 2 categorías:

- Calderas con sistema de calentamiento.
- Calderas sin sistema de calentamiento (HRSG).

Las calderas con sistema de calentamiento son usadas en centrales generadoras basadas en turbinas a vapor. En el caso de centrales de ciclo combinado, este tipo de calderas son utilizadas para incrementar la participación del vapor en la producción de electricidad.

Una caldera sin sistema de calentamiento es simplemente un intercambiador de

CAPÍTULO 4. OPTIMIZACIÓN DE LA OPERACIÓN DE UNA CENTRAL TÉRMICA DE CICLO COMBINADO

calor, que toma el calor de los gases de paso para llevar el agua, existente en su interior, a condiciones de vapor. Su tamaño no es tan impresionante como el de una caldera con sistema de calentamiento ya que no incluye cámara de combustión ni sistema de suministro de combustible.

La caldera con cámara de combustión considera los siguientes elementos constitutivos:

- Cámara de combustión: En este punto se mezclan el aire con el combustible para ser quemados y producir gases a alta temperatura. Estos gases pasan a través de los elevadores y calientan la mezcla de vapor y agua existente en ellos.
- Domo: En este componente coexisten vapor y agua al mismo tiempo. La mezcla de vapor y agua calentada en los elevadores llega al domo para incrementar la temperatura y presión de la mezcla existente en él. Cuando el vapor alcanza cierta temperatura y presión se activa una válvula de salida del domo que lleva el vapor hacia el sobrecalentador para producir vapor sobrecalentado.
- Elevadores: Los elevadores consisten en una serie de tubos ordenados en forma vertical, pero separados de manera que los gases calientes producidos en la cámara de combustión pasen a través de ellos y entreguen su calor a la mezcla de agua y vapor existente en el interior de cada tubo.
- Sobrecalentador: Tiene la labor de agregar una cantidad de calor adicional al vapor que sale del domo para convertirlo en vapor sobrecalentado.
- Recalentador: Tiene la labor de calentar el vapor que sale de la etapa de alta presión de la turbina a vapor y lo convierte en vapor recalentado.

- Economizador: Su principal acción está en tomar el agua de alimentación, que usualmente viene a una temperatura baja, y usar la última cuota de calor existente en los gases liberados en la cámara de combustión para elevar en algo su temperatura. Luego, esta agua llega al domo para seguir calentándose.

Como se puede observar, la caldera es un bloque bastante complejo y por ende su modelación. La precisión que se escoja para modelarla tendrá relación con la complejidad que se escoja para el controlador.

4.1.3. Turbina a Vapor

La función de la turbina a vapor es transformar la energía del vapor, contenida en forma de presión y temperatura, a energía cinética rotatoria. Para hacer más eficiente la transferencia de energía, la turbina a vapor está dividida en tres etapas: alta presión, media presión y baja presión. A cada una de ellas entra vapor con características de presión diferentes y todas están conectadas al mismo eje.

De esta forma, cada uno de los vapores producidos en la caldera es dirigido a una etapa específica de la turbina para aprovechar al máximo la energía contenida y luego de que el vapor se ha expandido dentro de la turbina es llevado nuevamente a la caldera para cerrar el ciclo.

Dentro de las características constructivas cabe destacar que la turbina de alta presión tiene la forma de un cono, de manera que el vapor sobrecalentado ingresa por la parte más angosta del cono y se expande hasta alcanzar la parte más ancha del cono mientras ejerce fuerza sobre los rodetes solidarios al eje central generando movimiento rotatorio. Por otro lado, la turbina de baja presión recibe el vapor recalentado y realiza un proceso similar al de la turbina de alta presión. Un esquema de su ubicación es mostrado en la figura 4.2:

CAPÍTULO 4. OPTIMIZACIÓN DE LA OPERACIÓN DE UNA CENTRAL TÉRMICA DE CICLO COMBINADO

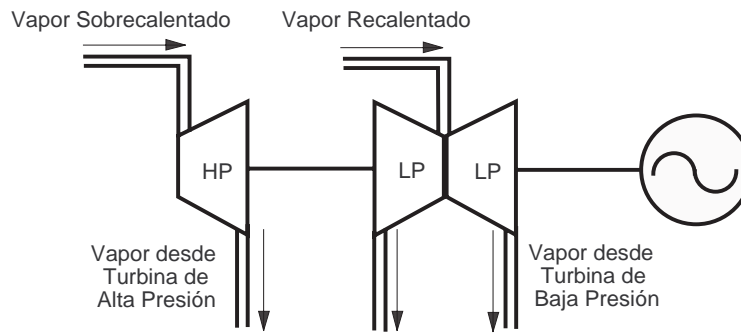


Figura 4.2: Esquema de turbina a vapor

La ubicación de las distintas etapas de la turbina a vapor obedece también a minimizar el empuje axial que se produce al chocar el vapor con los rodetes, de esta forma el cojinete de descanso no es sobreestresado.

4.1.4. Condensador

La función del condensador consiste en tomar el vapor liberado de la turbina a vapor (se refiere particularmente a la etapa de baja presión, en la cual el vapor deja la turbina casi en condiciones de vacío) y condensarlo. Para ello, el condensador posee cañerías por las cuales circula agua de enfriamiento la cual toma el calor que existe en el vapor y lo saca de él. Una bomba de condensación toma el agua condensada y la lleva a la caldera. Esto sirve para bajar la temperatura del vapor y mejorar la eficiencia del ciclo.

4.1.5. Sistema de Agua de Alimentación

La principal función del sistema de agua de alimentación es tomar el condensado que produce el condensador y transportarlo a la caldera nuevamente. Durante el proceso de condensación no todo el vapor se condensa y por ello es necesario usar

CAPÍTULO 4. OPTIMIZACIÓN DE LA OPERACIÓN DE UNA CENTRAL TÉRMICA DE CICLO COMBINADO

un aireador que toma la mezcla de vapor y agua que sale del condensador y la transforma en agua. Para mantener el agua a una cierta temperatura dentro del aireador, se usa además vapor que también entra al aireador. Las pérdidas de agua que existen son suplidas mediante el uso de agua de compensación. El paso final consiste en tomar el agua del aireador y pasarla a través del economizador para precalentarla y luego llevarla al domo como agua de alimentación.

El esquema asociado a este bloque funcional es mostrado en la figura 4.3

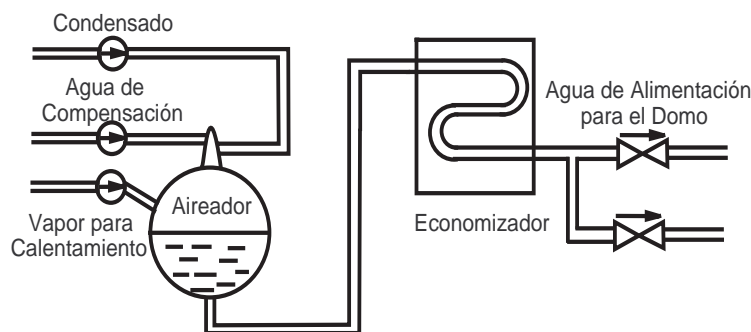


Figura 4.3: Sistema de agua de alimentación

4.1.6. Generador Eléctrico

La turbina a gas y la turbina a vapor tienen acoplados a sus ejes generadores síncronos trifásicos de rotor cilíndrico. Generalmente estas unidades tienen una alta eficiencia en la transformación de energía mecánica a eléctrica y por ello son ampliamente utilizados en estas labores.

Como se puede observar la cantidad de componentes existentes en una central de ciclo combinado es bastante amplia y su fenomenología bastante compleja. El sistema de control que se utiliza para manejar este tipo de procesos está generalmente dividido en etapas, las que se explicarán en la sección siguiente.

4.2. Control de Plantas de Ciclo Combinado

El control asociado a este tipo de procesos es muy complejo debido principalmente a la gran cantidad de subprocesos que deben funcionar de manera sincronizada para mantener la operación del sistema en un punto cercano al óptimo. Es por ello que generalmente el sistema de control de más alto nivel está dividido en etapas y cada etapa tiene asociado un régimen de operación distinto. En general, se distinguen tres regímenes de operación:

- Partida.
- Detención.
- Normal (régimen permanente).

En operación normal, la planta puede estar desconectada de la red (operación en modo isla) ó conectada a la red. En el caso de estar conectada a la red, los requerimientos de potencia para cada unidad son especificados por un centro de despacho y este hecho pone nuevamente a la planta en uno de los siguientes modos de operación:

- Generación constante de potencia.
- Siguiendo programación del centro de despacho.
- Regulación de frecuencia del sistema.
- Operación con reserva en giro.

Los procedimientos de partida y detención son los más complejos desde el punto de vista del control asociado. Ellos requieren que una secuencia de operaciones sea exitosa de manera de llevar la turbina, y junto con ella a toda la planta, a través de

CAPÍTULO 4. OPTIMIZACIÓN DE LA OPERACIÓN DE UNA CENTRAL TÉRMICA DE CICLO COMBINADO

una secuencia de estados seguros. Al mismo tiempo se deben monitorear y chequear una gran cantidad de variables para asegurar una operación segura. Además se desea que las pérdidas de energía durante estos procedimientos sean mínimas, lo que va directamente asociado con su tiempo de duración. Por ejemplo, una turbina de vapor moderna ("heavy-duty") tiene un periodo de encendido que puede llegar a durar 6 horas, dentro de las cuales se ejecutan las siguientes etapas:

- Calentamiento de la cañería de vapor principal.
- Calentamiento de la turbina y sus componentes.
- Partida de la turbina (giro).
- Sincronización.
- Carga.

En el caso de la turbina a gas, las etapas relativas a la partida son las siguientes:

- Bombear lubricante para producir una capa de aceite bajo el rotor de la turbina y con ello disminuir el roce estático.
- Usar el motor de partida para empezar la rotación de la turbina.
- Inyectar combustible líquido para establecer una llama estable.
- Después de obtener la velocidad deseada y la temperatura de los gases de escape es la deseada, sincronizarse con la red.
- Cambiar gradualmente de combustible líquido a gaseoso.
- Incrementar la carga hasta el valor deseado.

CAPÍTULO 4. OPTIMIZACIÓN DE LA OPERACIÓN DE UNA CENTRAL TÉRMICA DE CICLO COMBINADO

En el caso de centrales de ciclo combinado, las secuencias de partida son aún más complejas debido a que existen interconexiones entre ambas turbinas, tanto en la parte eléctrica como en la mecánica (ver figuras 4.4y 4.5).

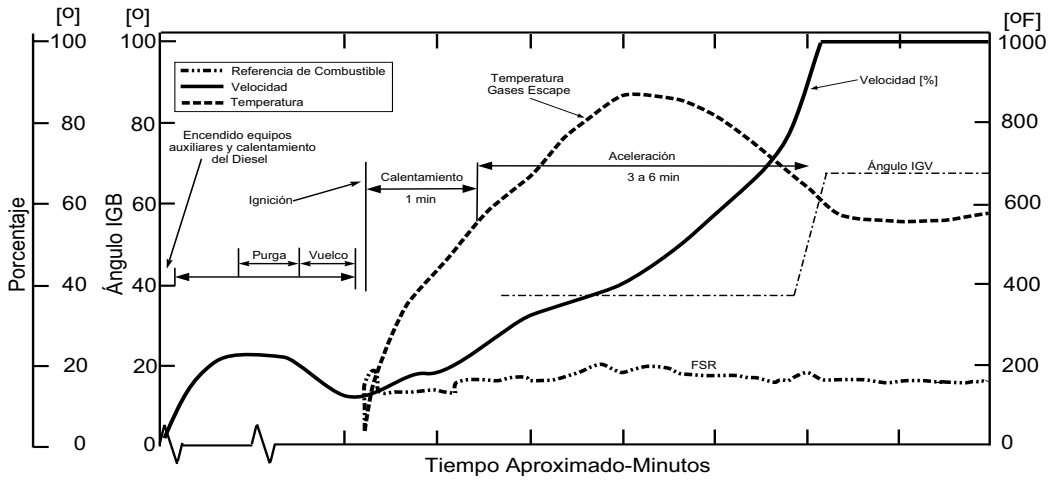


Figura 4.4: Secuencia de partida de la turbina a gas de un ciclo combinado

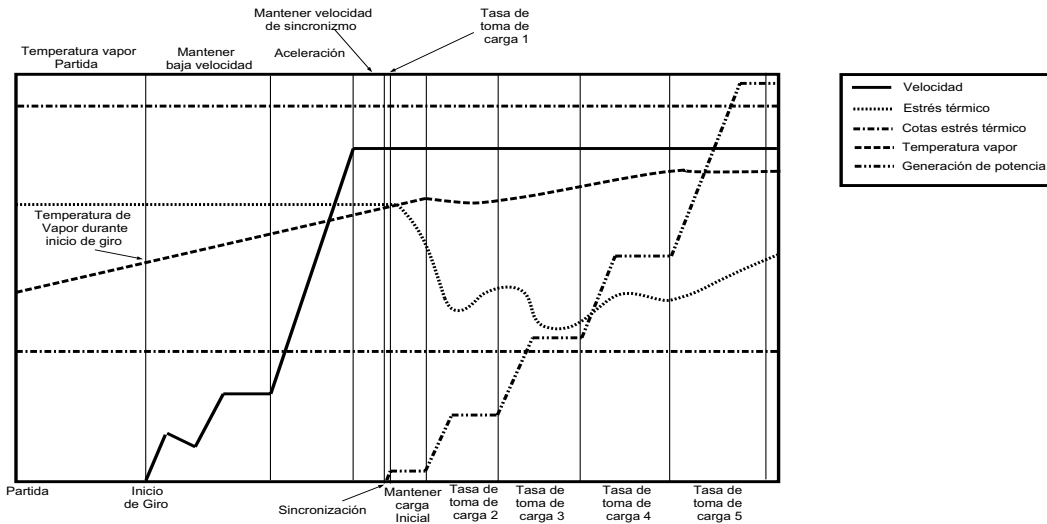


Figura 4.5: Secuencia de partida de la turbina a vapor de un ciclo combinado

4.2.1. Principales Lazos de Control

En las plantas de ciclo combinado existen principalmente 2 categorías de control: control de secuencia y control modulante.

- a) Control de Secuencia: El control de secuencia está asociado sólo con las etapas de partida y detención de la planta. Una secuencia asegura que ciertos estados no existan, pues pueden poner en peligro el funcionamiento del sistema completo. Cuando las centrales son grandes, las secuencias asociadas pueden llegar a ser muy complejas y es esencial que operen de manera confiable de modo que la planta pueda operar de forma segura. Los principales problemas que deben ser superados son la no confiabilidad de las señales y el diagnóstico de fallas.

- b) Control Modulante: Este corresponde al lazo de control principal que apunta a hacer ajustes al funcionamiento de una planta que ya está operando, de manera de mantener los parámetros en los valores deseados. La principal tarea que debe cumplir este lazo corresponde a mantener el balance entre la potencia producida y la demanda, cuyo principal indicador es la frecuencia. Si la frecuencia aumenta, esto quiere decir que existe una sobre producción de potencia y viceversa.

4.2.2. Optimización del Proceso de Partida de una Central de Ciclo Combinado

Tal como se mencionó en la sección anterior, uno de los procesos más complejos, desde el punto de vista del control del mismo, es el proceso de partida de una central de ciclo combinado. Las principales restricciones tienen relación con proteger la

CAPÍTULO 4. OPTIMIZACIÓN DE LA OPERACIÓN DE UNA CENTRAL TÉRMICA DE CICLO COMBINADO

turbina a vapor y la caldera del "stress" térmico al que son expuestas durante esta fase y además a limitar las emanaciones de NO_x producidas en la caldera. El objetivo principal consiste en disminuir el tiempo utilizado para el proceso de partida.

Para optimizar el proceso de partida, en [13] se propone realizar una predicción del "stress" térmico que está sufriendo el rotor de la turbina a vapor y dicho modelo se utilizar para controlar, mediante MPC, el flujo de vapor que ingresa a la turbina. Además, se utilizan restricciones de límite para el máximo y mínimo "stress" que la turbina puede soportar. De esta forma el MPC determina el flujo óptimo de vapor para mantener el "stress" térmico dentro de límites apropiados. Esta metodología es bastante interesante, pero deja de lado otro tipo de restricciones que se deben considerar durante el proceso de partida.

En [14] abordan el problema generando un sistema de control basado en razonamiento difuso cooperativo y redes neuronales autoadaptables para poder involucrar las variables externas que afectan el proceso, como son la temperatura y la humedad ambiental. Toda la información referente al "stress" térmico, emisiones de NO_x y la calendarización actual de ambas turbinas se utiliza para generar reglas difusas que permiten involucrar el conocimiento del experto en el proceso de partida. El controlador derivado es bastante complejo y requiere la sintonización de varios parámetros para lograr un funcionamiento adecuado.

Por otro lado, en [15], se aborda el problema utilizando un funcional que representa el tiempo utilizado durante el proceso de partida. Dicho funcional tiene una serie de óptimos locales, por ello se utilizan algoritmos genéticos para optimizar dicho funcional.

Los algoritmos de control actuales que se ocupan en las centrales de ciclo combinado consideran 3 tipos de procesos de partida: partida fría, partida tibia y partida

caliente. Dichos tipos de partida están definidos por el tiempo en que las turbinas se han mantenido fuera de funcionamiento lo que se relaciona directamente con las temperaturas internas de los materiales constitutivos de las turbinas. De esta forma, si la turbina lleva poco tiempo detenida entonces es posible aplicar un procedimiento de partida "caliente" el cual es mucho más rápido que un proceso de partida "frío" pues no es necesario calentar los materiales antes de producir potencia. Este sistema se utiliza en [16] y calza de manera perfecta con la modelación MLD pues basta definir un "clock" que cuente el tiempo en que una turbina se ha mantenido detenida y rangos de tiempo de detención que determinen el tipo de partida. De esta forma, el controlador predictivo híbrido podrá adaptarse al proceso de partida y además funcionar durante la operación de régimen permanente.

4.3. Modelación de la Central de Ciclo Combinado

Al explicar los bloques más importantes de la central de ciclo combinado, queda de manifiesto que la modelación asociada a cada bloque puede llegar a ser muy compleja. Por ello, se adoptará un modelo simplificado que capture las variables más importantes de manera de poder probar el nuevo sistema de control. Esta sección está basada en el trabajo desarrollado en [16] que corresponde a una de las pocas referencias en donde la planta es abordada como un sistema híbrido.

4.3.1. Dinámica de la Central de Ciclo Combinado

En [16], la planta en cuestión corresponde a una central de cogeneración más que a una planta de ciclo combinado, pues, el circuito de vapor no es cerrado. Sin embargo, el problema es bastante similar a lo que se debe afrontar en el control de una

CAPÍTULO 4. OPTIMIZACIÓN DE LA OPERACIÓN DE UNA CENTRAL TÉRMICA DE CICLO COMBINADO

planta de ciclo combinado. Por dicha razón se estudiará este ejemplo para extender este trabajo a la modelación de una planta de ciclo combinado real, considerando que ellas poseen una gran cantidad de entradas y salidas.

La planta es simplificada al siguiente proceso (mostrado en la figura 4.6):

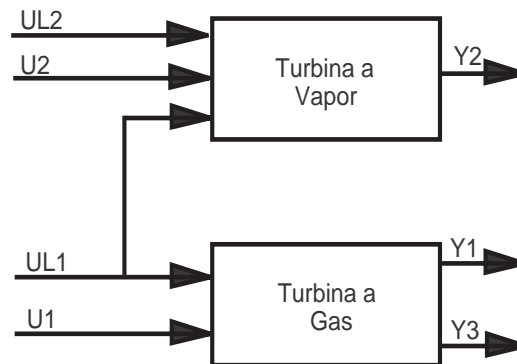


Figura 4.6: Diagrama de Bloques de una planta de CC con cogeneración

Las variables que considera este modelo simplificado son las siguientes:

- u_1 corresponde a la referencia de potencia para la turbina a gas (en porcentaje). El rango de operación permitido es $[u_{1,min}, u_{1,max}]$.
- u_2 corresponde a la referencia de flujo de vapor que se desea entregar (en Kg/s). El rango permitido para el flujo de vapor es $[u_{2,min}, u_{2,max}]$.
- u_{l1} y u_{l2} corresponde a las señales de encendido y apagado de las turbinas a gas y vapor respectivamente. Estas variables son binarias.
- y_1 corresponde al flujo de combustible que consume la turbina a gas (en kg/s).
- y_2 corresponde a la potencia eléctrica producida por la turbina a vapor (en MW).
- y_3 corresponde a la potencia eléctrica producida por la turbina a gas (en MW).

Uno de los primeros parámetros que debe ser fijado para la modelación es el tiempo de muestreo. En el caso de [16], el tiempo de muestreo utilizado es de 1 hora, lo que permite simplificar en gran medida las dinámicas existentes, pues en una hora la dinámica del proceso desaparece y sólo queda la operación en régimen permanente. Las funciones que relacionan los flujos de combustible y vapor con las potencias generadas son las siguientes:

$$y_1(k + 1) = f_1(u_1(k)) \quad (4.3.1)$$

$$y_2(k + 1) = f_2(u_1(k), u_2(k)) \quad (4.3.2)$$

$$y_3(k + 1) = f_3(u_1(k)) \quad (4.3.3)$$

4.3.2. Características Híbridas

Tal como se había mencionado anteriormente, existen una gran cantidad de variables cuantizadas dentro del funcionamiento de una central de ciclo combinado. A pesar de que todas ellas son tomadas en cuenta de alguna u otra forma por el sistema de control, generalmente las acciones de control que las involucran están fuertemente influenciadas por algoritmos basados en conocimiento del proceso ó heurística. Es por ello que frecuentemente se cae dentro de una operación subóptima, la que puede ser mejorada. En [16] se consideran las siguientes características híbridas:

- Presencia de variables binarias (encendido y apagado).
- Diferentes modos de partida de ambas turbinas de acuerdo al tiempo que han estado fuera de servicio.
- Presencia de variables continuas como potencias generadas y flujos de combustible.

CAPÍTULO 4. OPTIMIZACIÓN DE LA OPERACIÓN DE UNA CENTRAL TÉRMICA DE CICLO COMBINADO

- Restricciones de prioridad, es decir, la turbina a vapor no puede operar sin que primero esté operando la turbina a gas.
- Restricciones sobre los máximos flujos de vapor y combustible.

A continuación se explicará como se puede modelar la mayoría de las características antes mencionadas.

- a) Modos de Partida: En una planta de ciclo combinado es común que se deba esperar un tiempo entre la partida de la unidad y la actual producción de potencia. Para modelar este comportamiento se utilizará la variable ξ_d que modelará el retardo existente entre la partida y la producción de potencia, y un contador ξ_{off} que acumulará el tiempo en que la unidad ha estado fuera de servicio. Un ejemplo de la relación que puede existir entre ξ_d y ξ_{off} está descrita en la tabla 4.1.

	Tiempo fuera de servicio (h)	Retardo (h)
Normal	[0,8]	1
Caliente]8,60]	2
Tibio]60,120]	3
Frío]120,+∞]	4

Tabla 4.1: Diferentes modos de partida

- b) Restricciones de Prioridad: Obviamente la operación en ciclo combinado de la turbina a vapor y la turbina a gas posee una secuencia, es decir, la turbina a vapor no puede producir potencia si la turbina a gas esta apagada.
- c) Existencia de variables continuas y binarias: La inclusión de ambos tipos de variables es natural en el esquema MLD por lo que no se requiere modelación.

Una vez definida la modelación de las características híbridas, el siguiente paso corresponde a la formulación del modelo MLD de la planta de ciclo combinado.

4.3.3. Modelo MLD de la Central Térmica de Ciclo Combinado

El modelo MLD es la expresión matemática formal de las condiciones mencionadas en las dos subsecciones precedentes. La subsección referida a la dinámica de la planta está claramente en formato MLD pues no hay condiciones lógicas sobre sus variables, es por ello que ahora sólo se analizará como transformar las condiciones híbridas en inecuaciones enteras-mixtas.

La primera característica híbrida a modelar es la condición de prioridad que dice que la turbina a vapor sólo puede operar cuando la turbina a gas ya está encendida. Para fijar ideas se usará el mismo ejemplo planteado en [16], donde las señales de encendido y apagado de la turbina a vapor y gas son u_{l1} y u_{l2} respectivamente, luego:

$$u_{l2} = 1 \Rightarrow u_{l1} = 1 \Leftrightarrow u_{l2} - u_{l1} \leq 1 \quad (4.3.4)$$

La segunda condición a modelar es la relativa al retardo², para lo cual es necesario definir los siguientes contadores:

- ξ_{on} : Este contador tiene la función de almacenar la cantidad de tiempo consecutivo en que la turbina ha producido potencia. Si en algún momento la turbina deja de generar, entonces su valor es cero. La dinámica del contador está dada por la siguiente ecuación:

$$\xi_{on}(k+1) = \begin{cases} \xi_{on}(k) + 1 & \text{Si la turbina genera potencia} \\ 0 & \end{cases} \quad (4.3.5)$$

- ξ_{off} : Este contador tiene la función de almacenar el tiempo en que la turbina no ha producido potencia, lo que sucede en la etapa de encendido y cuando

²La derivación sólo se hará para la turbina a vapor pues para la turbina a gas es análoga

CAPÍTULO 4. OPTIMIZACIÓN DE LA OPERACIÓN DE UNA CENTRAL TÉRMICA DE CICLO COMBINADO

está fuera de servicio. Su dinámica es la siguiente:

$$\xi_{off}(k+1) = \begin{cases} \xi_{off}(k) + 1 & \text{Si la turbina no genera potencia} \\ 0 & \end{cases} \quad (4.3.6)$$

- ξ_d : Cuando su valor es positivo almacena el retardo existente entre el encendido y la real producción de energía eléctrica. Su dinámica es la siguiente:

$$\xi_{on}(k+1) = \begin{cases} \xi_{on}(k) - 1 & \text{Si la turbina es encendida} \\ 0 & \text{Si la turbina no es encendida y } \xi_{off} \leq 8 \\ 1 & \text{Si la turbina no es encendida y } 8 < \xi_{off} \leq 60 \\ 2 & \text{Si la turbina no es encendida y } 60 < \xi_{off} \leq 120 \\ 3 & \text{Si la turbina no es encendida y } \xi_{off} \geq 120 \end{cases} \quad (4.3.7)$$

Además es necesario definir las siguientes variables binarias:

- δ_d : Esta variable binaria indica cuando la turbina está lista para producir potencia, luego su definición es la siguiente:

$$\delta_d = 1 \Leftrightarrow \xi_d < 0 \quad (4.3.8)$$

- δ_{on} : Esta variable binaria indicará cuando la turbina está encendida y produciendo potencia:

$$\delta_{on} = 1 \Leftrightarrow (u_{t2} = 1) \wedge (\delta_d = 1) \quad (4.3.9)$$

- δ_h, δ_w y δ_c : Estas variables binarias indican cuanto tiempo ha pasado la turbina

CAPÍTULO 4. OPTIMIZACIÓN DE LA OPERACIÓN DE UNA CENTRAL TÉRMICA DE CICLO COMBINADO

sin producir potencia. Su definición es la siguiente:

$$\begin{aligned}
 \delta_h &= 1 \Leftrightarrow \xi_{off} \geq 8 \\
 \delta_w &= 1 \Leftrightarrow \xi_{off} \geq 60 \\
 \delta_c &= 1 \Leftrightarrow \xi_{off} \geq 120
 \end{aligned} \tag{4.3.10}$$

Una vez definidos los contadores y las variables binarias es posible hacer la transformación a inecuaciones enteras mixtas:

- $\xi_{on}(k+1) = [\xi_{on}(k) + 1] \delta_{on}(k) = z_{on}(k)$ con

$$\begin{aligned}
 z_{on} &\leq M\delta_{on} \\
 z_{on} &\geq m\delta_{on} \\
 z_{on} &\leq \xi_{on}(k) + 1 - m(1 - \delta_{on}) \\
 z_{on} &\geq \xi_{on}(k) + 1 - M(1 - \delta_{on})
 \end{aligned}$$

donde M y m son los máximos y mínimos de $\xi_{on}(k) + 1$, respectivamente.

- $\xi_{off}(k+1) = [\xi_{off}(k) + 1] (1 - \delta_{on})(k) = z_{off}(k)$ con

$$\begin{aligned}
 z_{off} &\leq M(1 - \delta_{on}) \\
 z_{off} &\geq m(1 - \delta_{on}) \\
 z_{off} &\leq \xi_{off}(k) + 1 - m\delta_{on} \\
 z_{off} &\geq \xi_{off}(k) + 1 - M\delta_{on}
 \end{aligned}$$

donde M y m son los máximos y mínimos de $\xi_{off}(k) + 1$, respectivamente.

CAPÍTULO 4. OPTIMIZACIÓN DE LA OPERACIÓN DE UNA CENTRAL TÉRMICA DE CICLO COMBINADO

- $\delta_h(k) = 1 \Leftrightarrow \xi_{off}(k) \geq 8$ es igual a:

$$\begin{aligned} -m\delta_h(k) &\leq \xi_{off}(k) - 8 - m \\ -(M + \epsilon)\delta_h(k) &\leq -(\xi_{off}(k) - 8) - \epsilon \end{aligned}$$

donde M y m son los máximos y mínimos de $\xi_{off}(k) - 8$, respectivamente.

- $\delta_w(k) = 1 \Leftrightarrow \xi_{off}(k) \geq 60$ es igual a:

$$\begin{aligned} -m\delta_w(k) &\leq \xi_{off}(k) - 60 - m \\ -(M + \epsilon)\delta_w(k) &\leq -(\xi_{off}(k) - 60) - \epsilon \end{aligned}$$

donde M y m son los máximos y mínimos de $\xi_{off}(k) - 60$, respectivamente.

- $\delta_c(k) = 1 \Leftrightarrow \xi_{off}(k) \geq 120$ es igual a:

$$\begin{aligned} -m\delta_c(k) &\leq \xi_{off}(k) - 120 - m \\ -(M + \epsilon)\delta_c(k) &\leq -(\xi_{off}(k) - 120) - \epsilon \end{aligned}$$

donde M y m son los máximos y mínimos de $\xi_{off}(k) - 120$, respectivamente.

- $\xi_d(k+1) = (\xi_d(k) - 1)u_{l2} + (\delta_h(k) + \delta_w(k) + \delta_c(k))(1 - u_{l2}) = z_{d1}(k) + z_{d2}(k)$ con

$$z_{d1} \leq Mu_{l2}$$

$$z_{d1} \geq mu_{l2}$$

$$z_{d1} \leq (\xi_d(k) - 1) - m(1 - u_{l2})$$

$$z_{d1} \geq (\xi_d(k) - 1) - M(1 - u_{l2})$$

donde M y m son los máximos y mínimos de $(\xi_d(k) - 1)$, respectivamente. y

$$z_{d2} \leq M(1 - u_{l2})$$

$$z_{d2} \geq m(1 - u_{l2})$$

$$z_{d2} \leq (\delta_h(k) + \delta_w(k) + \delta_c(k)) - mu_{l2}$$

$$z_{d2} \geq (\delta_h(k) + \delta_w(k) + \delta_c(k)) - Mu_{l2}$$

donde M y m son los máximos y mínimos de $(\delta_h(k) + \delta_w(k) + \delta_c(k))$, respectivamente.

Finalmente es necesario imponer que la generación de potencia y el consumo de combustible asociado están relacionados con las variables binarias δ_{on} y u_l . Es por ello que las ecuaciones (4.3.1), (4.3.2) y (4.3.3) deben ser multiplicadas por variables binarias tomando la siguiente forma:

$$y_1(k+1) = f_1(u_1(k)) \cdot u_{l1} \quad (4.3.11)$$

$$y_2(k+1) = f_2(u_1(k), u_2(k)) \cdot \delta_{on.tv} \quad (4.3.12)$$

$$y_3(k+1) = f_2(u_1(k)) \cdot \delta_{on.tg} \quad (4.3.13)$$

4.3.4. Ampliación del Modelo Híbrido

Como se puede observar, el modelo considerado en [16] es bastante representativo de las condiciones lógicas inherentes al funcionamiento de una central de ciclo combinado, pero es posible mejorar aún más la representación agregando los siguientes elementos propuestos en este trabajo:

CAPÍTULO 4. OPTIMIZACIÓN DE LA OPERACIÓN DE UNA CENTRAL TÉRMICA DE CICLO COMBINADO

- Restricciones de máximo y mínimo tiempo de encendido y apagado³.
- Restricciones de rampa⁴.
- Efecto de la temperatura en la producción de potencia.

Las restricciones de máximo y mínimo tiempo de encendido y apagado se imponen debido a que una central térmica sólo puede aceptar cambios graduales de temperatura en la caldera, luego es necesario que el controlador conozca dicha limitante y evite acoplamientos y desacoplamientos innecesarios que terminen disminuyendo la vida útil de la unidad. El tiempo mínimo de funcionamiento corresponde al mínimo tiempo que una central debe mantenerse operativa y el tiempo mínimo de parada corresponde al mínimo tiempo que una unidad debe mantenerse inoperativa.

La forma que se utilizará para modelar estas restricciones será la siguiente: Si la turbina a vapor (gas) se encuentra operativa en el instante $k - 1$, esta sólo podrá ser apagada en el instante k si el tiempo de actividad $\xi_{on.tv}(k)$ ($\xi_{on.tg}(k)$) es mayor o igual al mínimo tiempo de funcionamiento $\underline{\xi_{on.tv}(k)}$ ($\underline{\xi_{on.tg}(k)}$) o $\xi_{off.tv}(k)$ es mayor o igual a 1 ($\xi_{off.tg}(k)$ es mayor o igual a 1). De manera similar, si la turbina a vapor (gas) se encuentra inoperativa en el instante $k - 1$, esta sólo podrá ser encendida en el instante k si el tiempo de inactividad $\xi_{off.tv}(k)$ ($\xi_{off.tg}(k)$) es mayor o igual al mínimo tiempo de inactividad $\underline{\xi_{off.tv}(k)}$ ($\underline{\xi_{off.tg}(k)}$) o $\xi_{on.tv}(k)$ es mayor o igual a 1 ($\xi_{on.tg}(k)$ es mayor o igual a 1). Esto equivale a:

$$u_{l2}(k) = 0 \Rightarrow \xi_{on}(k) \geq \underline{\xi_{on}(k)} \vee \xi_{off} \geq 1 \quad (4.3.14)$$

$$u_{l2}(k) = 1 \Rightarrow \xi_{off}(k) \geq \underline{\xi_{off}(k)} \vee \xi_{on} \geq 1$$

³También se conocen como "minimum up/down times"

⁴También conocidas como "slope constraints"

CAPÍTULO 4. OPTIMIZACIÓN DE LA OPERACIÓN DE UNA CENTRAL TÉRMICA DE CICLO COMBINADO

Las restricciones de rampa están relacionadas con las limitantes físicas que tienen las unidades generadoras para cambiar su producción de potencia de un instante a otro. Esto equivale a:

$$P(k+1) - P(k) \leq R_u \quad (4.3.15)$$

$$P(k+1) - P(k) \geq -R_d$$

donde R_u y R_d son las rampas de subida y bajada respectivamente.

El último elemento que considerará la modelación será incluir el efecto que producen los cambios de temperatura ambiente en la producción de potencia. La figura 4.7 muestra como se afecta el rendimiento de central en función de la temperatura ambiente en el caso de utilizar una torre de enfriamiento para refrigerar el agua utilizada en el condensador [17].

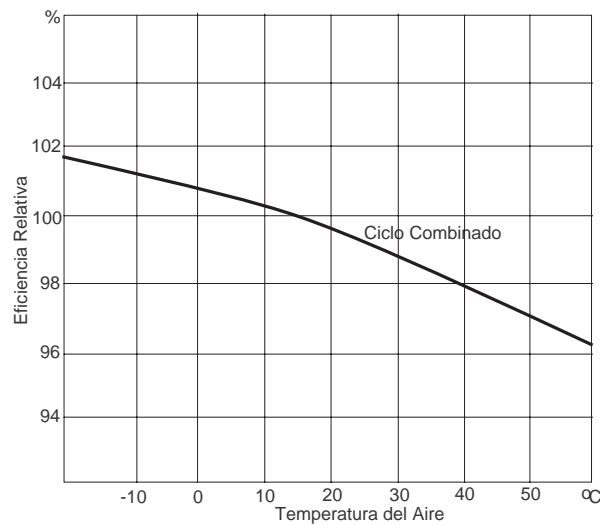


Figura 4.7: Eficiencia ciclo combinado usando agua refrigerada en torre de enfriamiento

Como se mencionó anteriormente, la generación de potencia eléctrica, producida por una central de ciclo combinado cuya agua de condensación se enfría usando

CAPÍTULO 4. OPTIMIZACIÓN DE LA OPERACIÓN DE UNA CENTRAL TÉRMICA DE CICLO COMBINADO

torres de enfriamiento, tiende a bajar cuando la temperatura ambiente aumenta. Dicho comportamiento es claro al analizar las ecuaciones que gobiernan el proceso (ver apéndice C), sin embargo, en este trabajo se optó por realizar una identificación del proceso, luego, no se usarán las ecuaciones fenomenológicas para efectuar la modelación.

Por esta razón se usarán 2 aproximaciones diferentes para modelar dicho efecto⁵:

- Modelación usando funciones lineales por tramos: En este caso, se utilizará un conjunto de modelos lineales $M_1 \dots M_n$ disjuntos que serán válidos en n rangos de temperatura distintos $T_1 - T_2, \dots, T_m - T_{m+1}, \dots, T_n - T_{n+1}$. De esta forma, según la temperatura ambiente que exista en un determinado momento se elegirá el modelo que mejor prediga la producción de potencia.
- Modelación usando lógica difusa: En este caso se debe realizar un "clustering" difuso sobre la potencia como función de la temperatura ambiente. Luego se puede adaptar un modelo lineal de predicción de la potencia en cada cluster los cuales son mezclados usando las leyes de la lógica difusa en lo que se conoce como modelo de Takagi-Sugeno. De esta forma, dada una cierta temperatura existe un grado de activación de cada modelo lineal lo que finalmente genera un modelo de predicción que corresponde a un promedio ponderado de los modelos lineales asociados a cada cluster.

Además del esquema que se utilizará para modelar el efecto de la temperatura en el funcionamiento del controlador es necesario conocer el comportamiento del perfil de temperatura ambiente durante un cierto periodo de tiempo de manera de ir actualizando el modelo predictivo que se utilizará. Las alternativas que se manejan para abordar este problema son las siguientes:

⁵La explicación detallada se encuentra en el apéndice D

CAPÍTULO 4. OPTIMIZACIÓN DE LA OPERACIÓN DE UNA CENTRAL TÉRMICA DE CICLO COMBINADO

- Si el tiempo de muestreo y el horizonte de predicción utilizados son suficientemente pequeños de modo que la temperatura ambiente no cambie de manera brusca durante dicho lapso entonces es posible hacer un computo off-line del modelo predictivo a utilizar y dicho modelo se mantendrá constante durante el periodo de optimización. Al siguiente instante de muestreo se recalcula el modelo y se repite el proceso. Esta alternativa es válida tanto para la modelación basada en funciones lineales por tramos como para la modelación basada en lógica difusa.
- Si el horizonte de predicción es grande entonces se tendría que modelar el comportamiento de la temperatura ambiente de manera que el controlador sea capaz de ir actualizando el modelo durante la optimización. En principio, se tendería a pensar que este esquema sería válido sólo para la modelación basada en funciones lineales por tramos, pues su estructura calza con el esquema MLD de manera directa, en cambio un modelo de Takagi-Sugeno no es directamente importable al esquema MLD debido a que corresponde a un sistema no lineal. Sin embargo, dado que la temperatura ambiente se modelará como una perturbación medible y predecible, es posible saber cual será la forma del modelo difuso durante todo el horizonte de predicción y gracias a ello es posible integrar el modelo difuso al esquema MLD.

El último paso consiste en estudiar el comportamiento que tiene cada turbina a cambios en la temperatura ambiente de manera de poder importar la forma de modelación separada para la potencia que genera cada turbina y ajustarlo a los cambios que se plantean en esta sección. Dicho análisis se realizará a continuación.

En el caso de la turbina a gas la influencia de la temperatura ambiente afecta el rendimiento de forma negativa, es decir, una mayor temperatura ambiente im-

CAPÍTULO 4. OPTIMIZACIÓN DE LA OPERACIÓN DE UNA CENTRAL TÉRMICA DE CICLO COMBINADO

plica una caída en la cantidad de potencia eléctrica producida bajo un consumo de combustible constante. Basándose en este conocimiento, se construirán 3 modelos de predicción distintos: Uno para temperaturas bajas, otro para temperaturas medias y finalmente uno para temperaturas altas. En el caso de utilizar funciones lineales por tramos, se fijarán rangos de temperaturas en los cuales cada modelo será válido y en el caso de usar lógica difusa se construirán funciones de pertenencia para cada modelo que dependerán de la temperatura y los 3 modelos se mezclarán de acuerdo a las reglas de "fuzzificación" de Takagi-Sugeno.

La figura 4.8 muestra como se ubicarán los modelos en el rango de temperatura para el caso de la turbina a gas.

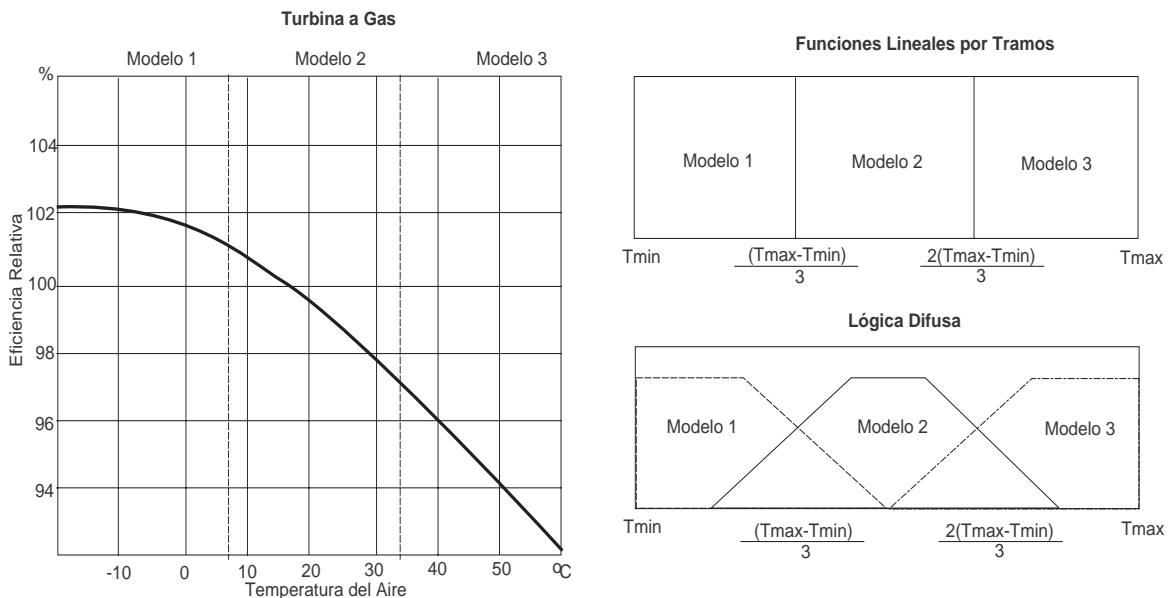


Figura 4.8: Esquemas de modelación para turbina a gas

En este caso el Modelo 1 representa el funcionamiento de la turbina a gas para temperaturas bajas, el Modelo 2 para temperaturas medias y el Modelo 3 para temperaturas altas. Como se puede observar, en el caso de funciones lineales por tramos sólo un modelo es válido en cada rango, en cambio en el enfoque fuzzy más de un

CAPÍTULO 4. OPTIMIZACIÓN DE LA OPERACIÓN DE UNA CENTRAL TÉRMICA DE CICLO COMBINADO

modelo es válido lo que permite un mejor ajuste durante las transiciones. La curva de rendimiento sirve para mostrar las diferencias relativas que deben existir entre los 3 modelos, es decir, el modelo 1 es el que produce mayor potencia, el modelo 2 ya presenta una baja en el rendimiento luego no puede producir más potencia que el modelo 1 y una lógica similar se aplica con respecto al modelo 3. Además, las diferencias entre los modelos deben ser proporcionales a los cambios de rendimiento que exhibe la turbina.

La modelación matemática será la siguiente:

1. Modelo Lineal por Tramos: Se tendrá un modelo "neutro" que corresponderá al modelo 2 ($M2_{TG}$). Los coeficientes del modelo se multiplicarán por un factor $\alpha \in [1, \infty[$ para obtener el modelo 1 ($M1_{TG}$), y por un factor $\beta \in [0, 1[$ para obtener el modelo 3 ($M3_{TG}$). Además, se asociará una variable binaria a cada rango de temperatura; la temperatura ambiente se denominará T_{amb} , luego:

$$\delta_{M1_{TG}} = 1 \iff T_{min} < T_{amb} \leq \frac{T_{max} - T_{min}}{3} \quad (4.3.16)$$

$$\delta_{M2_{TG}} = 1 \iff \frac{T_{max} - T_{min}}{3} < T_{amb} \leq 2\frac{T_{max} - T_{min}}{3} \quad (4.3.17)$$

$$\delta_{M3_{TG}} = 1 \iff 2\frac{T_{max} - T_{min}}{3} < T_{amb} \leq T_{max} \quad (4.3.18)$$

donde las variables $\delta_{M1_{TG}}$, $\delta_{M2_{TG}}$ y $\delta_{M3_{TG}}$ corresponden a las variables binarias utilizadas.

Se evaluará también reemplazar la última restricción por la condición $\delta_{M1_{TG}} + \delta_{M2_{TG}} + \delta_{M3_{TG}} = 1$ que es equivalente a la condición de or exclusivo, de manera de eliminar una variable binaria y con ello acelerar el proceso de optimización.

2. Modelo Difuso: En este caso se tendrán los mismos modelos $M1_{TG}$, $M2_{TG}$ y $M3_{TG}$, pero además se definirán 3 funciones de pertenencia $FM1_{TG}$, $FM2_{TG}$

CAPÍTULO 4. OPTIMIZACIÓN DE LA OPERACIÓN DE UNA CENTRAL TÉRMICA DE CICLO COMBINADO

y $FM3_{TG}$ (corresponden a los trapecios que aparecen en la figura 4.8) de cada modelo a un cluster de temperatura. El modelo final se calcula según la regla de desfuzzificación estándar para modelos difusos de Takagi-Sugeno:

$$M_{final} = \frac{FM1_{TG}(T_{amb}) \cdot M1_{TG} + FM2_{TG}(T_{amb}) \cdot M2_{TG} + FM3_{TG}(T_{amb}) \cdot M3_{TG}}{FM1_{TG}(T_{amb}) + FM2_{TG}(T_{amb}) + FM3_{TG}(T_{amb})} \quad (4.3.19)$$

Por otro lado, la turbina a vapor aumenta su rendimiento con el aumento de la temperatura ambiente, lo que básicamente se aplica por el aumento en la temperatura de los gases de escape que libera la turbina a gas. En este caso sólo se usarán 2 modelos lineales ya que los cambios en el rendimiento no son tan pronunciados como en el caso de la turbina a gas.

La figura 4.9 muestra el caso análogo para la turbina a vapor.

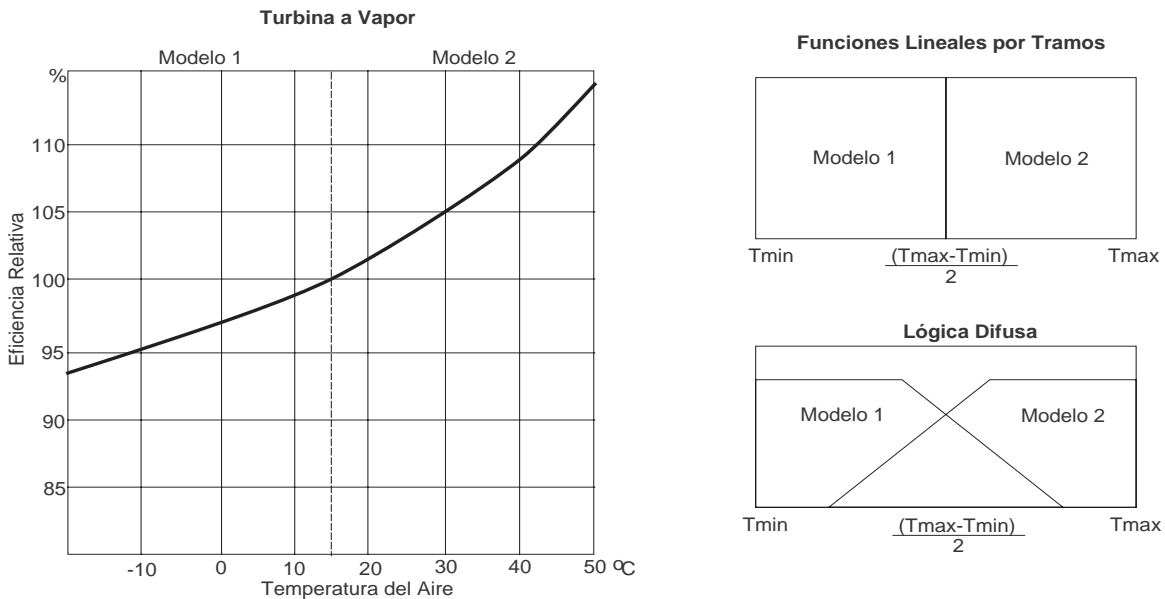


Figura 4.9: Esquemas de modelación para turbina a vapor

La modelación matemática será la siguiente:

1. Modelo Lineal por Tramos: En este caso se tendrán 2 modelos $M1_{TV}$ y $M2_{TV}$.

CAPÍTULO 4. OPTIMIZACIÓN DE LA OPERACIÓN DE UNA CENTRAL TÉRMICA DE CICLO COMBINADO

El modelo $M1_{TV}$ producirá menos potencia que $M2_{TV}$, lo que se logrará de manera similar a lo hecho con la turbina a gas, es decir, usando un ponderador $\alpha \in [0, 1]$ para el modelo 1 y un ponderador $\beta \in [1, \infty[$ para el modelo 2. Estos ponderadores se aplicarán sobre un modelo "neutro". Las ecuaciones serán las siguientes:

$$\delta_{M1_{TV}} = 1 \iff T_{min} < T_{amb} \leq \frac{T_{max} - T_{min}}{2} \quad (4.3.20)$$

$$\delta_{M2_{TV}} = 1 \iff \frac{T_{max} - T_{min}}{2} < T_{amb} \leq T_{max} \quad (4.3.21)$$

Se evaluará también reemplazar la última restricción por la condición $\delta_{M1_{TV}} + \delta_{M2_{TV}} = 1$ que es equivalente a la condición de "or" exclusivo.

2. Modelo Difuso: En este caso se tendrán los mismos modelos $M1_{TV}$ y $M2_{TV}$, pero además se definirán 2 funciones de pertenencia $FM1_{TV}$ y $FM2_{TV}$ (corresponden a los trapecios que aparecen en la figura 4.9) de cada modelo a un cluster de temperatura. El modelo final se calcula según la regla de desfuzzificación estandar para modelos difusos de Takagi-Sugeno:

$$M_{final} = \frac{FM1_{TV}(T_{amb}) \cdot M1_{TV} + FM2_{TV}(T_{amb}) \cdot M2_{TV}}{FM1_{TV}(T_{amb}) + FM2_{TV}(T_{amb})} \quad (4.3.22)$$

De esta forma se quiere emular el comportamiento real del rendimiento del ciclo combinado cuando existen cambios de temperatura ambiente, tal como se mostró en la figura 4.7.

Como se puede observar el modelo MLD generado agrupa muchas de las características centrales en el funcionamiento de una central de ciclo combinado. Se han considerado modelos dinámicos, condiciones lógicas y restricciones de operación lo

que permite una representación bastante fiel del funcionamiento real de la planta. A continuación se describirá la estructura del funcional a optimizar.

4.4. Transformación del Problema de Optimización Económica en un Problema de Control Predictivo Híbrido

En todo proceso industrial lo que se desea es maximizar las ganancias que este puede generar, es decir, de alguna u otra forma existe un funcional que incluye los gastos en que se incurre por la operación del sistema y además incluye las ganancias asociadas a la venta del producto, luego lo que se desea es maximizar los beneficios dados por:

$$\min C - V \quad (4.4.1)$$

s.a.

Sistema.

donde C simboliza los costos y V las ventas, y "sistema" corresponde a un modelo dinámico o estático del funcionamiento del sistema. El problema anterior no tiene nada que ver directamente con un controlador, por lo tanto, el paso siguiente consiste en transformar este problema en uno de control, para lo cual se adaptará la función a minimizar actual a una que involucre variables de control junto a criterios económicos. El funcional a utilizar será el siguiente [16]:

$$J = C_{dem} + C_{change} + C_{start_up} + C_{fixed} - E + C_{start_up_gas} + C_{fixed_gas} + C_{fuel} \quad (4.4.2)$$

Para poder explicar de mejor manera cada una de las componentes de J , se utilizarán los siguientes índices: Sea k el instante actual y M el horizonte de control. Se usa la notación $f(t|k)$ para indicar una función del tiempo definida para $t \geq k$, que puede depender del instante actual k .

4.4.1. Costos

En esta sección se explicará el rol que tiene cada costo citado en la ecuación (4.4.2).

- C_{dem} corresponde a la función de penalización por no cumplir la demanda de energía eléctrica o vapor durante el horizonte de predicción. Desde el punto de vista de control, este término ayuda a producir acciones de control tendientes a minimizar el error existente entre las referencias de potencia y vapor, y la actual producción. Su expresión es la siguiente:

$$C_{dem} = \sum_{t=k}^{k+M-1} p_{dem_el}(t+1|k) |y_{pow}(t+1|k) - d_{el}(t+1|k)| + \sum_{t=k}^{k+M-1} p_{dem_st}(t|k) |u_2(t|k) - d_{st}(t|k)| \quad (4.4.3)$$

donde $y_{pow}(t|k) = y_2(t|k) + y_3(t|k)$, p_{dem_el} y p_{dem_st} son ponderadores positivos adecuados. Además, $d_{el}(t|k)$ y $d_{st}(t|k)$ corresponden a las demandas de potencia eléctrica y vapor, respectivamente, durante el horizonte de predicción. Ambos ponderadores se suponen conocidos durante el periodo de optimización y pueden ser obtenidos mediante una investigación económica⁶ previa.

- C_{change} corresponde al costo de cambiar el punto de operación entre dos instantes consecutivos. Desde el punto de vista de control este requerimiento es so-

⁶También conocida como Despacho Económico

CAPÍTULO 4. OPTIMIZACIÓN DE LA OPERACIÓN DE UNA CENTRAL TÉRMICA DE CICLO COMBINADO

licitado para obtener referencias con dinámica suave, lo que matemáticamente puede ser planteado de la siguiente forma:

$$C_{change} = \sum_{t=k}^{k+M-2} p_{\Delta u_1}(t|k) |u_1(t+1|k) - u_1(t|k)| + \sum_{t=k}^{k+M-2} p_{\Delta u_2}(t|k) |u_2(t+1|k) - u_2(t|k)| \quad (4.4.4)$$

donde $p_{\Delta u_1}(t|k)$ y $p_{\Delta u_2}(t|k)$ son ponderadores positivos.

- C_{start_up} corresponde al costo de encender la turbina a vapor. De hecho, durante la partida no se produce energía, pero se paga el costo del combustible. Este término tiene un significado netamente económico y su función es alertar al controlador para que no encienda la turbina a vapor a menos que sea necesario⁷. La expresión matemática para este costo es la siguiente:

$$C_{start_up} = \sum_{t=k}^{k+M-2} p_{start_up}(t|k) \max\{u_{l2}(t+1|k) - u_{l2}(t|k), 0\} \quad (4.4.5)$$

donde $p_{start_up}(t|k)$ es un ponderador positivo cuyo valor puede variar según el retardo asociado. La función $\max(x, 0)$ está construida de tal forma que sea distinta de cero sólo durante la partida ($x > 0$).

- C_{fixed} representa el costo asociado a mantener encendida la turbina a vapor. Este costo es distinto de cero sólo si la turbina está encendida y no depende de la cantidad de vapor producida o de la potencia producida. C_{fixed} está dado por:

$$C_{fixed} = \sum_{t=k}^{k+M-1} p_{fixed}(t|k) u_{l2}(t|k) \quad (4.4.6)$$

⁷Esto se aplica si la central posee cogeneración, en caso de que se trate de una central de ciclo combinado la turbina a vapor está encendida todo el tiempo

CAPÍTULO 4. OPTIMIZACIÓN DE LA OPERACIÓN DE UNA CENTRAL TÉRMICA DE CICLO COMBINADO

donde p_{fixed} representa el incremento en el costo de mantenimiento por el uso de la turbina.

- E representa las ganancias obtenidas por vender vapor y electricidad. Además, este término toma en consideración que no existen ganancias por sobreproducción, para lo cual se incluye la función min entre lo producido y lo demandado. De esta forma si se produce más de lo demandado no existirán ganancias. La expresión matemática de E es la siguiente:

$$E = \sum_{t=k}^{k+M-1} p_{el}(t+1|k) \min[y_{pow}(t+1|k), d_{el}(t+1|k)] + \sum_{t=k}^{k+M-1} p_{st}(t|k) \min[u_2(t|k), d_{st}(t|k)] \quad (4.4.7)$$

donde p_{el} y p_{st} representan los pesos por electricidad y vapor respectivamente.

- $C_{start_up_gas}$ es el costo de partida de la turbina a gas:

$$C_{start_up_gas} = \sum_{t=k}^{k+M-2} p_{start_up_gas}(t|k) \max\{u_{l1}(t+1|k) - u_{l1}(t|k), 0\} \quad (4.4.8)$$

donde $p_{start_up_gas}(t|k)$ es un ponderador positivo cuyo valor puede variar de acuerdo al retardo asociado.

- C_{fixed_gas} representa el costo de mantener operativa la turbina a gas. Es análogo a C_{fixed} .

$$C_{fixed} = \sum_{t=k}^{k+M-1} p_{fixed_gas}(t|k) u_{l1}(t|k) \quad (4.4.9)$$

donde p_{fixed_gas} representa el incremento en el costo de mantenimiento por el uso de la turbina.

CAPÍTULO 4. OPTIMIZACIÓN DE LA OPERACIÓN DE UNA CENTRAL TÉRMICA DE CICLO COMBINADO

- C_{fuel} representa el costo asociado al consumo de combustible, su expresión matemática es la siguiente:

$$C_{fixed} = \sum_{t=k}^{k+M-1} p_{fuel}(t|k)y_1(t|k) \quad (4.4.10)$$

donde p_{fuel} representa el incremento en el costo de combustible por el uso de las turbinas.

Como se puede observar, dentro de un mismo funcional ha sido posible tomar en consideración características económicas y de control, la importancia relativa entre ambas estará dada por la elección de los ponderadores asociados.

4.4.2. Derivación del Problema de Optimización Entera-Mixta

El problema de optimización consiste en maximizar J sujeto a un modelo de la forma (2.2.1) descrito en la sección 4.3.3 y a las restricciones de operación. Las variables de optimización son $u(t|k)$, $\delta(t|k)$ y $z(t|k)$ para $t = k \dots k + M - 1$.

Para poder plantear el problema de manera más explícita se introducirá la notación \underline{p}_k y se aplica sobre cualquier vector $p(t|k)$ (ponderadores de los distintos términos que componen la función objetivo) tal que:

$$\underline{p}_k = [p(k|k) \cdots p(k + M - 1|k)]' \quad (4.4.11)$$

CAPÍTULO 4. OPTIMIZACIÓN DE LA OPERACIÓN DE UNA CENTRAL TÉRMICA DE CICLO COMBINADO

Usando esta notación es posible escribir el problema de optimización como:

$$\begin{aligned} \min J[\underline{u}, \underline{\delta}, \underline{z}] = & C_{dem} + C_{change} + C_{fuel} + C_{start.up} + C_{fixed} - E + \quad (4.4.12) \\ & C_{start.up.gas} + C_{fixed.gas} \end{aligned}$$

s.a.

$$\begin{aligned} x(k|k) &= x_k \\ \underline{x}_{k+1} &= T_x \underline{x}_k + T_u \underline{u}_k + T_\delta \underline{\delta}_k + T_z \underline{z}_k \\ \underline{y}_k &= C_C \underline{x}_k + D_{D1} \underline{u}_k + D_{D2} \underline{\delta}_k + D_{D3} \underline{z}_k \\ E_{E2} \underline{\delta}_k + E_{E3} \underline{z}_k &\leq E_{E1} \underline{u}_k + E_{E4} \underline{x}_{k+1} + E_{E5} \end{aligned}$$

donde las matrices T_x , T_δ , T_u y T_z pueden ser calculadas iterativamente usando la ecuación (2.3.2). Dicha ecuación también sirve para generar el resto de las matrices que aparecen en dicha ecuación.

Debido a que las no linealidades que aparecen en el funcional son compuestas por funciones lineales a tramos, también es posible transformar el funcional a una expresión lineal como se explicó en la sección 3.3. Sin embargo, es posible aprovechar que las funciones lineales a tramos que aparecen en (4.4.12) se pueden reescribir sin usar variables binarias adicionales. Para ejemplificar esto, se usará la función⁸ $|x|$:

$$\begin{aligned} \min \quad p|x| &\equiv \min \quad p\eta \quad (4.4.13) \\ p > 0 \quad p > 0 \\ x \in R \quad \eta, x \in R \\ Ax \leq b \quad Ax \leq b \\ |x| &\leq \eta \end{aligned}$$

⁸El procedimiento para el resto de las funciones es explicado en el apéndice

CAPÍTULO 4. OPTIMIZACIÓN DE LA OPERACIÓN DE UNA CENTRAL TÉRMICA DE CICLO COMBINADO

Esta transformación se puede utilizar con el término $C_{dem.el}$, el cual puede ser escrito como:

$$C_{dem} = \underline{p}'_{dem.el,k} \underline{\eta}_{dem.el,k}$$

donde $\underline{p}'_{dem.el,k}$ es un vector columna de elementos positivos y $\underline{\eta}_{dem.el,k}$ es un vector de variables auxiliares definidas de acuerdo con (4.4.13) y sujeta a las las siguientes restricciones:

$$\underline{\eta}_{dem.el,k} \geq \begin{bmatrix} |y_2(k) + y_3(k) - d_{el}(k)| \\ \vdots \\ |y_2(k + M - 1) + y_3(k + M - 1) - d_{el}(k + M - 1)| \end{bmatrix}$$

Utilizando procedimientos similares a este, es posible escribir el resto de los términos de (4.4.12):

- $C_{dem.st} = \underline{p}'_{dem.st,k} \underline{\eta}_{dem.st,k}$
- $C_{change} = \underline{p}'_{\Delta u_1,k} \underline{\eta}_{\Delta u_1,k} + \underline{p}'_{\Delta u_2,k} \underline{\eta}_{\Delta u_2,k}$
- $C_{start.up} = \underline{p}'_{start.up,k} \underline{\eta}_{start.up,k}$
- $E = -\underline{p}'_{el,k} \underline{\eta}_{el,k} - \underline{p}'_{st,k} \underline{\eta}_{st,k}$
- $C_{start.up.gas} = \underline{p}'_{start.up.gas,k} \underline{\eta}_{start.up.gas,k}$

Una vez hecho esto es posible reescribir el problema planteado en (4.4.12) a la forma mostrada en (3.3.6), donde V queda definido como:

$$V = \left[\underline{\eta}_{dem.el,k} \underline{\eta}_{dem.st,k} \underline{\eta}_{\Delta u_1,k} \underline{\eta}_{\Delta u_2,k} \underline{\eta}_{start.up,k} \underline{\eta}_{el,k} \underline{\eta}_{st,k} \underline{\eta}_{start.up.gas,k} \underline{u}'_k \underline{\delta}'_k \underline{z}'_k \right] \quad (4.4.14)$$

4.4.3. Experimentos

El propósito de esta sección es mostrar la efectividad del esquema de control predictivo híbrido mediante simulaciones. Se replicarán algunos de los resultados mostrados en [16] y además se presentan las propuestas elaboradas en este trabajo. En dicho documento se utilizan los siguientes modelos para las potencias y consumo de combustible:

$$f_1(u_1) = 0,0748u_1 + 2,05663$$

$$f_2(u_1, u_2) = 0,62u_1 - 0,857u_2 + 29,714$$

$$f_3(u_1) = 1,83u_1$$

Además, existen los siguientes límites para las referencias de potencias que utilizan las turbinas a vapor y gas, los que son mostrados en la tabla 4.2

Entrada	Mínimo	Máximo
u_1	50 %	100 %
u_2	2Kg/s	37Kg/s

Tabla 4.2: Límites inferiores y superiores de referencias

Los parámetros de la función objetivo son los siguientes:

$$p_{dem.el} = 10[MW]$$

$$p_{dem.st} = 1[kg/s]$$

$$p_{st} = 0,2[kg/s]$$

$$p_{\Delta u_1} = 0,01[\%]$$

$$p_{\Delta u_2} = 0,01[\%]$$

$$p_{fixed.gas} = 1$$

$$p_{start.up} = 50$$

$$p_{start.up.gas} = 50$$

$$p_{el} = 0,2[MW]$$

$$p_{fuel} = 0,02[kg/s]$$

$$p_{fixed} = 1$$

CAPÍTULO 4. OPTIMIZACIÓN DE LA OPERACIÓN DE UNA CENTRAL TÉRMICA DE CICLO COMBINADO

A continuación se detallan los experimentos realizados.

1. Mínimo horizonte de predicción ($M = 2$)

El primer experimento utiliza el mínimo horizonte de predicción posible, i.e., $M = 2$. El estado inicial en $k = 0$ es $\xi_{on.tv} = 10$, $\xi_{on.tg} = 12$, $\xi_{off.tv} = 0$, $\xi_{off.tg} = 0$, $\xi_{d.tv} = -10$ y $\xi_{d.tg} = -12$. Los resultados se muestran en la figura 4.10.

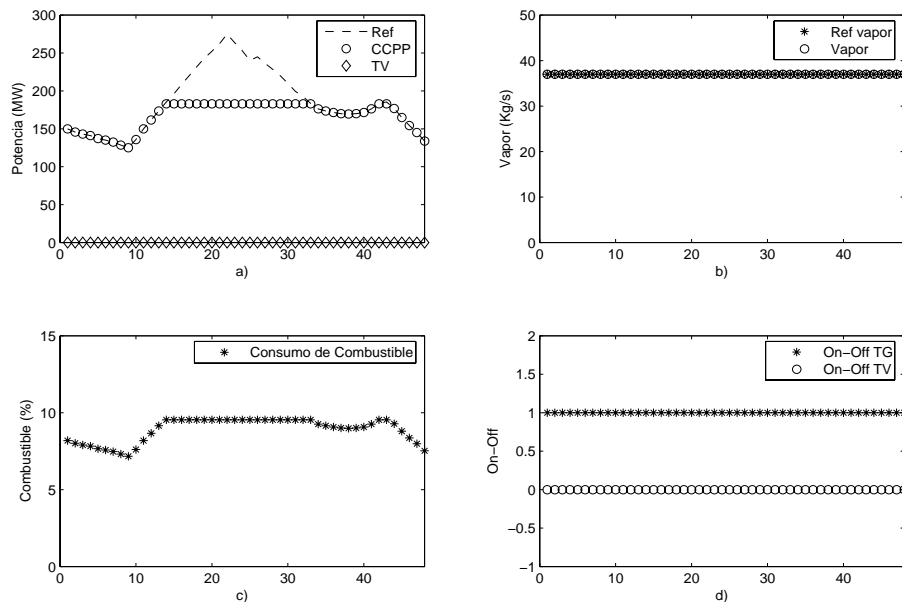


Figura 4.10: Resultados usando $M = 2$

La figura 4.10 muestra básicamente 4 variables de un mismo experimento, la subfigura 4.10.a muestra la producción de potencia donde 'Ref' corresponde a la referencia, "CCPP" corresponde a la producción de potencia del ciclo combinado y "TV" corresponde a la producción de potencia de la turbina a vapor. La subfigura 4.10.b muestra la producción de vapor, donde "Ref vapor" corresponde a la referencia de vapor y "Vapor" a la producción de vapor. La subfigura 4.10.c muestra el consumo de combustible. Finalmente la figura 4.10.d muestra las señales de encendido de la turbina a gas ("on-off TG") y de la

turbina a vapor ("on-off TV").

En este experimento se observa que el controlador no es capaz de generar las acciones de control necesarias para que la planta pueda seguir el perfil de potencia demandado. Esta característica se presenta en $k = 15$ donde el controlador debiese haber encendido la turbina a vapor, pues la turbina a gas ya estaba operando a su capacidad máxima, para poder producir la cantidad de potencia demandada. La explicación de este hecho tiene relación con el retardo asociado a la partida de la turbina a vapor, pues al estar apagada hasta el instante $k = 14$ implica que se encuentra en estado de partida caliente, por lo tanto, $\xi_{d.tv} = 1$ y deben pasar, por lo menos, dos instantes de tiempo más para que se de la condición de $\xi_{d.tv} < 0$ y la turbina pueda ser encendida. Sin embargo, esos dos instantes más coinciden con el horizonte de predicción utilizado ($M = 2$) y por ello no puede ser tomado en cuenta por el proceso de optimización. La solución a este problema pasa por aumentar el horizonte de predicción. Se utilizará un horizonte de predicción ($M = 3$).

En la figura 4.11 se muestra que el usar un horizonte de predicción mayor soluciona el problema de forma inmediata para el caso de la demanda eléctrica. Sin embargo, no se puede cumplir con la demanda de vapor durante un lapso de tiempo. Dicho fenómeno es atribuido a la mayor importancia dada a cumplir la demanda de electricidad ($p_{dem.el} = 10$) que la demanda de vapor ($p_{dem.st} = 1$). Además, es posible observar que el comando de encendido para la turbina a vapor es dado en $k = 12$ de manera de cumplir con la condición $\xi_{d.tv} < 0$ en el momento requerido.

De esta forma se puede concluir que es necesario utilizar un horizonte de predicción mayor a 4 para que el controlador sea capaz de utilizar la infor-

mación relativa a todos los modos de partida modelados.

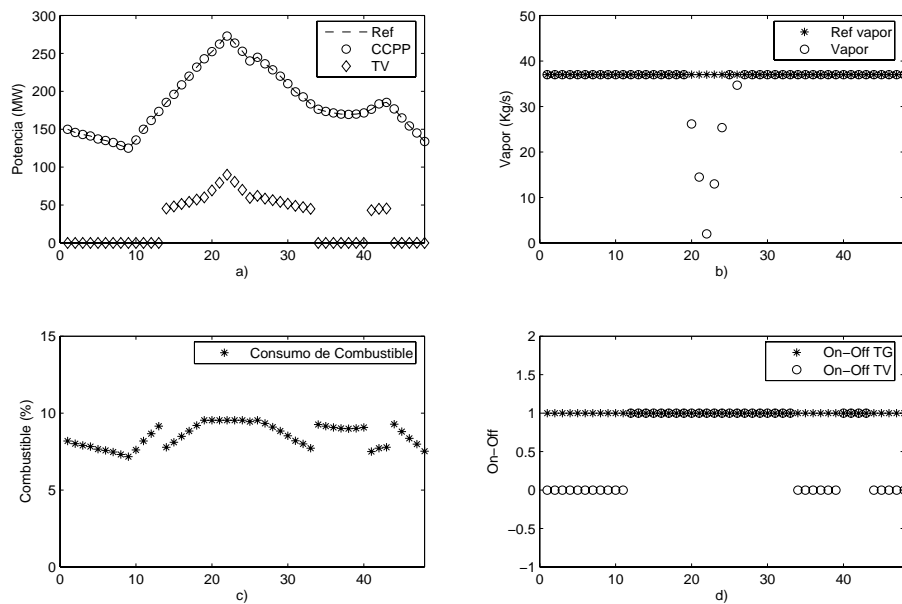


Figura 4.11: Resultados usando $M = 3$

2. Penalización de las entradas.

En este experimento se utilizan las mismas condiciones iniciales que en el experimento anterior y horizonte de predicción se mantiene en $M = 3$, pero se cambia el perfil de la demanda. Los resultados se muestran en la figura 4.12.

Como se puede observar, la secuencia de potencias demandadas es tal que no puede ser satisfecha por la planta debido a que se violan los límites de potencia mínima. A partir del instante $k = 10$ es conveniente, desde el punto de vista económico, que la central opere. El controlador actúa de manera solvente aún cuando la curva de demanda no es la más idónea para su funcionamiento. Además, se puede notar que efectivamente no hay consumo de combustible mientras la turbina a gas permanece apagada ($k = 2 \dots 9$) y una vez que es encendida ($k = 10$) el combustible comienza a ser consumido. Esto es justamente

CAPÍTULO 4. OPTIMIZACIÓN DE LA OPERACIÓN DE UNA CENTRAL TÉRMICA DE CICLO COMBINADO

lo que se esperaba, pues durante el proceso de partida existe un consumo de combustible a pesar de que no existe producción de potencia.

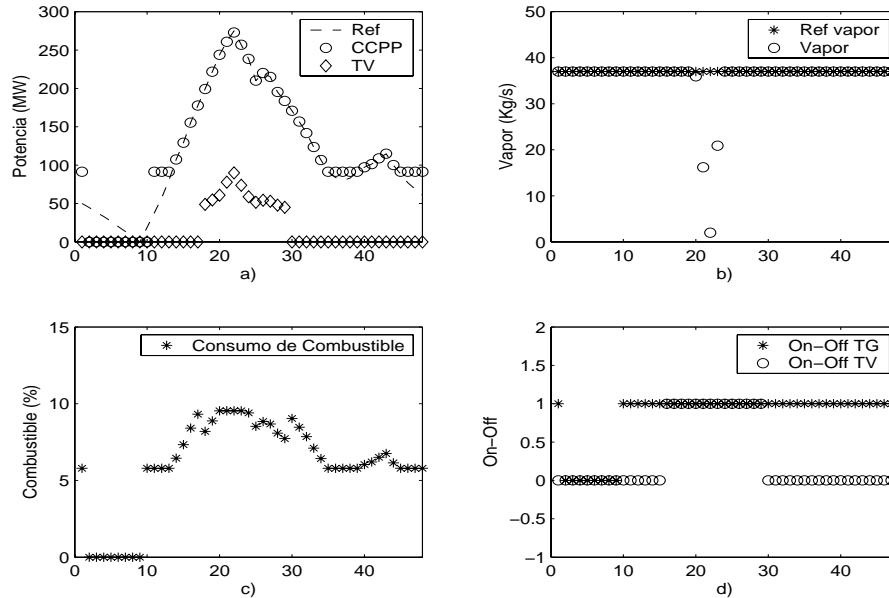


Figura 4.12: Resultados usando $M = 3$

Es importante mencionar que en las simulaciones que se han mostrado no existe ninguna restricción de rampa ni tiempos mínimos de funcionamiento y detención, es decir, los cambios en la potencia producida y los instantes de partida y detención son elegidos por el controlador de manera de maximizar los beneficios de relativos a la operación de la planta.

3. Mínimos tiempos de funcionamiento y parada

En este experimento se utilizarán los mismos perfiles de demanda mostrados en la figura 4.11. En esa figura se observa que la turbina a vapor permanece encendida entre $k = 41$ y $k = 43$, en este caso se impone que la turbina a vapor permanezca encendida desde $k = 41$ hasta $k = 45$. El resultado se muestra en la figura 4.13.

CAPÍTULO 4. OPTIMIZACIÓN DE LA OPERACIÓN DE UNA CENTRAL TÉRMICA DE CICLO COMBINADO

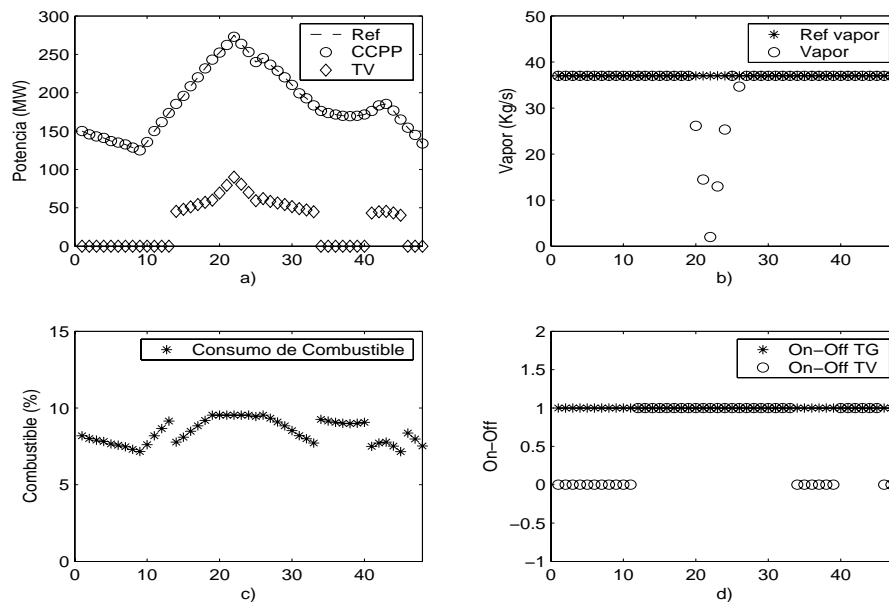


Figura 4.13: Resultados usando $M = 3$

Por otro lado también se puede obligar a la turbina a gas a mantenerse fuera de funcionamiento durante un periodo determinado. Para ejemplificar esta restricción se obligará a la turbina a gas a mantenerse detenida 15 instantes consecutivos usando el perfil de potencia mostrado en la figura 4.12. Los resultados de esta prueba se muestran en la figura 4.14.

Los resultados mostrados se adecuan perfectamente a los requerimientos de diseño, es decir, es posible fijar periodos de tiempo arbitrarios durante los cuales las unidades deben mantenerse en funcionamiento o detenidas. Lo interesante es que el controlador es capaz de tomar dichas restricciones y generar acciones de control óptimas adecuadas que cumplen con satisfacer la demanda eléctrica requerida.

4. Restricciones de rampa sobre potencia eléctrica generada.

En este experimento se utilizará un perfil de potencia con cambios en escalón

CAPÍTULO 4. OPTIMIZACIÓN DE LA OPERACIÓN DE UNA CENTRAL TÉRMICA DE CICLO COMBINADO

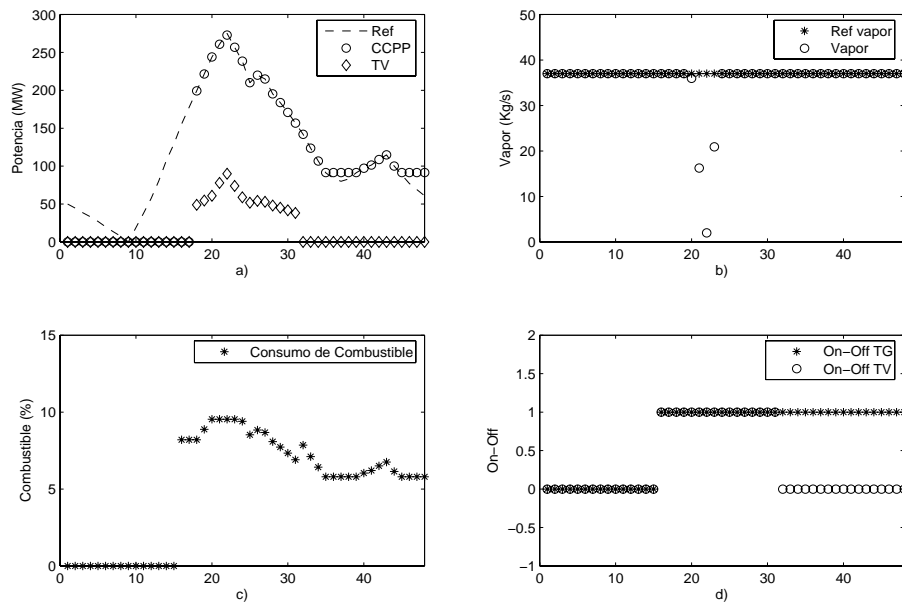


Figura 4.14: Resultados usando $M = 3$

absolutamente exagerado con el fin de mostrar el efecto de las restricciones de rampa. Las restricciones de rampas utilizadas son: $Ru_{tv} = 20$, $Rd_{tv} = 30$, $Ru_{tg} = 20$ y $Rd_{tg} = 30$ (ver ecuación (4.3.16)). Los resultados de esta prueba se muestran en las figuras 4.15 y 4.16

La figura 4.15 muestra un comportamiento inadecuado a partir del instante $k = 13$ pues el controlador, cuyo horizonte de predicción es 3, decide no encender la turbina a vapor causando un incumplimiento en los requisitos de potencia eléctrica. Para solucionar dicho problema es necesario aumentar el horizonte de predicción a 8 de tal forma de advertir al controlador del siguiente cambio en la referencia de potencia. Como se puede observar en la figura 4.16, el aumento de $M = 3$ a $M = 8$ corrige el comportamiento anómalo.

CAPÍTULO 4. OPTIMIZACIÓN DE LA OPERACIÓN DE UNA CENTRAL TÉRMICA DE CICLO COMBINADO

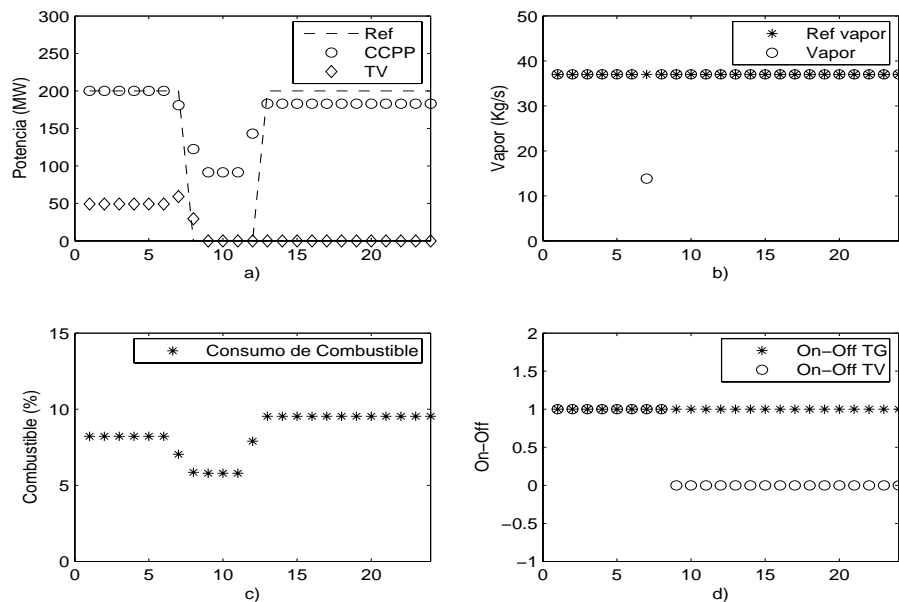


Figura 4.15: Resultados al aplicar restricciones de rampa ($M = 3$)

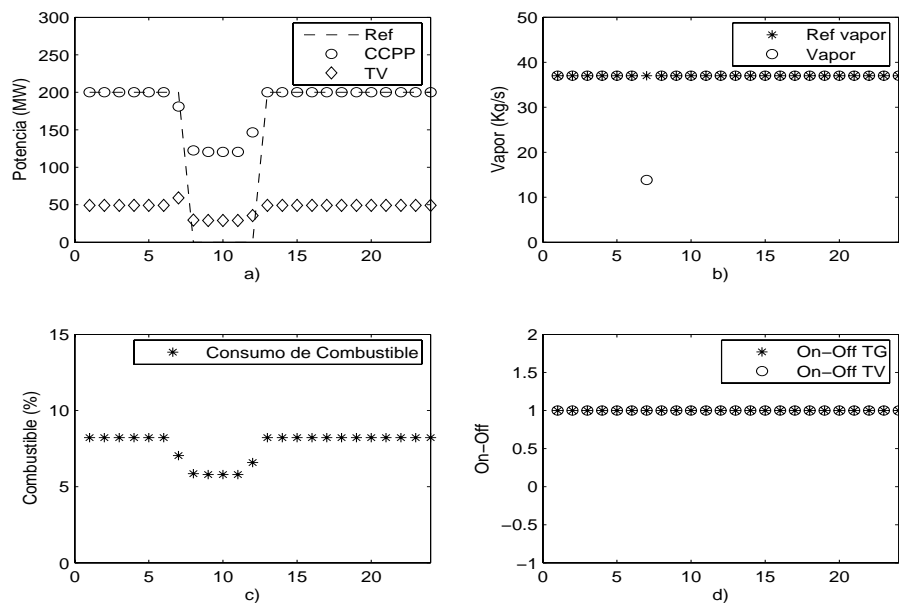


Figura 4.16: Resultados al aplicar restricciones de rampa ($M = 8$)

5. Modelación del Efecto de la Temperatura Ambiente.

Esta simulación utiliza la aproximación lineal por tramos para ambas turbinas.

CAPÍTULO 4. OPTIMIZACIÓN DE LA OPERACIÓN DE UNA CENTRAL TÉRMICA DE CICLO COMBINADO

Los modelos se ajustarán de manera off-line. El modelo "neutro" de la turbina a gas será idéntico al mostrado en el inicio de la sección, $\alpha = 1,02$ y $\beta = 0,98$. Para el caso de la turbina a vapor el modelo neutro también corresponde al descrito al inicio de la sección, los ponderadores utilizados serán $\alpha = 0,98$ y $\beta = 1,02$. Se realizaron 3 simulaciones considerando una demanda de potencia eléctrica de 200[MW] y una demanda de vapor de 37[kg/s], pero dichas solicitudes ocurrían a 3 temperaturas ambientales distintas. Los consumos de combustible para cada caso se muestran en la tabla 4.3.

Temperatura [°C]	Consumo de Combustible [%]
-15	8.4045
15	8.5200
40	8.6192

Tabla 4.3: Consumo de combustible en función de la temperatura ambiente para modelo PWM off-line

En la figura 4.7 se observó que la eficiencia del ciclo baja al aumentar la temperatura ambiente, lo que coincide con los resultados mostrados en la tabla 4.3 pues para la misma solicitud de potencia y vapor aumentan los requerimientos de combustible.

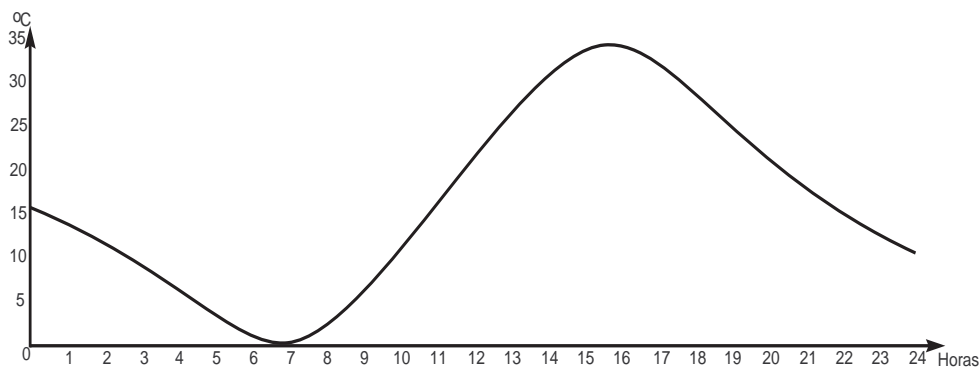


Figura 4.17: Perfil de temperatura diario

La figura 4.17 muestra un perfil de la temperatura ambiente en un lapso de 24

CAPÍTULO 4. OPTIMIZACIÓN DE LA OPERACIÓN DE UNA CENTRAL TÉRMICA DE CICLO COMBINADO

horas. Este perfil es bastante común en zonas desérticas donde la temperatura mínima puede bordear o bajar los 0°C y durante el día puede llegar a los 40°C . Se eligió un perfil con estos peaks para evidenciar los cambios en el consumo de combustible que van asociados a las fluctuaciones de temperatura. La figura 4.18 muestra el comportamiento del consumo de combustible cuando se demandan $200[\text{MW}]$ y $37[\text{kg/s}]$.

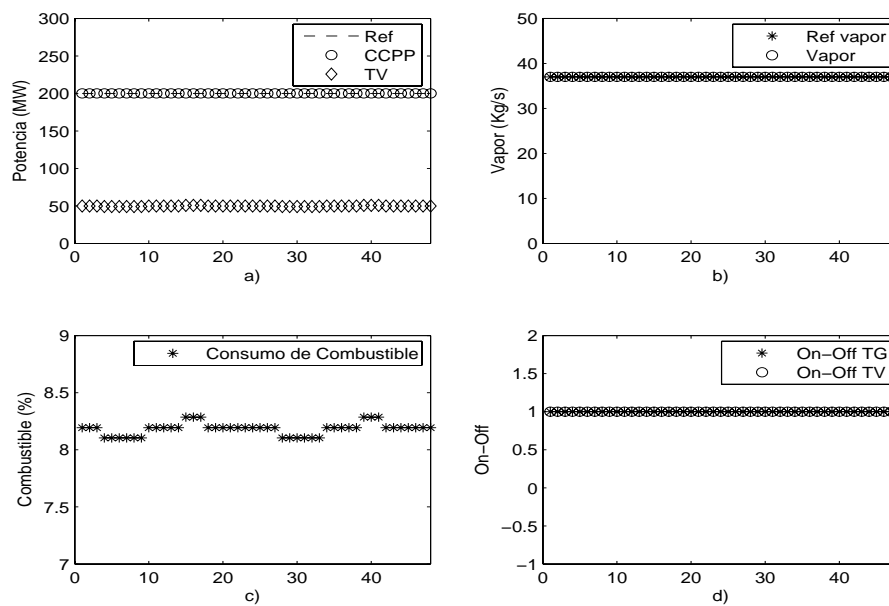


Figura 4.18: Variaciones del consumo de combustible

Es interesante notar que el controlador es capaz de minimizar el efecto de las fluctuaciones de la temperatura ambiente sobre la producción de potencia, hasta hacerlas casi imperceptibles, mediante ciertas correcciones sobre el consumo de combustible. Sin embargo, las fluctuaciones en el consumo de combustible son bruscas lo que se traduce en esfuerzos constantes por parte de las válvulas que controlan el flujo de combustible. Este hecho implica una disminución en la vida útil de la planta. Por estas razones se aplicará la modelación difusa, con lo que se espera obtener perfiles de consumo más suaves.

CAPÍTULO 4. OPTIMIZACIÓN DE LA OPERACIÓN DE UNA CENTRAL TÉRMICA DE CICLO COMBINADO

El modelo basado en lógica difusa utiliza funciones de pertenencia con forma trapezoidal, las que se muestran en las figuras 4.19 y 4.20.

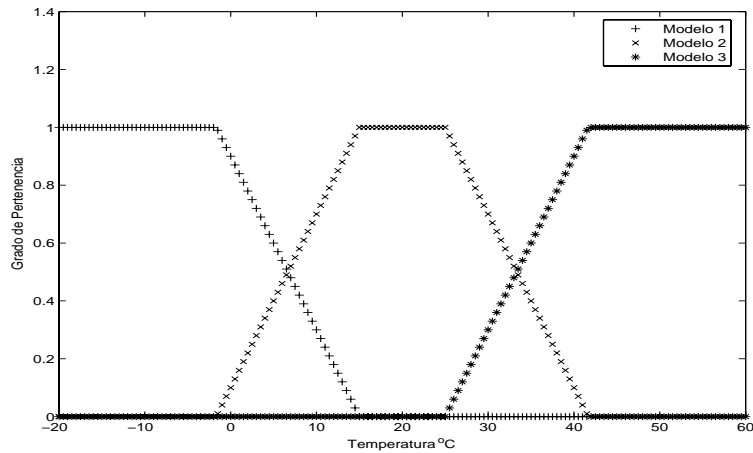


Figura 4.19: Funciones de pertenencia para turbina a gas

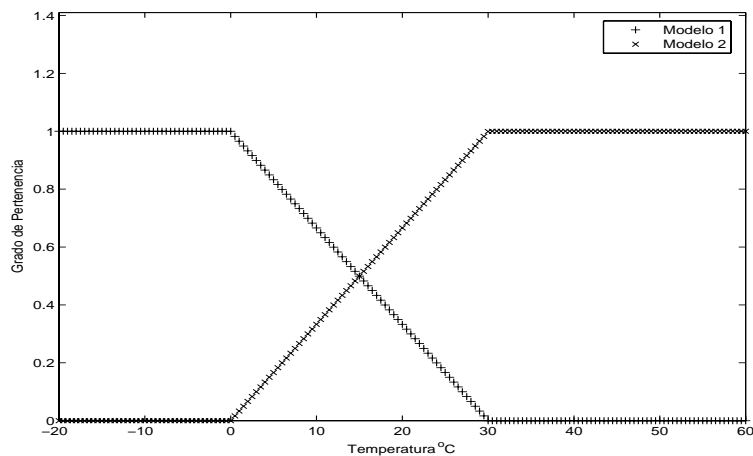


Figura 4.20: Funciones de pertenencia para turbina a vapor

La elección de las funciones de pertenencia es totalmente arbitraria, podría probarse con cualquier otro tipo, pero por su simplicidad y facilidad de programación se decidió utilizar funciones trapezoidales.

La tabla 4.4 muestra los consumos de combustible medios para diferentes temperaturas al utilizar el enfoque off-line. Se observa una ganancia notoria al comparar

CAPÍTULO 4. OPTIMIZACIÓN DE LA OPERACIÓN DE UNA CENTRAL TÉRMICA DE CICLO COMBINADO

los consumos de combustible con el enfoque lineal a tramos off-line mostrados en la tabla 4.3.

Temperatura [$^{\circ}\text{C}$]	Consumo de Combustible [Kg/s]
-15	8.1618
15	8.2233
40	8.2767

Tabla 4.4: Consumo de combustible en función de la temperatura ambiente para modelo difuso off-line

La figura 4.21 muestra el mismo experimento presentado en la figura 4.18, pero en este caso se utiliza la modelación difusa. Como se puede observar, la señal relacionada con el consumo de combustible es bastante suave y el cumplimiento de las demandas de potencia eléctrica y vapor no se ve afectado.

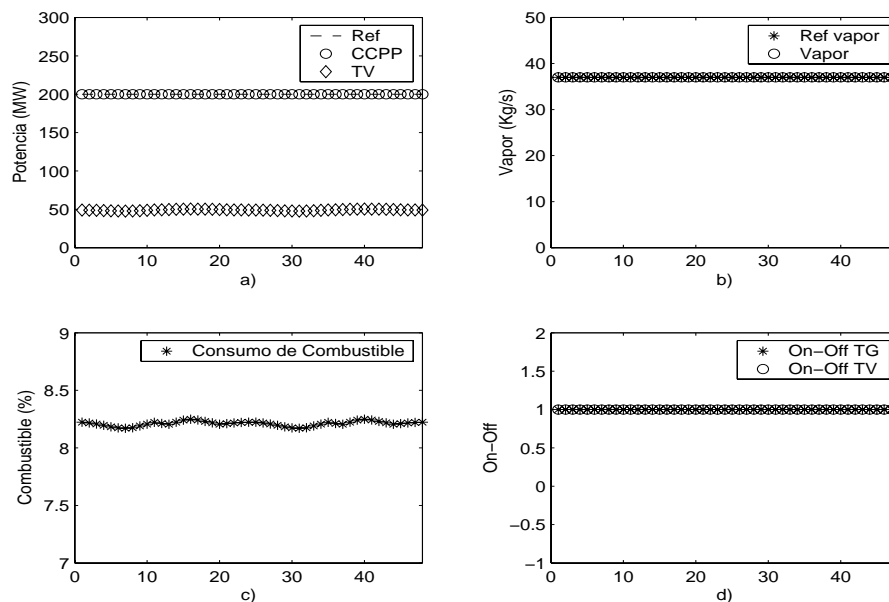


Figura 4.21: Variaciones del consumo de combustible

Al comparar las figuras 4.18 y 4.21 se observa una diferencia notoria entre ambos enfoques, en particular en la suavidad del consumo de combustible. Estos resultados son bastante promisorios y muestran que la lógica difusa es bastante adecuada para

CAPÍTULO 4. OPTIMIZACIÓN DE LA OPERACIÓN DE UNA CENTRAL TÉRMICA DE CICLO COMBINADO

modelar la influencia de la temperatura ambiente sobre la producción de potencia.

El enfoque off-line resulta bastante apropiado para realizar un mejor control de las variables importantes del proceso. Sin embargo, el control predictivo basa su funcionamiento en la capacidad de predecir el comportamiento del sistema, por ello resulta interesante testear el desempeño del enfoque on-line cuya principal diferencia consiste en considerar modificaciones del modelo de predicción durante el proceso de optimización de acuerdo a la predicción realizada del perfil de temperatura. En este trabajo no se desarrolló ningún modelo que sirva para predecir el comportamiento de la temperatura ambiente, solamente se incluirán los datos del perfil mostrado en la figura 4.17 como si fueran conocidos.

Temperatura [°C]	Consumo de Combustible [<i>Kg/s</i>]	
	on-line PWM	on-line Fuzzy
-15	8.4043	8.16
15	8.5198	8.2103
40	8.60	8.2652

Tabla 4.5: Consumo de combustible en función de la temperatura ambiente para modelo PWM y difuso on-line

La tabla 4.5 muestra los consumos de combustible óptimos al considerar el enfoque on-line. En comparación con el enfoque off-line no se observan ganancias suficientemente altas (ver tablas 4.3 y 4.4). Esta razón sumada a la complejidad de predecir el comportamiento de la temperatura ambiente obligan a utilizar el enfoque off-line en aplicaciones reales.

4.4.4. Comentarios

Como se pudo constatar con los experimentos realizados, la utilización de un controlador predictivo híbrido para optimizar el funcionamiento de una central de

CAPÍTULO 4. OPTIMIZACIÓN DE LA OPERACIÓN DE UNA CENTRAL TÉRMICA DE CICLO COMBINADO

ciclo combinado con cogeneración es adecuada. Los aspectos más sobresalientes de este controlador son básicamente:

- **Flexibilidad:** La inclusión de nuevas restricciones al modelo son muy sencillas. Esto se ejemplificó con la adición de restricciones de rampa y tiempos de partida-detención, las que fácilmente se pueden transformar en inecuaciones enteras-mixtas.
- **Escalabilidad:** La modificación del modelo híbrido en relación a hacerlo más complejo también es sencilla, pues ella se traduce en nuevas ecuaciones o inecuaciones las que son naturalmente incluidas en el esquema de modelación.
- **Funcionamiento:** Los diversos experimentos construidos tenían como objetivo poner a prueba el funcionamiento del controlador ante diversas condiciones de operación desde las más sencillas, como el seguimiento de referencia, hasta las más complejas, relativas a las restricciones de rampa y tiempos de partida-detención; en todas ellas el controlador fue capaz de responder de manera adecuada, aunque es necesario mencionar que en ciertas situaciones se requirió aumentar el horizonte de predicción.

Uno de los aportes más interesantes mostrados en este ejemplo es la inclusión del efecto que tiene temperatura ambiente en la producción de potencia. En principio, la forma más simple de incorporarlo fue incluir modelos lineales por tramos para definir la producción de potencia según el valor de la temperatura ambiente, sin embargo, el principal problema asociado al uso de este tipo de modelos es que la transición entre las distintas dinámicas es discontinua lo que se manifestaba de manera clara en el consumo de combustible. En aplicaciones reales se desea que el perfil de consumo de combustible sea suave de manera de no sobreexigir los actuadores

CAPÍTULO 4. OPTIMIZACIÓN DE LA OPERACIÓN DE UNA CENTRAL TÉRMICA DE CICLO COMBINADO

relacionados con las válvulas y bombas que controlan su flujo. De esta necesidad nació la idea de incorporar transiciones suaves entre las dinámicas y en esta línea la lógica difusa aparece como una alternativa interesante de analizar. Para poder implementar esta idea se estudiaron los modelos de Takagi-Sugeno, cuya característica más interesante es que la salida resultante corresponde a una combinación ponderada de cada uno de los modelos lineales elegidos para representar ciertos rangos de potencia.

Los resultados muestran que la modelación difusa logra mejores resultados que la basada en modelos lineales por tramos, es por ello que en la aplicación real se usará sólo la primera opción.

Capítulo 5

Aplicación de la teoría de sistemas híbridos a la optimización del complejo térmico Nehuenco

Todo lo visto en las secciones anteriores tiene como propósito mostrar que la teoría de sistemas híbridos es aplicable a la optimización del funcionamiento de una planta que presenta características híbridas. En ellas, se presentan dos problemas benchmark: un sistema simple que incluye conmutación de dinámica y el simulador simplificado de una central de ciclo combinado. Como se pudo observar, la aplicación conjunta de la modelación MLD junto al controlador MPC fueron exitosamente probados logrando los propósitos para los cuales fueron diseñados. Todo ello corresponde a la antesala del problema que ahora se analizará, que corresponde a la optimización de la operación de un complejo termoeléctrico real. El presente capítulo tiene como fin mostrar como se aborda dicho problema.

5.1. Descripción del Complejo Térmico Nehuenco

El complejo térmico Nehuenco está ubicado en las cercanías de Quillota, en la 5^a región. Dicho complejo es propiedad de Colbún S.A. y forma parte del Sistema Interconectado Central (SIC) cuyo rol principal es abastecer de energía eléctrica a toda la zona centro-sur de Chile.

El complejo térmico Nehuenco está conformado por dos centrales de ciclo combinado, llamadas Nehuenco I y Nehuenco II, y una central de ciclo abierto llamada Nehuenco III. La descripción detallada se encuentra en la tabla 5.1¹.

	Puesta en Servicio	Tipo	Combustible	Potencia Máxima Neta	Turbina a Gas	Turbina a Vapor	Modelo
Nehuenco I	Enero 1999	Ciclo Combinado	Gas Natural & Petróleo Diesel	360MW	Siemens 220 MW	Ansaldo 140 MW	Siemens V94.3
Nehuenco II	Abril 2004	Ciclo Combinado	Gas Natural	384MW	General Electric 253 MW	Alstom 131 MW	General Electric 9FA+e
Nehuenco III	Junio 2002	Ciclo Abierto	Gas Natural & Petróleo Diesel	108MW	General Electric 108 MW		General Electric 9B

Tabla 5.1: Información descriptiva del complejo térmico Nehuenco

Como se puede apreciar de la tabla 5.1, el complejo es capaz de aportar una cantidad bastante importante de potencia al sistema interconectado central (SIC) chileno (representa alrededor del 10 % de la capacidad instalada del SIC) y es por ello que su participación es bastante crítica para una operación segura del sistema.

Es interesante el hecho de que dos de sus máquinas tengan la capacidad de operar tanto con gas natural como con petróleo diesel, pues en períodos en que la disponibilidad de gas natural no está asegurada es crítico que la operación de la central no se vea comprometida del todo. Obviamente los costos por insumo de combustible

¹Fuente: www.colbun.cl

aumentan considerablemente, pero aún teniendo en cuenta este hecho es más importante mantener un servicio continuo.

Todo el trabajo realizado anteriormente tiene relación con una central de ciclo combinado que se utiliza en un esquema de cogeneración; en el caso de Nehuenco ambos ciclos combinados no poseen cogeneración. Sin embargo, ello no implica un cambio importante con respecto a la modelación realizada anteriormente, pero en este trabajo se desea aplicar la estrategia de control predictivo híbrido como sistema de control principal, luego es imperativo aumentar la frecuencia de muestreo de los modelos dinámicos, de manera de poder reaccionar ante perturbaciones, y además realizar una mejor modelación del sistema de control. Todo este proceso implica que los tiempos de cómputo de las acciones de control pueden aumentar y por ello se realizarán ciertas simplificaciones de manera que dichas alzas no sobrepasen el tiempo de muestreo seleccionado.

El desarrollo del sistema de control se realiza para Nehuenco II, pues Nehuenco I posee una configuración bastante similar y Nehuenco III corresponde a ciclo abierto, que es un submodo de operación de cualquier central de ciclo combinado. La siguiente sección describe el funcionamiento de Nehuenco II.

5.2. Descripción General de Nehuenco II

La cantidad de potencia máxima que puede producir al operar en ciclo combinado es de 384 MW, lo que puede variar dependiendo de las condiciones ambientales. Esta central sólo puede operar con gas natural, y su eficiencia máxima está en el orden del 60%.

Esta central eléctrica de ciclo combinado posee los siguientes elementos principales:

CAPÍTULO 5. OPTIMIZACIÓN DEL COMPLEJO TÉRMICO NEHUENCO

- Turbina a Gas:
 - Compresor.
 - Sistema de Combustible.
 - Cámara de Combustión.
 - Turbina.

- Caldera:
 - Elevadores.
 - Domo.
 - Recalentador.
 - Economizador.
 - Caldera.

- Turbina a Vapor:
 - Válvulas de Admisión.
 - Turbina de Alta Presión.
 - Turbina de Media Presión.
 - Turbina de Baja Presión.

- Condensador:
 - Torres de Enfriamiento.

Toda la instrumentación y decisión acerca del "software" y "hardware" de control estuvo a cargo de la empresa Alstom, quien monitorea constantemente la operación de todos elementos anteriormente mencionados. Esto permite tomar acciones preventivas con respecto al mantenimiento de todos los elementos constitutivos,

CAPÍTULO 5. OPTIMIZACIÓN DEL COMPLEJO TÉRMICO NEHUENCO

de manera de aumentar la vida útil de toda la planta. La operación de Nehuenco II se realiza desde la sala de control que está ubicada dentro del edificio de oficinas administrativas, en dicha sala existen HMI's (Human Machine Interfaces) que le permiten al operador conocer el estado de todas las variables que son monitoreadas y además el sistema de control es capaz generar alertas cuando el funcionamiento de algún elemento no es apropiado. La automatización del proceso es casi completa, lo que queda de manifiesto al observar que sólo es necesario una persona para operar un ciclo combinado.

En Chile, el marco de funcionamiento del sector generación eléctrica está inserto en un esquema de competencia. El organismo que decide cuanta potencia debe aportar al sistema cada central es el Centro de Despacho Económico de Carga (CDEC). Esta entidad entrega la programación horaria que debe cumplir cada central y en ella se detallan la cantidad de potencia y la hora del día en que dicha potencia debe ser inyectada al sistema. El operador de la central es el encargado de tomar las acciones que permitan a la central respetar dicho despacho.

La mantención está a cargo de empresas contratistas, las cuales tienen personal constantemente en el complejo. Este personal se encarga de realizar el mantenimiento predictivo y son los únicos autorizados a realizar cambios de equipos o instrumentación durante fallas.

5.3. Modelación de Nehuenco II

La modelación dinámica de un ciclo combinado es una tarea de gran envergadura, pues tal como se ha explicado en capítulos anteriores, la cantidad de variables y lazos de control involucrados son de dimensiones considerables. Sólo un ciclo combinado puede tener más de 700 variables, 10 lazos de control principales, 100 lazos de

CAPÍTULO 5. OPTIMIZACIÓN DEL COMPLEJO TÉRMICO NEHUENCO

control secundarios y más de 1000 condiciones lógicas de operación. Todo ello tiene como objetivo que el funcionamiento del ciclo sea seguro y efectivo, considerando protecciones para los principales elementos constitutivos, en especial las turbinas, caldera y generadores, que corresponden a más del 50 % de la inversión, pero todas las protecciones no evitan que el sistema sea capaz de generar la potencia solicitada y además responder a solicitudes de emergencia.

La modelación mostrada en [16] es bastante innovadora pues agrega a la dinámica los aspectos lógicos de funcionamiento de una central de ciclo combinado con cogeneración. Sin embargo, la modelación de la dinámica es muy simple y no involucra los lazos de control que son parte clave del funcionamiento del sistema. A continuación, se explicará el modelo que se utilizará para aplicar la estrategia de control predictivo híbrido a la central de ciclo combinado Nehuenco II.

5.3.1. Consideraciones Previas

Antes de comenzar el proceso de modelación y control es necesario mencionar las simplificaciones que son realizadas para poder aplicar el esquema de control a la planta real.

- **Turbina a Gas:** Se supone que las principales entradas que determinan el comportamiento de la unidad son los flujos de gas y aire. El sistema de actuadores que aplican dichas entradas se suponen perfectos, esto quiere decir que las acciones de control se llevan a cabo plenamente.
- **Caldera:** La modelación de este elemento y su sistema de control no es realizada. Esta decisión se basa en que la caldera no posee variables híbridas, por ello, no representa un elemento interesante en este estudio. Se asume que las car-

CAPÍTULO 5. OPTIMIZACIÓN DEL COMPLEJO TÉRMICO NEHUENCO

acterísticas del vapor, como su presión y temperatura, que produce la caldera son las adecuadas al nivel de potencia demandada.

- Turbina a Vapor: La turbina a vapor no se dividirá en etapas, sólo se considera que la potencia desarrollada es producto del flujo de vapor que atraviesa la válvula de admisión principal.
- Sistema de Control de la Turbina a Gas: El sistema de control sólo considera como variables controladas la temperatura de los gases de escape y la potencia eléctrica, no se realiza control de frecuencia.
- Sistema de Control de la Turbina a Vapor: El sistema de control sólo considera el flujo de vapor como variable manipulada y la potencia eléctrica como variable controlada.
- Regulación Primaria: En este trabajo no se considera la regulación primaria, pues este tipo de control se aplica sobre el generador eléctrico acoplado a la turbina, el cual no es explicitado en este trabajo. Se considera que el generador eléctrico es perfecto, luego, la potencia eléctrica es idéntica a la potencia mecánica generada por la turbina.

La mayoría de las simplificaciones realizadas están enfocadas a poner atención principalmente a la producción de potencia. Futuros trabajos considerarán una modelación más compleja.

5.3.2. Modelación de Turbina a Gas

Para realizar la modelación de la turbina a gas se utilizan datos reales² del funcionamiento de la misma. El modelo entrada-salida considera las siguientes variables:

²En el apéndice E se muestran los datos utilizados para la modelación

CAPÍTULO 5. OPTIMIZACIÓN DEL COMPLEJO TÉRMICO NEHUENCO

- Entradas:
 - Flujo de aire al compresor.
 - Flujo de combustible a la cámara de combustión.
- Salidas:
 - Potencia eléctrica.
 - Temperatura de gases de escape.

La temperatura de los gases de escape (TGE) entrega una medida de la temperatura a la cual se produce la combustión dentro de la cámara de combustión (TCC). Si TCC aumenta, dicha variación se ve reflejada directamente en TGE; luego es muy importante mantener TGE dentro de rangos de seguridad de manera de evitar daños en la turbina a gas. Además, el rango de seguridad está diseñado de manera de no dañar los elevadores. Por estas razones se ha decidido incluir TGE en la modelación de la turbina a gas.

Para la identificación del modelo que relaciona las entradas y las salidas se utilizan datos reales del funcionamiento de Nehuenco II durante 7 días. Dichos datos fueron muestreados cada 2 minutos de manera de capturar la dinámica del proceso y la estructura de modelo que se utilizó fue un ARX ("AutoRegresive model with exogenous Variables"). Los resultados de la identificación se presentan a continuación:

- Modelo ARX para la potencia eléctrica:

$$(1 - 0,9363q^{-1})P_{TG}(k) = 5,996u_1(k - 1) - 0,11u_2(k - 1) \quad (5.3.1)$$

- Modelo ARX para la temperatura de gases de escape:

$$(1 - q^{-1})T_{TG}(k) = 0,5845u_1(k - 1) - 0,01414u_2(k - 1) \quad (5.3.2)$$

donde $P_{TG}(k)$ y $T_{TG}(k)$ corresponden a la potencia y temperatura en el instante k , respectivamente. $u_1(k)$ y $u_2(k)$ corresponden a al flujo de combustible y al flujo de aire respectivamente. q^{-1} corresponde al operador retardo.

Modelo	Error RMS		Error RMS [%]	
	1 paso	10 pasos	1 paso	10 pasos
Potencia	2.2919 [MW]	8.1169 [MW]	0.75	3.45
Temperatura	0.7312 [°C]	4.788[°C]	0.12	0.8

Tabla 5.2: Errores de identificación de turbina a gas

Los errores de identificación del modelo de la turbina a gas se muestran en la tabla 5.2. Se puede observar que efectivamente existe una excelente identificación de la dinámica del proceso ya que los errores porcentuales³ son bastante bajos, tanto a 1 paso como a 10 pasos. Se concluye que los modelos tienen la precisión adecuada para ser usados en el desarrollo del controlador predictivo híbrido.

Además, se utilizaron "clocks" ξ_{on} y ξ_{off} para modelar el retardo de 30 minutos que tiene la turbina desde que el comando de encendido ha sido dado hasta que la turbina está produciendo la potencia que se le ha solicitado. La turbina a gas no posee modos de partida como es el caso de la turbina a vapor, por ello no fue necesario utilizar variables binarias adicionales para modelar los diferentes modos de partida. De esta manera, la dinámica de los clocks ξ_{on} y ξ_{off} es idéntica a la mostrada en el ejemplo benchmark de la central de cogeneración (sección 4.3.3) y el clock ξ_d se

³Estos porcentajes se obtuvieron de acuerdo al máximo valor de la variable en el conjunto de identificación

modifica para tomar la siguiente forma⁴:

$$\xi_d(k+1) = (\xi_d(k) - 1)u_l + 15(1 - u_l) \quad (5.3.3)$$

La turbina a gas no posee un tiempo mínimo durante el cual debe mantenerse encendida, sólo posee un tiempo mínimo durante el cual debe mantenerse apagada el que equivale a 6 horas. Dicha restricción se modelará tal como se hizo en el caso del problema benchmark. La última restricción que se considerará es la rampa de subida y bajada que tiene el valor de 10[MW] por minuto.

Con ello se tiene un modelo MLD bastante representativo del funcionamiento de la turbina a gas de Nehuenco II y que considera variables continuas y binarias. A continuación, se muestra la modelación del sistema de control de la turbina a gas.

5.3.3. Modelación del Sistema de Control de la Turbina a Gas

El estándar para el control de turbinas a gas General Electric corresponde al sistema SPEEDTRONIC MARK X⁵. Este sistema de control monitorea todas las variables de interés de la turbina y además ejecuta las acciones de control de manera de producir la potencia eléctrica demandada. En este trabajo sólo se considera el control del flujo de combustible que se basa en utilizar tres PID que determinan el flujo adecuado que debe ingresar a la cámara de combustión. El primero tiene relación con el control de la temperatura de los gases de escape de manera que no se dañe la caldera ni la cámara de combustión, el segundo controla la potencia eléctrica producida y el tercero controla la frecuencia. Cada uno de esos lazos envía una señal de flujo de combustible distinta y se escoge el mínimo entre ellas (Least Value Gate: LVG). A

⁴El 15 en la ecuación (5.3.3) corresponde a 15 instantes de muestreo lo que equivale a 30 minutos

⁵La "X" corresponde a la versión que puede variar desde la I a la VI

CAPÍTULO 5. OPTIMIZACIÓN DEL COMPLEJO TÉRMICO NEHUENCO

continuación, se escoge el máximo entre la señal anterior y el mínimo flujo de combustible que debe ingresar a la cámara de combustión de manera de mantener una llama estable (Maximum Value Gate: MVG). Otro controlador PID regula el flujo de aire de acuerdo a la temperatura de los gases de escape. El esquema se muestra en la figura 5.1.

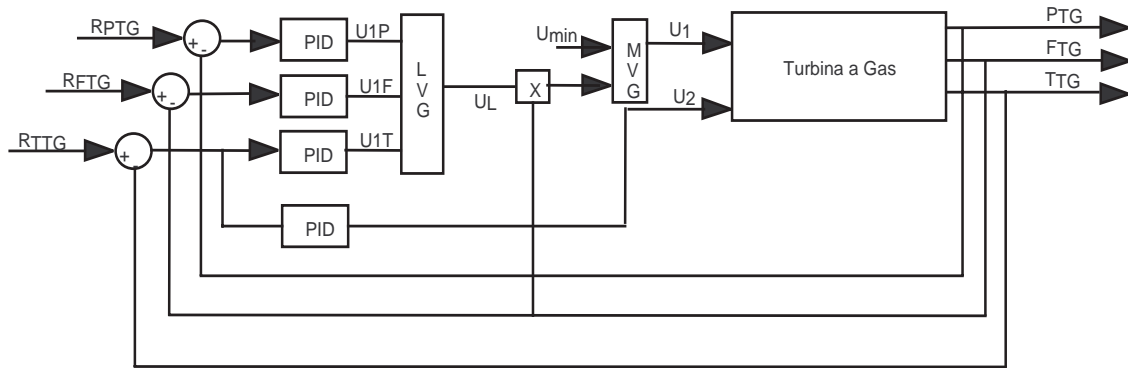


Figura 5.1: Esquema entrada-salida-control de turbina a gas

Lo interesante del esquema de control convencional del flujo de combustible es la incorporación de un conmutador lógico para determinar su valor. Esta regla lógica debe ser incluida en la modelación del sistema de control de la turbina a gas. Para ello se definen 3 variables binarias δ_{PF} , δ_{L1T} y δ_{LM} las que se relacionan con las siguiente sentencias:

$$u_{1P} \leq u_{1F} \iff \delta_{PF} = 1$$

$$u_{L1} = u_{1P}\delta_{PF} + (1 - \delta_{PF})u_{1F}$$

$$u_{L1} \leq u_{1T} \iff \delta_{L1T} = 1$$

$$u_L = u_{L1}\delta_{L1T} + (1 - \delta_{L1T})u_{1T}$$

$$u_L \geq u_{min} \iff \delta_{LM} = 1$$

$$u_1 = u_L\delta_{LM} + (1 - \delta_{LM})u_{min}$$

CAPÍTULO 5. OPTIMIZACIÓN DEL COMPLEJO TÉRMICO NEHUENCO

En general, la señal de control que envía el bloque PID asociado a la frecuencia es mayor al resto durante la operación normal. Debido a ello, se ha decidido no incluir dicha rama en el cálculo de la acción de control. Con ello se evita utilizar una variable binaria adicional acelerando el cálculo de las acciones de control. Los lazos de control PID considerados tienen la siguiente estructura:

- Control de flujo de combustible según potencia:

$$u_{1P}(k) = u_{1P}(k-1) + (K_1 + I_1) (R_{PTG}(k) - P_{TG}(k)) - K_1 (R_{PTG}(k-1) - P_{TG}(k-1)) \quad (5.3.4)$$

- Control de flujo de combustible según temperatura:

$$u_{1T}(k) = u_{1T}(k-1) + (K_2 + I_2) (R_{TTG}(k) - T_{TG}(k)) - K_2 (R_{TTG}(k-1) - T_{TG}(k-1)) \quad (5.3.5)$$

- Control de flujo de aire al compresor:

$$u_2(k) = u_2(k-1) + (K_3 + I_3) (R_{TTG}(k) - T_{TG}(k)) - K_3 (R_{TTG}(k-1) - T_{TG}(k-1)) \quad (5.3.6)$$

donde u_{1P} corresponde al flujo de combustible que aplica el control de potencia, u_{1T} corresponde al flujo de combustible que aplica el control de temperatura y u_2 corresponde al flujo de aire al compresor que aplica el control de temperatura. R_{PTG} corresponde a la referencia de potencia eléctrica y R_{TTG} corresponde a la referencia de temperatura de los gases de escape. Los parámetros de los controladores son los siguientes:

- Control de Potencia (Flujo de Combustible): $K1 = 0,1$ y $I1 = 0,01$.

- Control de Temperatura (Flujo de Combustible): $K2 = 0,1$ y $I2 = 0,01$.
- Control de Temperatura (Flujo de Aire al Compresor): $K3 = -0,3$ y $I3 = -0,01$.

Fue casi imposible lograr que el desempeño de estos lazos de control fuera exactamente el mismo que en la planta real, hecho que se explica por la existencia de muchos lazos de control adicionales que realizan ajustes finos a las acciones de control de manera de mejorar el funcionamiento en la planta real.

5.3.4. Modelación de Turbina a Vapor y su Sistema de Control

La turbina a vapor se compone de tres turbinas acopladas a un mismo eje que trabajan a diferentes presiones de vapor, generalmente se las llama turbina de baja, media y alta presión. La caldera produce el vapor de alta presión el cual pasa por un sistema de válvulas que ajustan su presión y luego ingresa a la turbina de alta presión. Una vez que el vapor realizó trabajo, pasa a un recalentador que se encuentra en la caldera y posteriormente pasa a la turbina de media presión. Una vez que el vapor se ha expandido pasa a la turbina de baja presión para luego ser condensado.

Sin embargo, en este trabajo se realiza una modelación simplificada⁶ que considera las siguientes variables:

- Entradas:
 - Flujo de Vapor.
- Salidas:
 - Potencia Eléctrica Total.

y su esquema se muestra en la figura 5.2.

⁶Los datos utilizados en la modelación se muestran en el apéndice E

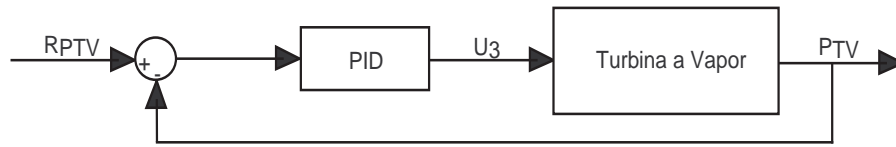


Figura 5.2: Esquema entrada-salida de turbina a vapor y sistema de control

El flujo de vapor es controlado por el sistema de válvulas de admisión, que dividen la cantidad de vapor producido por la caldera en dos partes: la primera ingresa a la turbina a vapor y la segunda es enviada nuevamente al domo.

Las características del vapor, como son su presión y temperatura, son determinadas en la caldera y se asume que su controlador es capaz de garantizar que dichas características sean las adecuadas.

Tal como se hizo en la modelación de la central de cogeneración, también se modelan los distintos tipos de partida que posee la turbina a vapor. Los documentos de Alstom⁷ que especifican las secuencias de partida detallan 3 modos de según el tiempo en que la unidad ha permanecido inoperativa: para "partida fría" dicho tiempo es mayor a 118 horas, para "partida tibia" dicho tiempo es mayor a 48 horas y menor que 118 horas, y para "partida caliente" si dicho tiempo es menor a 6 horas. La modelación de esta característica se realiza tal como se hizo en el ejemplo simplificado de la central de cogeneración, es decir, se utilizan 3 variables binarias que están directamente relacionadas con el tipo de partida de la unidad.

El modelo ARX que relaciona la producción de potencia con el flujo de vapor que ingresa a la turbina es el siguiente:

$$(1 - 0,8871q^{-1})P_{TV}(k) = 0,1586u_3(k - 1) \quad (5.3.7)$$

donde $P_{TV}(k)$ y $u_3(k)$ corresponden a la producción de potencia y flujo de vapor

⁷Este documento se encuentra en poder del personal de Nehuenco II

CAPÍTULO 5. OPTIMIZACIÓN DEL COMPLEJO TÉRMICO NEHUENCO

respectivamente. q_{-1} es el operador retardo.

Modelo	Error RMS		Error RMS [%]	
	1 paso	10 pasos	1 paso	10 pasos
Potencia	0.5229 [MW]	1.9225 [MW]	0.39	1.42

Tabla 5.3: Errores de identificación de turbina a vapor

El error de identificación del modelo de la turbina a vapor se muestra en la tabla 5.3. Se puede observar que los errores de predicción a 1 y 10 pasos son bastante pequeños pues corresponden a menos del 1 % de la potencia máxima, por lo tanto, se concluye que son apropiados para ser utilizados en el desarrollo del controlador predictivo híbrido.

El último elemento que se modela es la restricción de rampa en la potencia producida que debe respetar el controlador. El valor de dicha rampa en el caso de la turbina a vapor es de 10[MW] por minuto.

Por otro lado, como se muestra en la figura 5.2, control convencional de la turbina a vapor consiste en un simple lazo PID. La ecuación que lo describe es la siguiente:

$$u_3(k) = u_3(k-1) + (K_4 + I_4) (R_{PTV}(k) - P_{TV}(k)) - K_1 (R_{PTV}(k-1) - P_{TV}(k-1)) \quad (5.3.8)$$

donde los valores de K_4 e I_4 son 0.5 y 0.05, respectivamente.

Para poder mejorar el poder de predicción de los modelos dinámicos construidos es necesario conocer el comportamiento de las turbinas a las variaciones de la temperatura ambiente. Este estudio se realizó en la sección 4.3.3 y ahora se realizará la adaptación a este caso real.

5.4. Modelación del Efecto de la Temperatura Ambiente

Como se vio en la sección 4.3.3, la temperatura ambiente afecta principalmente la eficiencia de las turbinas. El principal problema asociado a poder identificar dicho efecto mediante datos reales es que las turbinas se encuentran operando en lazo cerrado, por lo tanto, el controlador trata de realizar las compensaciones necesarias para que la operación sea óptima. Las figuras que se presentan a continuación muestran el comportamiento real de ciertas variables claves en el funcionamiento de Nehuenco II y como su evolución se ve afectada por las variaciones de la temperatura ambiente.

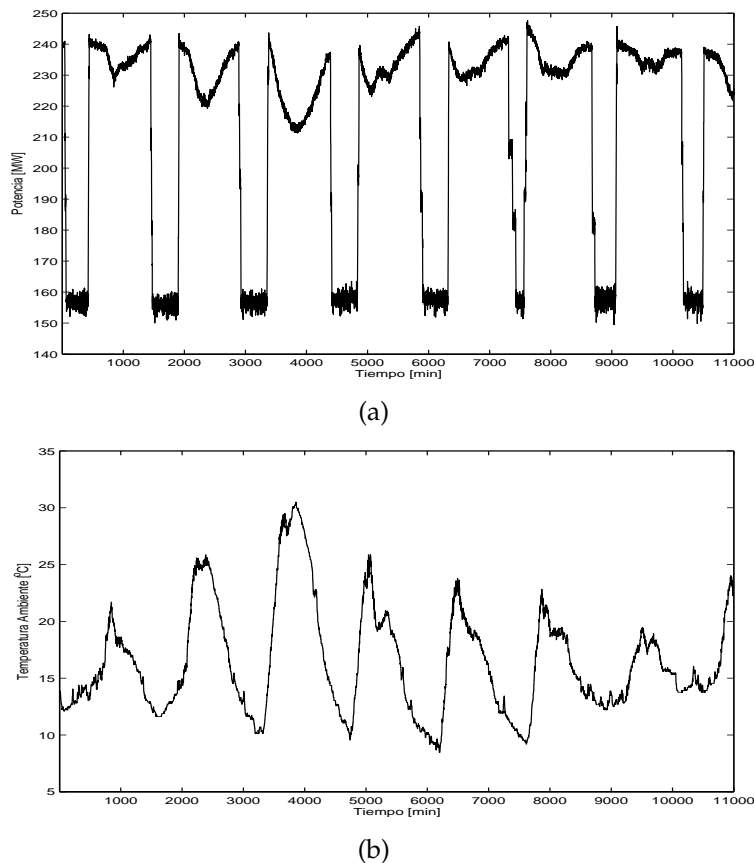


Figura 5.3: a) Potencia producida por la turbina a gas. b) Temperatura ambiente.

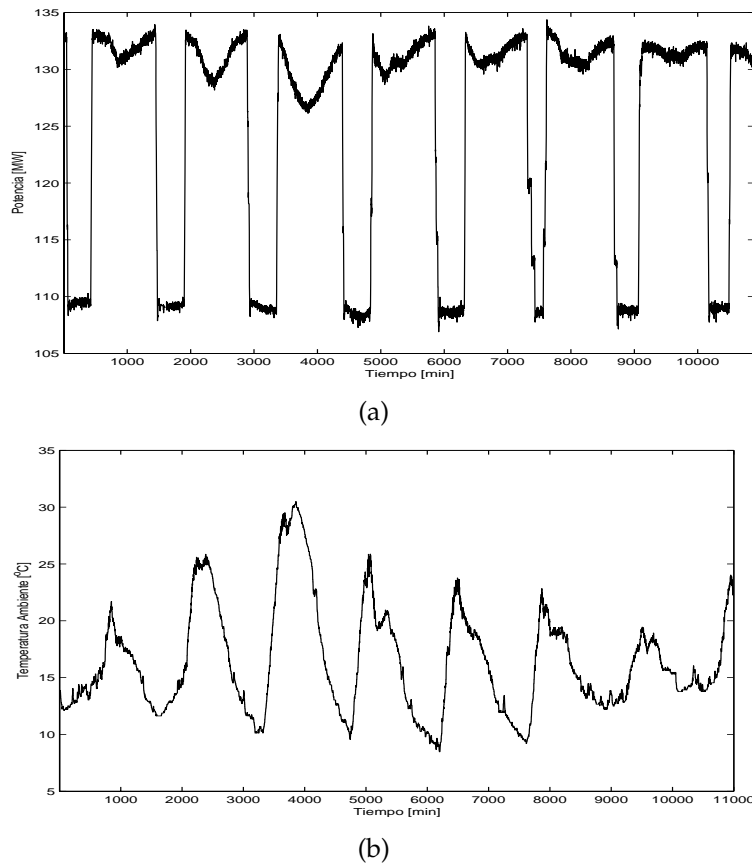


Figura 5.4: a) Potencia producida por la turbina a vapor. b) Temperatura ambiente.

Las figuras 5.3, 5.4 y 5.5 muestra el comportamiento de las potencias y consumos de combustible frente a variaciones en la temperatura ambiente. Si se observa la figura 5.3 se ve claramente que las variaciones de temperatura sólo afectan la operación cuando la potencia producida por la turbina a gas es alta (del orden de los 235 [MW]). Sin embargo, la potencia no se ve afectada cuando la producción de potencia es baja (del orden de los 110 [MW]). Si sólo se analizan los rangos de potencias altas se podría decir entonces que efectivamente la producción de potencia baja en relación a un alza en la temperatura ambiente. Sin embargo, ese hecho no tiene relación con una baja de rendimiento pues el consumo de combustible, mostrado en la figura 5.5, también baja en dichas condiciones. La figura 5.4 muestra que la producción de po-

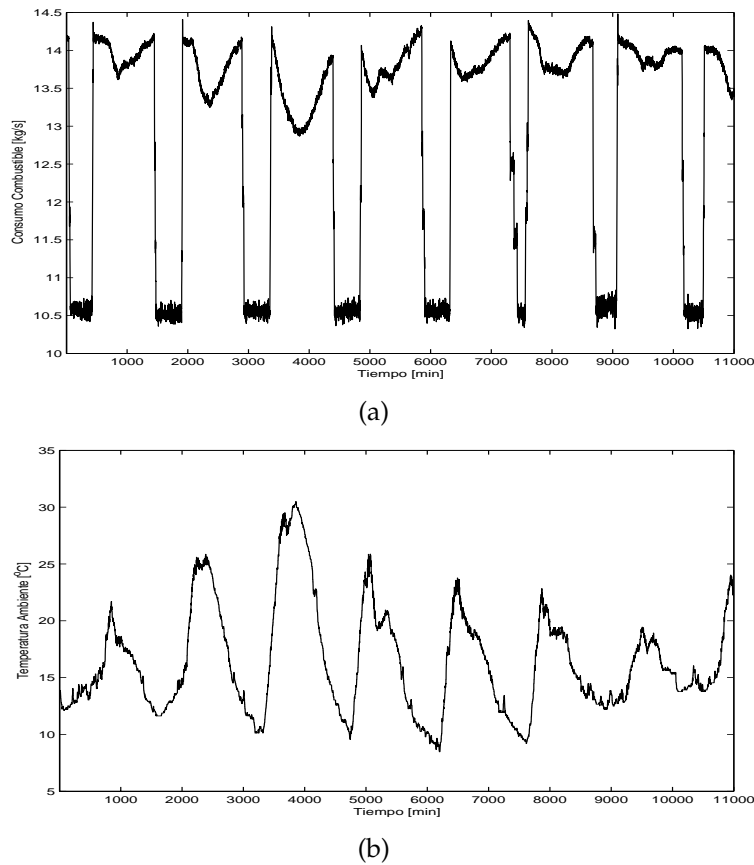


Figura 5.5: a) Consumo de combustible. b) Temperatura ambiente.

tencia de la turbina a vapor se ve afectada de manera idéntica a como se ve afectada la turbina a gas.

La figura 5.6 muestra el comportamiento de la temperatura de los gases de escape de la turbina a gas. Esta figura explica el comportamiento de la producción de potencia de la turbina a gas y el consumo de combustible asociado. Lo que finalmente sucede es que a bajas potencias es más sencillo mantener la temperatura de los gases de escape dentro del rango requerido, por ello las fluctuaciones de la temperatura ambiente no afectan demasiado, en cambio, a altas potencias es más complicado mantener la temperatura de los gases de escape dentro del rango requerido y dicho problema se acentúa aún más cuando la temperatura ambiente sube. Es por ello que

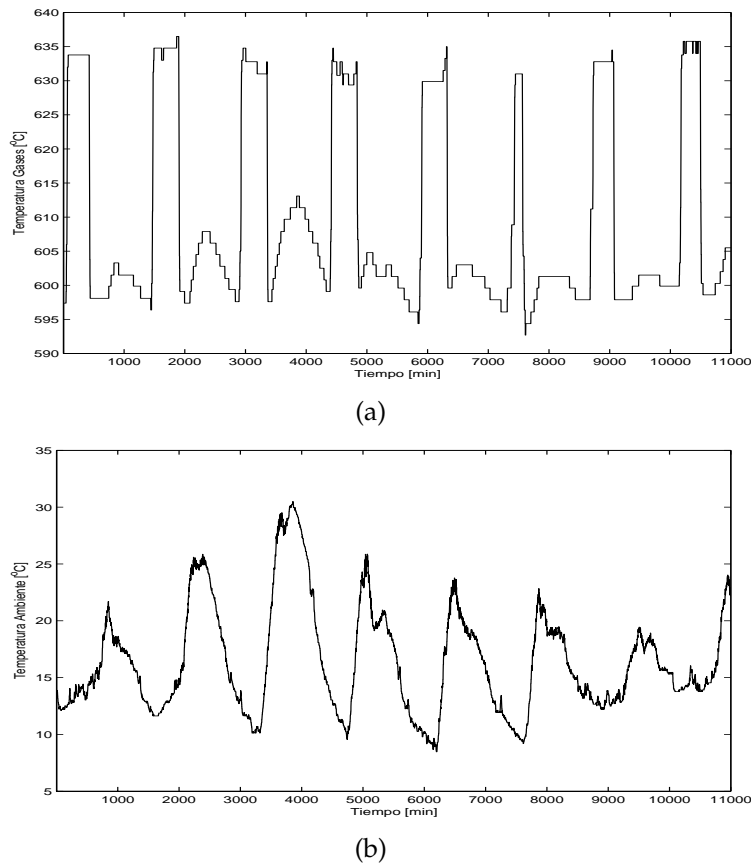


Figura 5.6: a) Temperatura de gases de escape. b) Temperatura ambiente.

cuando la temperatura ambiente es alta y la producción de potencia lo es también, el control del flujo de combustible es gobernado por el control de la temperatura de los gases de escape y dicha selección implica que los niveles de potencia a producir ya no son respetados. Esto implica que obtener los distintos rendimientos que exhibe las unidades en función de la temperatura ambiente a partir de los datos puede ser una tarea muy compleja. Por ello, la modelación del efecto de la temperatura se realizará de la misma forma que se hizo con la central de cogeneración, es decir, basándose en los gráficos mostrados anteriormente en las figuras 4.9 y 4.8.

Se decidió no utilizar el enfoque on-line para la actualización del modelo que se utiliza durante la optimización pues sería poco realista suponer que se conoce

CAPÍTULO 5. OPTIMIZACIÓN DEL COMPLEJO TÉRMICO NEHUENCO

el comportamiento de la temperatura ambiente durante la predicción. Como no se posee un modelo de predicción suficientemente exacto para la temperatura ambiente es mejor utilizar el enfoque off-line en donde los modelos de predicción de las potencias y temperatura de los gases de escape se actualizan al inicio de la optimización y de acuerdo al valor actual de la temperatura ambiente, pero no durante ella.

Para poder aplicar el enfoque off-line, es necesario escoger ciertos ponderadores que modificarán la estructura de los modelos tal como fue explicado en la sección 4.3.3. En el caso de la turbina a vapor, la curva de rendimiento fue dividida en 2 tramos y el ponderador asociado a cada tramo se elige como el rendimiento evaluado en la temperatura media de cada tramo. Para la turbina a gas, la curva de rendimiento se dividió en 3 tramos y el ponderador asociado corresponde al rendimiento evaluado en la temperatura media de cada tramo.

Aplicando dicho procedimiento se escogieron los siguientes ponderadores:

- Turbina a vapor:
 - Modelo de potencia para altas temperaturas: 1.06.
 - Modelo de potencia para bajas temperaturas: 0.97.
- Turbina a gas:
 - Modelo de potencia para altas temperaturas: 0.945.
 - Modelo de potencia para medias temperaturas: 0.99.
 - Modelo de potencia para bajas temperaturas: 1.02.
 - Modelo de temperatura para altas temperaturas: 1.02.
 - Modelo de temperatura para medias temperaturas: 0.99.
 - Modelo de temperatura para bajas temperaturas: 0.945.

CAPÍTULO 5. OPTIMIZACIÓN DEL COMPLEJO TÉRMICO NEHUENCO

De esta forma, los modelos finales son los siguientes:

■ Turbina a vapor:

- Modelo de potencia para altas temperaturas:

$$(1 - 0,8871q^{-1})P_{TV}(k) = 1,06 \times 0,1586u_3(k - 1) \quad (5.4.1)$$

- Modelo de potencia para bajas temperaturas:

$$(1 - 0,8871q^{-1})P_{TV}(k) = 0,97 \times 0,1586u_3(k - 1) \quad (5.4.2)$$

■ Turbina a gas:

- Modelo de potencia para altas temperaturas:

$$(1 - 0,9363q^{-1})P_{TG}(k) = 0,945 \times [5,996u_1(k - 1) - 0,11u_2(k - 1)] \quad (5.4.3)$$

- Modelo de potencia para medias temperaturas:

$$(1 - 0,9363q^{-1})P_{TG}(k) = 0,99 \times [5,996u_1(k - 1) - 0,11u_2(k - 1)] \quad (5.4.4)$$

- Modelo de potencia para bajas temperaturas:

$$(1 - 0,9363q^{-1})P_{TG}(k) = 1,02 \times [5,996u_1(k - 1) - 0,11u_2(k - 1)] \quad (5.4.5)$$

- Modelo de temperatura para altas temperaturas:

$$(1 - q^{-1})T_{TG}(k) = 1,02 \times 0,5845[[u_1(k - 1) - 0,01414u_2(k - 1)] \quad (5.4.6)$$

CAPÍTULO 5. OPTIMIZACIÓN DEL COMPLEJO TÉRMICO NEHUENCO

- Modelo de temperatura para medias temperaturas:

$$(1 - q^{-1})T_{TG}(k) = 0,99 \times [0,5845u_1(k - 1) - 0,01414u_2(k - 1)] \quad (5.4.7)$$

- Modelo de temperatura para bajas temperaturas:

$$(1 - q^{-1})T_{TG}(k) = 0,945 \times [0,5845u_1(k - 1) - 0,01414u_2(k - 1)] \quad (5.4.8)$$

Con este desarrollo se emula el comportamiento real que exhiben las turbinas al variar la temperatura ambiente.

5.5. Estrategia de Control Supervisor Predictivo Híbrido

Para aplicar la estrategia de control predictivo híbrido sobre una planta que ya posee un sistema de control convencional, sin que ello signifique eliminar por completo dicho sistema de control, se propone utilizar un esquema supervisor. La idea central del esquema supervisor es considerar una nueva planta que consiste en la planta original junto a su sistema de control regulatorio. Este concepto se presenta en la figura 5.7.

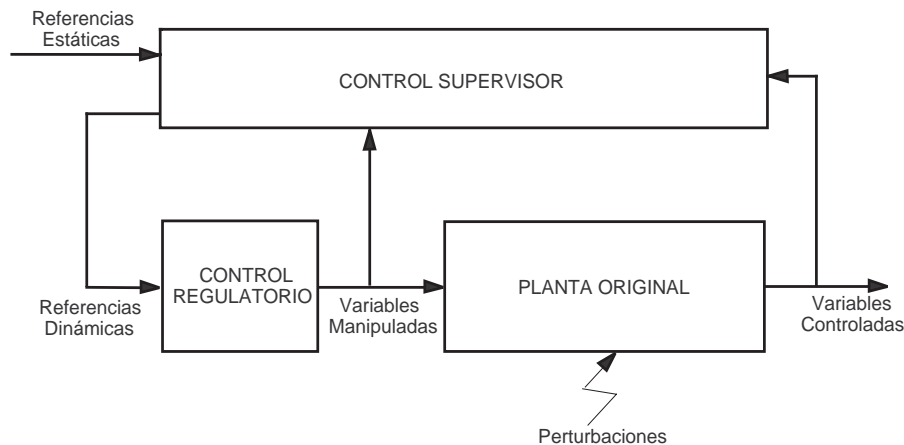


Figura 5.7: Concepto de Esquema de Control Supervisor

El control supervisor ([18],[19]) recibe referencias estáticas para las variables de interés y determina las referencias dinámicas que se debe aplicar al sistema de control convencional de manera de optimizar el funcionamiento global. Este tipo de controlador corresponde a un MPC al cual se le agregan las restricciones que determinan la dinámica de los controladores, de esta forma el problema de optimización encuentra de manera simultánea los valores óptimos de las variables manipuladas y las referencias asociadas que las generan.

CAPÍTULO 5. OPTIMIZACIÓN DEL COMPLEJO TÉRMICO NEHUENCO

En el caso de Nehuenco II, la modelación realizada considera un sistema de control convencional de tipo PID , tanto para la turbina a gas como para la turbina a vapor. Luego, el control supervisor debe determinar las referencias del control de potencia y temperatura de la turbina a gas y la referencia de flujo de vapor de la turbina a vapor. Además, se determinan los instantes de partida de manera de respetar el despacho económico.

Es interesante notar que la estrategia adoptada es capaz de tratar directamente con las variables continuas y lógicas que están relacionadas a la operación de la central de ciclo combinado en un esquema unificado, es decir, es posible integrar la operación de partida (señal de partida) y el funcionamiento normal de seguimiento de potencia dentro en un mismo controlador. Esta estrategia es bastante distinta a la actualmente utilizada en centrales de ciclo combinado que corresponde a un esquema secuencial, es decir, se consideran secuencias de partida, detención y operación normal de forma separada y, por lo tanto, corresponde a una solución subóptima.

La función objetivo elegida es muy similar a la utilizada en el ejemplo de la central de cogeneración. Sin embargo, en este caso se debe incluir un término que represente el seguimiento de la referencia de temperatura para los gases de escape, por ello el funcional elegido tiene los siguientes términos:

$$J = C_{dem} + C_{change} + C_{fuel} + C_{start_up} + C_{fixed} - E + C_{start_up_gas} + C_{fixed_gas} \quad (5.5.1)$$

A continuación, se explica el significado de cada término:

- C_{dem} Este término penaliza el incumplimiento de la demanda eléctrica $d_{el}(k+i)$ y la demanda de temperatura $d_{temp}(k+i)$ durante el horizonte de predicción

M .

$$C_{dem} = \sum_{i=1}^M p_{dem.el}(k+i)|P_{tw}(k+i) + P_{tg}(k+i) - d_{el}(k+i)| + \sum_{i=1}^M p_{dem.temp}(k+i)|T_{tg}(k+i) - d_{temp}(k+i)| \quad (5.5.2)$$

donde $p_{dem.el}$ y $p_{dem.temp}$ corresponden a ponderadores positivos.

- C_{change} Corresponde a una penalización por cambiar la acción de control durante el horizonte de predicción M . De esta manera se obliga a que el controlador genere acciones de control suaves:

$$C_{change} = \sum_{i=1}^M p_{\Delta u_1}(k+i)|u_1(k+i-1) - u_1(k+i-2)| + \sum_{i=1}^M p_{\Delta u_2}(k+i)|u_2(k+i-1) - u_2(k+i-2)| + \sum_{i=1}^M p_{\Delta u_3}(k+i)|u_3(k+i-1) - u_3(k+i-2)| \quad (5.5.3)$$

donde $p_{\Delta u_1}$, $p_{\Delta u_2}$ y $p_{\Delta u_3}$ corresponden a ponderadores positivos.

- C_{start_up} corresponde al costo de encender la turbina a vapor:

$$C_{start_up} = \sum_{i=1}^M p_{start_up}(k+i) \max\{u_{l2}(k+i-1) - u_{l2}(k+i-2), 0\} \quad (5.5.4)$$

donde p_{start_up} corresponde a un ponderador positivo.

- C_{fixed} representa el costo asociado a mantener encendida la turbina a vapor:

$$C_{fixed} = \sum_{i=1}^M p_{fixed}(k+i)u_{l2}(k+i-1) \quad (5.5.5)$$

donde p_{fixed} corresponde a un ponderador positivo.

- E representa las ganancias por vender electricidad:

$$E = \sum_{i=1}^M p_{el}(k+i) \min[P_{tv}(k+i) + P_{tg}(k+i), d_{el}(k+i)] \quad (5.5.6)$$

donde p_{el} corresponde a un ponderador positivo.

- $C_{start_up_gas}$ es el costo de partida de la turbina a gas:

$$C_{start_up_gas} = \sum_{i=1}^M p_{start_up_gas}(k+i) \max\{u_{l1}(k+i-1) - u_{l1}(k+i-2), 0\} \quad (5.5.7)$$

donde $p_{start_up_gas}$ corresponde a un ponderador positivo.

- C_{fixed_gas} representa el costo de mantener operativa la turbina a gas. Es análogo a C_{fixed} :

$$C_{fixed} = \sum_{i=1}^M p_{fixed_gas}(k+i)u_{l1}(k+i-1) \quad (5.5.8)$$

donde p_{fixed_gas} corresponde a un ponderador positivo.

- C_{fuel} representa el costo asociado al consumo de combustible, su expresión matemática es la siguiente:

$$C_{fixed} = \sum_{k=1}^M p_{fuel}(k+i)u_1(k+i-1) \quad (5.5.9)$$

CAPÍTULO 5. OPTIMIZACIÓN DEL COMPLEJO TÉRMICO NEHUENCO

donde p_{fuel} representa el incremento en el costo de combustible por el uso de las turbinas.

Los experimentos que se a continuación se realizan consideran los siguientes ponderadores:

$$\begin{aligned}
 p_{dem_el} &= 7,5 & p_{\Delta u_3} &= 1 & p_{fixed} &= 1 \\
 p_{dem_temp} &= 50 & p_{start_up} &= 50 & p_{fixed_gas} &= 1 \\
 p_{\Delta u_1} &= 0,01 & p_{start_up_gas} &= 50 & p_{el} &= 0,2 \\
 p_{\Delta u_2} &= 0,01 & p_{fuel} &= 0,02 & &
 \end{aligned}$$

El diagrama de bloques que describe el sistema de control predictivo híbrido es mostrado en la figura 5.8.

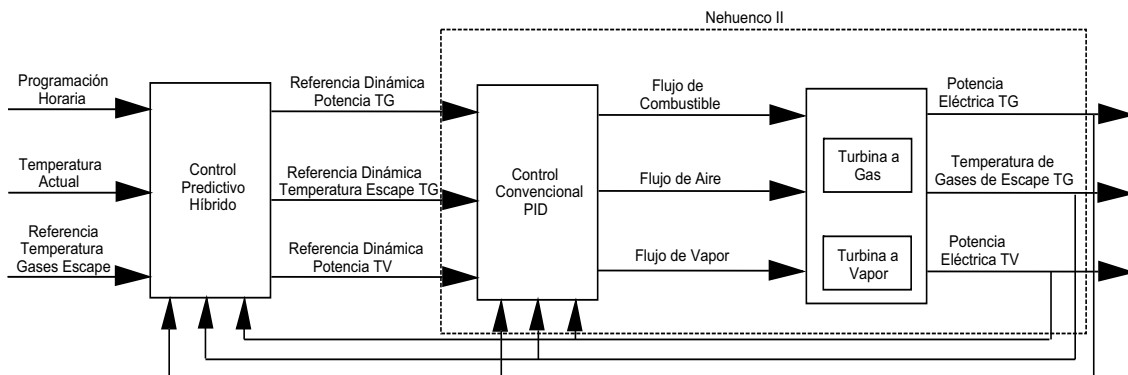


Figura 5.8: Control supervisor para Nehuenco II

5.6. Pruebas por Simulación

Esta sección está dedicada a estudiar los resultados obtenidos con el controlador supervisor predictivo híbrido y comparar sus ventajas con respecto al sistema de control basado en PID. Las primeras dos subsecciones están dedicadas a estudiar el comportamiento del control predictivo híbrido aplicado a la turbina a gas y vapor por separado y en ausencia del efecto de la temperatura ambiente considerando un horizonte de predicción igual a siete (14 minutos). Finalmente en la tercera subsección se acoplan los controladores para poder chequear su efectividad y además se incorpora el efecto de la temperatura ambiente en la modelación, en este caso se utiliza un horizonte de predicción igual a 20 para poder incluir el proceso de partida caliente.

5.6.1. Control de la Turbina a Gas

La primera prueba que se realizó consistió en chequear el comportamiento del controlador PID, para ello se obtuvieron datos reales de referencias aplicadas al sistema de control de la turbina a gas, de esta forma será posible observar las falencias del sistema de control convencional

La figura 5.9 muestra una prueba de seguimiento de referencia de potencia. La referencia de potencia utilizada consiste en un tren de pulsos que varían entre 160 [MW] y 235 [MW] y la referencia de temperatura también es un tren de pulsos que varían entre 635 [°C] y 600 [°C]. Se observa que el control PID es capaz de estabilizar tanto la potencia eléctrica como la temperatura de los gases de escape, sin embargo existe un error permanente en el seguimiento de la referencia de potencia.

CAPÍTULO 5. OPTIMIZACIÓN DEL COMPLEJO TÉRMICO NEHUENCO

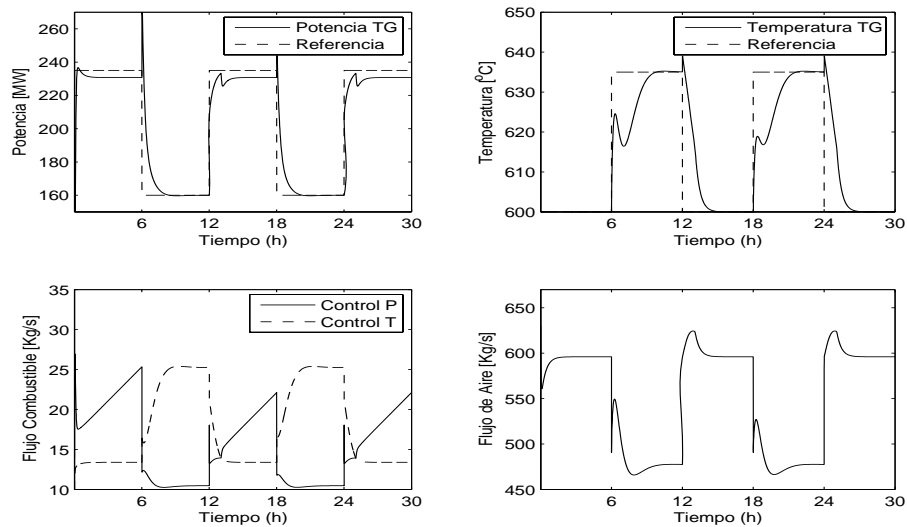


Figura 5.9: Estrategia de control PID de turbina a gas

Las acciones de control generadas por el control de potencia⁸ y temperatura⁹ son bastante distintas: mientras que el control de potencia genera acciones de control muy altas, el control de temperatura realiza todo lo contrario. Este esquema es bastante inteligente pues impide que la potencia aumente demasiado cuando la referencia de temperatura es alta e impide que la temperatura de los gases de escape aumente demasiado cuando la referencia de potencia aumenta.

El flujo de aire que ingresa al compresor es adecuado: permite que la relación aire-combustible se mantenga relativamente constante, asegurando una combustión adecuada, y además permite mantener la temperatura de los gases de escape dentro del rango solicitado.

El principal problema que exhibe el esquema de control son las sobreoscilaciones y error permanente asociado a las variables controladas. Se espera que el control supervisor predictivo híbrido sea capaz de eliminar dichos problemas.

⁸En la figura 5.9 aparece en la leyenda como "Control P"

⁹En la figura 5.9 aparece en la leyenda como "Control T"

CAPÍTULO 5. OPTIMIZACIÓN DEL COMPLEJO TÉRMICO NEHUENCO

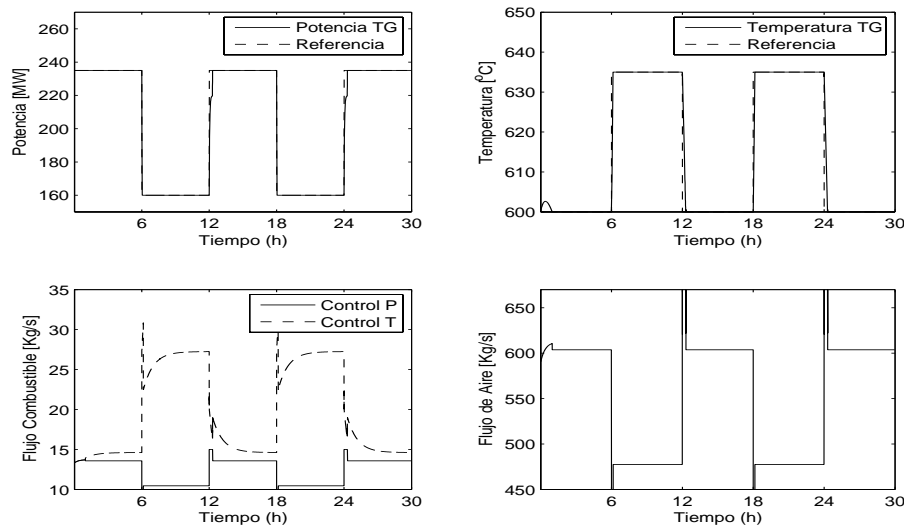


Figura 5.10: Estrategia de control predictivo híbrido de turbina a gas

La figura 5.10 muestra la misma prueba de seguimiento efectuada anteriormente con el control convencional. Se observa que el seguimiento de la referencia de potencia y temperatura mejora de manera sustancial: Ya no existe error permanente ni sobreoscilaciones.

Las acciones de control asociadas alcanzan los valores límite durante los cambios de referencia, sin embargo se sigue respetando la razón aire-combustible de manera de asegurar el correcto funcionamiento de la turbina. No se observa ninguna conmutación en la acción de control que regula el flujo de combustible, sólo predominó la acción del control de potencia. Sin embargo, se nota que en caso de existir un aumento en la temperatura de los gases de escape, el control de temperatura predominaría, con ello se garantiza un funcionamiento seguro. De este análisis se desprende que el controlador predictivo híbrido minimiza la conmutación de controladores PID de manera de minimizar la energía de control asociada.

Una característica interesante de mencionar es la rapidez en el seguimiento de los cambios de referencia, donde la limitante más importante es la rampa de subida

CAPÍTULO 5. OPTIMIZACIÓN DEL COMPLEJO TÉRMICO NEHUENCO

y bajada. El controlador es capaz de respetar dicha rampa y con ello asegurar un funcionamiento seguro de la turbina.

Estas pruebas establecen claramente la superioridad del controlador supervisor predictivo híbrido, en lo que se refiere al seguimiento de referencia de la turbina a gas. Las principales mejoras se observan en la disminución de los tiempos de asentamiento, disminución de sobreoscilaciones en las variables controladas y eliminación del error permanente que exhibía el controlador PID.

Tipo de Controlador	Consumo de Combustible Promedio [Kg/s]
PID	12.8025
CSPH	12.4023

Tabla 5.4: Comparación entre controladores

La tabla 5.4 muestra que el consumo de combustible promedio es menor al usar la estrategia de control predictivo híbrido (CSPH) de lo cual se deduce que el controlador es capaz de mejorar la operación de la planta sin que ello implique un alza en el consumo de combustible.

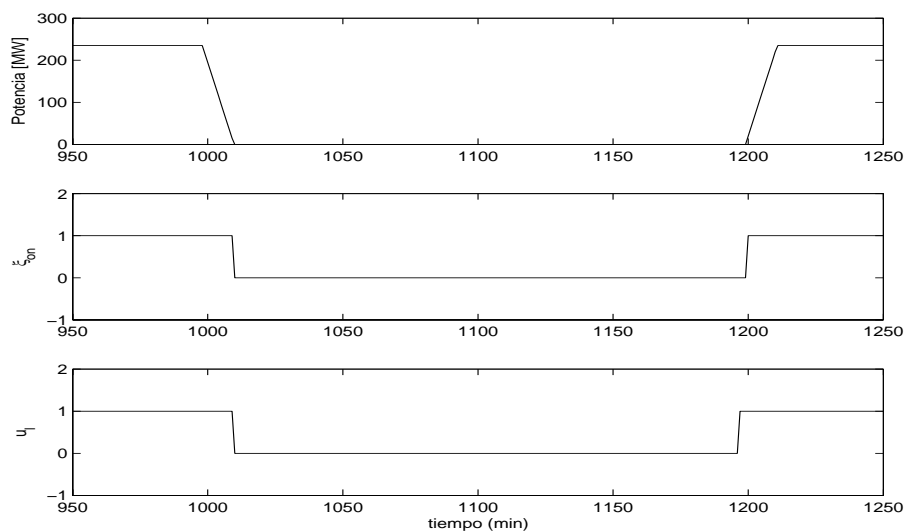


Figura 5.11: Control predictivo híbrido de turbina a gas

CAPÍTULO 5. OPTIMIZACIÓN DEL COMPLEJO TÉRMICO NEHUENCO

La otra característica que se debe testear corresponde a las señales de encendido y apagado. La figura 5.11 muestra la relación que existe entre la potencia generada y las variables binarias δ_{on} y u_l . Se puede observar que cuando la potencia generada es de 235 [MW], las variables binarias se mantienen en 1 (tramo izquierdo), luego el despacho obliga a la central a no participar en la producción de potencia lo que se traduce en una bajada en la potencia eléctrica (respetando la rampa de bajada) hasta cero, ello implica que las variables binarias se anulan (tramo central). Finalmente la central vuelve a ser despachada a 235 [MW], lo que obliga a que primero se active la variable u_l y luego del retardo asociado, la variables δ_{on} se activa lo que coincide con el aumento en al potencia generada (respetando la rampa de subida).

5.6.2. Control de la Turbina a Vapor

Tal como se hizo con la turbina a gas, se chequeará el funcionamiento del controlador PID asociado a la turbina a vapor.

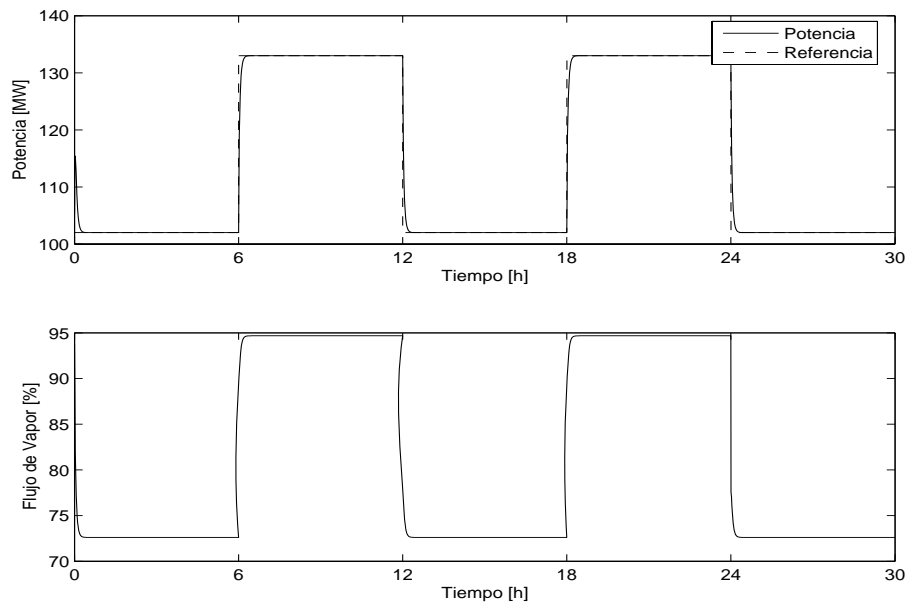


Figura 5.12: Control PID de la turbina a vapor

CAPÍTULO 5. OPTIMIZACIÓN DEL COMPLEJO TÉRMICO NEHUENCO

La figura 5.12 muestra el desempeño del control convencional de la turbina a vapor. La referencia elegida corresponde a un tren de pulsos que varía entre 102 [MW] y 135 [MW] con una frecuencia de 6 horas. Se observa que el controlador es capaz de llevar la producción de potencia al nivel deseado de forma casi perfecta, ya que a pesar de que no existen sobreoscilaciones de todas formas se observa un pequeño retraso en el seguimiento de la referencia. Con respecto a la acción de control, esta sigue un perfil bastante similar al exhibido por la potencia, lo cual tiene bastante sentido pues al examinar los datos reales se observa el mismo comportamiento.

Es claro que las características híbridas no pueden ser examinadas en las simulaciones del control convencional pues requerirían la inclusión de una gran cantidad de elementos switching-lógicos. En el caso de la turbina a gas sólo se incluyó la conmutación de la acción de control en el controlador convencional pues era necesario para poder obtener un funcionamiento similar al exhibido por la planta real. Como en el caso de la turbina a vapor no existe conmutación de controladores, la dinámica envuelta es bastante sencilla y un controlador simple como un PID es capaz de llevar a cabo la tarea relativa al control de la potencia eléctrica producida sin mayores problemas. Se espera que el control predictivo híbrido sea capaz de mejorar la respuesta transiente del lazo de control PID mediante selecciones adecuadas de las señales de referencia.

La figura 5.13 muestra la respuesta de la turbina al utilizar control predictivo híbrido. Es posible observar que el tiempo de asentamiento ha disminuido pues la señal de referencia prácticamente coincide con la respuesta de la turbina a vapor. Las pequeñas diferencias existentes se deben a que el controlador predictivo híbrido respeta la restricción de rampa en la producción de potencia de manera de asegurar una operación segura de la unidad. La disminución del tiempo de asentamiento se

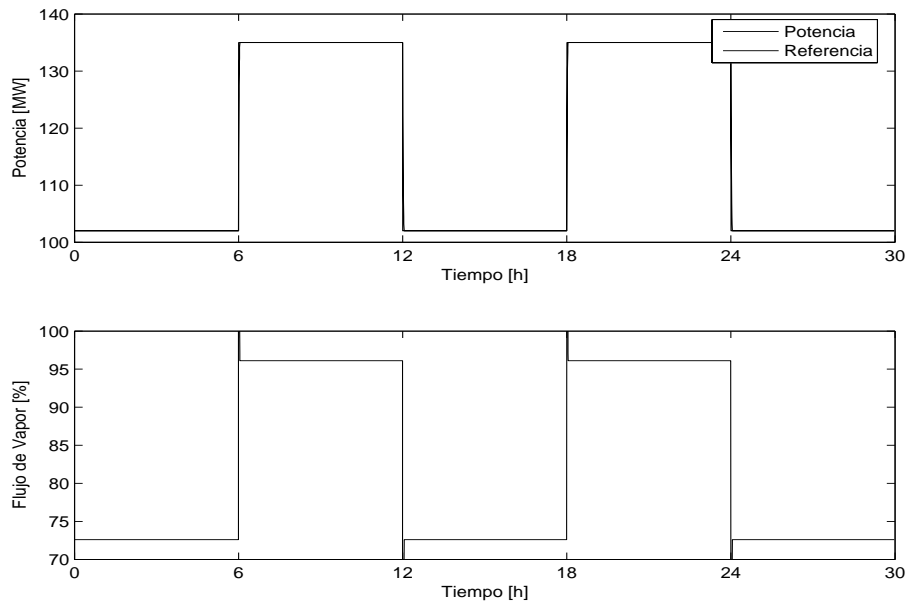


Figura 5.13: Control predictivo híbrido de la turbina a vapor

explica principalmente por que la acción de control muestra leves peaks durante los cambios de referencia lo que ayuda finalmente a una respuesta más rápida por parte de la turbina a vapor.

A pesar de que la ganancia debido a la inclusión del control predictivo híbrido es pequeña se debe hacer incapie en que la prueba recién vista sólo evalúa el comportamiento en operación normal.

Ahora que se ha finalizado el testeo de los controladores y se ha comprobado su correcto funcionamiento, se procederá a interconectar ambos controladores para simular el comportamiento del sistema completo incluyendo la modelación del efecto de la temperatura.

5.6.3. Control de Nehuenco II

Esta subsección condensa los resultados de la aplicación del control predictivo híbrido al modelo de Nehuenco II. Como se dijo anteriormente, la principal tarea que debe cumplir este controlador es respetar la programación horaria dictada por el despacho económico y es por ello que la principal prueba que se realiza consiste en un seguimiento de referencia que incluye: Partida, operación normal y detención.

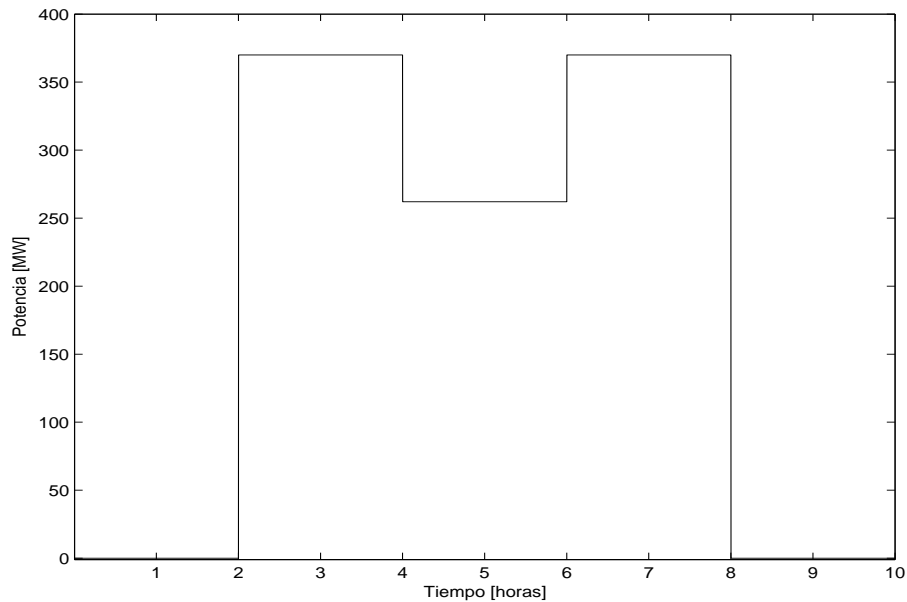


Figura 5.14: Demanda eléctrica

La figura 5.14 muestra el perfil de demanda eléctrica dado por el despacho económico, se puede observar que en la primera hora la central debe permanecer inactiva, luego se le solicita producir potencia y finalmente debe ser desactivada. Esta información es entregada al controlador para generar las acciones de control óptimas de manera de satisfacer la demanda eléctrica.

Debe remarcarse que este perfil es ficticio ya que generalmente Nehuenco II produce 360 [MW] por un intervalo de 18 horas y a continuación produce 260 [MW] por un intervalo de 6 horas. Se construyó una versión escalada de dicho perfil de manera

CAPÍTULO 5. OPTIMIZACIÓN DEL COMPLEJO TÉRMICO NEHUENCO

de comprobar que el funcionamiento en estas condiciones fuera apropiado, con ello se asegura un funcionamiento correcto en la realidad.

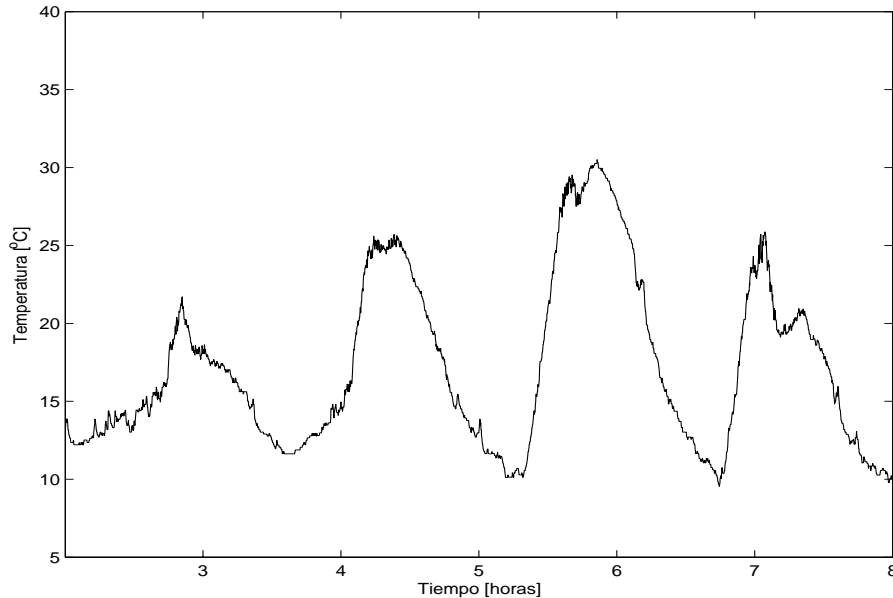


Figura 5.15: Temperatura ambiente

El perfil de temperatura mostrado en la figura 5.15 también corresponde a una versión escalada de las fluctuaciones de temperatura existentes en la zona de Quilota durante el mes de Noviembre. La temperatura fluctúa entre los 5[°C] y los 30[°C], esto resulta interesante pues en dichas condiciones la turbina a gas muestra el peor funcionamiento, luego si el controlador es capaz de funcionar correctamente en estas condiciones entonces lo hará también en condiciones favorables.

El único problema relacionado con la aplicación real del nuevo sistema de control tiene relación con usar horizontes de predicción demasiado altos para poder predecir los instantes de partida de las unidades. Por ejemplo, el retardo asociado a una partida fría de la turbina a vapor es de 3 horas lo que implica utilizar un horizonte de predicción mínimo de $3 * 60/2 = 90$. Es por ello que en la simulación presentada se asumirá que la turbina a vapor está en condición de partida caliente y el retardo

CAPÍTULO 5. OPTIMIZACIÓN DEL COMPLEJO TÉRMICO NEHUENCO

asociado es de 40 minutos, la turbina a gas no presenta problemas pues su retardo 30 minutos y ello implica que es posible incluir la predicción de ambos retardos usando un horizonte de predicción de 20 instantes de tiempo.

Las figuras 5.16 y 5.17 muestran las variables controladas y manipuladas durante el periodo en que la demanda de potencia es distinta de cero, de manera de obtener una mejor visualización del efecto asociado a las fluctuaciones de la temperatura ambiente. Se puede observar que el controlador es capaz de satisfacer la demanda eléctrica de manera casi perfecta, manteniendo a la vez la temperatura de los gases de escape en los niveles requeridos. Es interesante notar que, al igual que en el ejemplo de la central de cogeneración, el efecto de las fluctuaciones de la temperatura ambiente es completamente anulado por las acciones del controlador, tanto en la producción de potencia como en la temperatura de los gases de escape. Esto quiere decir que el controlador ajusta las entradas del proceso de forma de mantener las variables de interés en los valores configurados ya que de esta forma se maximizan las ganancias asociadas a la operación de la central de ciclo combinado.

Se observa que el controlador toma especial importancia en seguir los cambios de referencia de la forma más rápida posible, lo que se traduce en ciertos "peaks" en las acciones de control durante las transiciones. Sin embargo, es importante recalcar que todas las acciones de control que se muestran en la simulación respetan las cotas máximas impuestas de manera de asegurar que no se disminuya la vida útil de las turbinas.

Con respecto a la conmutación de los controladores PID que determinan el flujo de combustible, se observa que el control predictivo híbrido transforma el problema de switching en uno de cotas, pues el PID asociado al control de potencia se activa constantemente y cuando el control de temperatura debiese activarse lo que

CAPÍTULO 5. OPTIMIZACIÓN DEL COMPLEJO TÉRMICO NEHUENCO

finalmente sucede es que se utiliza su valor como cota máxima para el otro controlador. Dicho efecto se ve claramente en la figura 5.16 a partir la sexta hora y con ello se reafirma la conclusión que se había obtenido en la simulación del control de la turbina a gas, es decir, el control predictivo híbrido minimiza el "switching" entre controladores de manera de minimizar la energía de control.

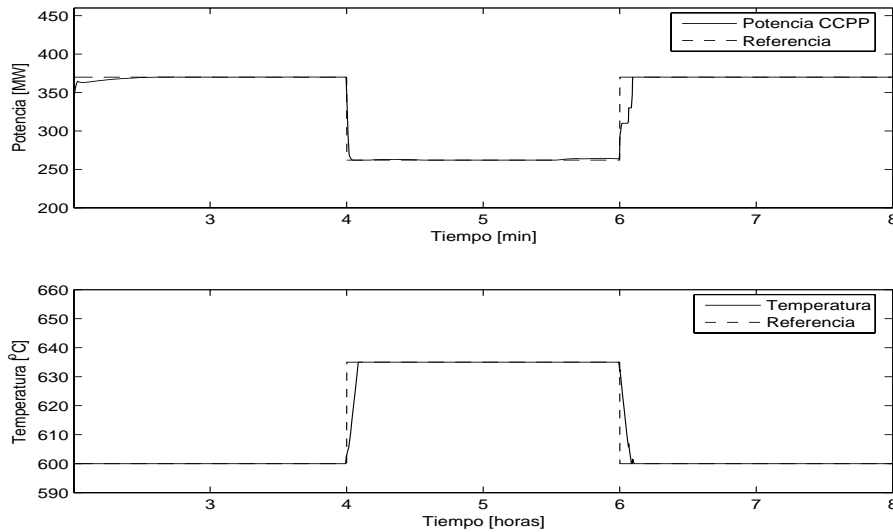


Figura 5.16: Control supervisor predictivo híbrido: Variables controladas

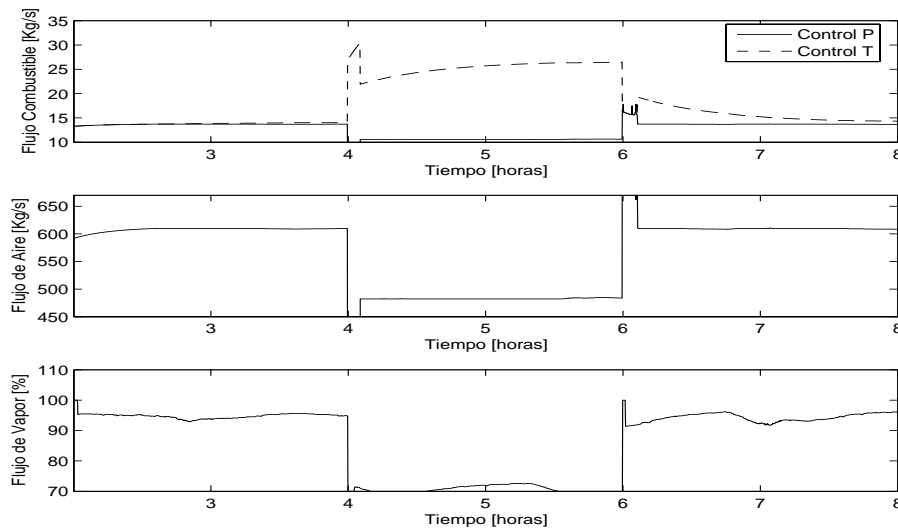


Figura 5.17: Control supervisor predictivo híbrido: Variables manipuladas

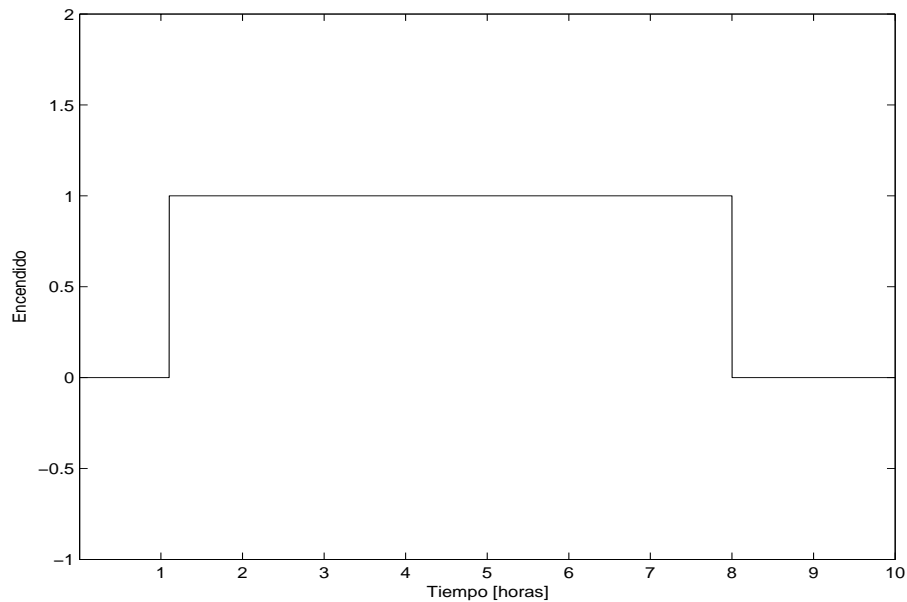


Figura 5.18: Control supervisor predictivo híbrido: Variables de encendido (Superpuestas)

Además, como muestra la figura 5.18, el controlador determina que el momento de encender la turbina a gas de forma de respetar el retardo propio de dicha turbina y también respetar el retardo asociado a la partida fría de la turbina a vapor. Hay que recordar que la lógica que relaciona ambas turbinas es que la turbina a vapor debe encenderse sólo si la turbina a gas está encendida y condición es respetada íntegramente por el controlador.

Con respecto a la modelación del efecto de la temperatura, el control de la turbina a gas es relativamente sencillo pues las fluctuaciones de temperatura no afectan demasiado el rendimiento de la misma, sin embargo, la turbina a vapor si se ve afectada y aún en dichas condiciones el control predictivo híbrido es capaz de determinar las acciones de control adecuadas de forma tal que no se afecte el cumplimiento de la demanda eléctrica.

La tabla 5.5 muestra que el consumo promedio de combustible no se ve afecta-

Horizonte de Predicción	Consumo de Combustible Promedio [Kg/s]
20	12.6025
25	12.6023
30	12.6023

Tabla 5.5: Sensibilidad con respecto al horizonte de predicción

do de manera importante por variaciones en el horizonte de predicción, luego la elección de su valor sólo tiene relación con incluir los retardos asociados a la partida.

5.7. Conclusiones y Análisis de Resultados

Luego del análisis de los resultados recién mostrados se puede concluir que el esquema de modelación MLD sumado a la estrategia de control MPC resulta muy adecuada para construir un controlador capaz de ser aplicado a un proceso tan complejo como puede ser el control de una central de ciclo combinado.

El proceso de modelación se dividió en 2 partes: una relacionada con la dinámica del proceso y la otra con la lógica del proceso. Para modelar la dinámica se obtuvieron datos reales del funcionamiento de la central de manera de poder construir un modelo que representase de manera fiel la realidad del proceso. Para modelar las condiciones lógicas se recurrió a los manuales de usuario de la central donde se especifican las condiciones que deben cumplirse para poder operar la central de manera apropiada y luego dichas condiciones fueron transformadas a desigualdades enteras-mixtas mediante la introducción de variables binarias. Pero, además de ello se incorporó al proceso de modelación el efecto que produce la temperatura ambiente sobre el rendimiento de las turbinas de manera de representar de mejor forma el comportamiento real de la central de ciclo combinado. Todo este proceso derivó en un modelo de predicción cuyo grado de exactitud era muy elevado y que sería uti-

CAPÍTULO 5. OPTIMIZACIÓN DEL COMPLEJO TÉRMICO NEHUENCO

lizado por el control predictivo para optimizar el funcionamiento de la central.

La construcción del controlador fue relativamente sencilla pues bastaba diseñar una función objetivo que representara de manera adecuada los ingresos y costos asociados a la operación de la central, pero si se quiere aplicar el control en planta es necesario considerar un esquema supervisor lo que implica modelar el sistema de control existente en la planta. El proceso de modelación del sistema de control fue simplificado basándose en el conocimiento que se tiene del proceso, sin embargo, considerar el controlador completo no es una tarea complicada y en futuros trabajos se podrán analizar las ganancias de dicha modelación.

Las pruebas realizadas muestran que el uso del control supervisor predictivo híbrido implica una mejora en el funcionamiento de la central de ciclo combinado lo cual se ve reflejado en que las demandas son satisfechas utilizando menor cantidad de combustible en comparación con la estrategia de control PID. Esto se debe principalmente a que la modelación de la dinámica del proceso fue adecuada y las características lógicas incluidas son representativas del funcionamiento. Sin embargo, se podría mejorar aún más el desempeño del controlador al utilizar modelos de predicción que sean más precisos aún, como es el caso de los modelos basados en redes neuronales o lógica difusa. Esto implicaría que el problema de optimización a resolver sería no-lineal entero-mixto, sin embargo, hoy en día existen herramientas eficientes para resolver esa clase de problemas. Por otro lado, la forma en que se modeló el efecto de la temperatura ambiente, transformando los modelos de parámetros fijos en modelos de parámetros variables, fue bastante adecuada y permitió que el controlador pudiera actuar de manera solvente ante variaciones de la misma.

El único punto bajo que presentó el controlador fue la incapacidad de resolver el problema de optimización para partidas tibias y frías debido a que los horizontes de

CAPÍTULO 5. OPTIMIZACIÓN DEL COMPLEJO TÉRMICO NEHUENCO

predicción utilizados eran demasiado altos. Esto implicaba que la cantidad de variables binarias crecía y por ende la cantidad de ramas que debía generar el algoritmo "Branch and Bound" no podían ser guardadas en la memoria del computador. En el caso del tipo de partida fría, el tiempo de solución asociado al problema de optimización nunca superó el tiempo de muestreo, que correspondía a 2 minutos, por lo tanto sería posible utilizar éste controlador en la aplicación real. La única forma de solucionar este problema es incorporar nuevas estrategias de búsqueda asociadas al árbol generado por el algoritmo "Branch and Bound" y éste tópico es materia actual de investigación en el área de optimización matemática.

Capítulo 6

Discusión y Conclusiones

El objetivo principal de este trabajo consistió en desarrollar un controlador para optimizar económicamente el funcionamiento de una central de ciclo combinado. Este proceso sería representado como un sistema híbrido de manera de capturar sus distintos modos de funcionamiento. Para lograr este objetivo se estudiaron esquemas de control y modelación para sistemas híbridos.

En este escenario, el control predictivo basado en modelo junto a la modelación MLD resultaron ser herramientas bastante interesantes que permite generar un controlador capaz de considerar las distintas dinámicas del sistema en un sólo esquema unificado. Esto se ejemplificó para un sistema simple con conmutaciones de dinámica, donde el control predictivo fue capaz de generar acciones de control tendientes a disminuir el error de seguimiento en la referencia, respetando las distintas restricciones impuestas sobre las entradas y salidas del sistema.

A continuación, se desarrolló por simulación un controlador predictivo híbrido para una central de ciclo combinado con cogeneración basado en un modelo híbrido que capturaba una gran cantidad de características inherentes al funcionamiento de este tipo de plantas, dentro de ellas: Modos de partida de ambas turbinas, señales

CAPÍTULO 6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

de encendido, restricciones de cota sobre entradas y salidas, mínimos tiempos de encendido y apagado, y restricciones de rampas. Para este sistema, el controlador predictivo híbrido mostró resultados favorables en todas las pruebas realizadas minimizando el consumo de combustible y maximizando las ventas por energía eléctrica y vapor. No obstante, este desarrollo no capturaba todas las características que deben estar presentes en una implementación real. Por ejemplo, las dinámicas de las turbinas eran muy simples, la dinámica del sistema de control convencional, las restricciones sobre temperatura de los gases de escape de la turbina a gas y el efecto de la temperatura ambiental sobre la eficiencia de las turbinas no fueron considerados.

En este trabajo se consideró, en forma novedosa, el efecto que produce la temperatura ambiental sobre las turbinas y su integración en el modelo híbrido de predicción. Este problema es complejo, pues no es posible predecir con exactitud la evolución de la temperatura ambiente y ende su integración en el modelo de predicción es interesante. Sin embargo, si es posible modificar los modelos de predicción de acuerdo al valor actual de la temperatura ambiente de manera de considerar su efecto en el proceso de optimización. Esto se realizó en forma simple basándose en modelos lineales a tramos, es decir, para un cierto rango de temperaturas ambientales un modelo de predicción es válido.

Esta modelación se aplicó a la central de ciclo combinado con cogeneración obteniéndose resultados interesantes, como que el flujo de combustible se modificaba de acuerdo a la disminución o aumento en la eficiencia de las turbinas. No obstante, los modelos lineales por tramos presentan transiciones bruscas, por lo tanto, el perfil del consumo de combustible también presentaba esas características, las cuales son dañinas para los actuadores encargados de regular el flujo de combustible. Motivado por esto se consideró utilizar la lógica difusa para generar transiciones suaves

CAPÍTULO 6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

entre los modelos de predicción, de manera de obtener perfiles de consumo de combustible suaves y con ello aumentar la vida útil de la planta.

Finalmente, analizadas estas problemáticas se desarrolló por simulación un controlador predictivo híbrido para una planta de ciclo combinado, Nehuenco II. Las principales variables consideradas en este caso fueron: Potencias eléctricas generadas por las turbinas, temperatura de los gases de escape, flujo de combustible, flujo de aire al compresor y flujo de vapor.

El controlador predictivo híbrido fue aplicado en la modalidad de control supervisor, generando las referencias óptimas para el sistema de control convencional de modo de maximizar las ganancias del proceso. En este caso, el nuevo sistema de control predictivo híbrido generó un ahorro del 3% en el consumo de combustible.

Por último, los principales aportes generados en este trabajo fueron la creación de un sistema de control supervisor predictivo híbrido capaz de optimizar económicamente la operación de una central de ciclo combinado, durante la partida, operación normal y detención. Este algoritmo de control se basó en la integración de el control predictivo basado en modelo, la modelación MLD y la modelación difusa. En particular, el nuevo controlador fue capaz de reaccionar ante variaciones de la temperatura ambiental generando perfiles suaves de consumo de combustible, aire y vapor. Es importante mencionar que este diseño de control propuesto respeta la programación horaria dictada por el despacho económico sin descuidar restricciones importantes como la temperatura de los gases de escape de la turbina a gas. Por último, la efectividad de este controlador fue probada mediante simulaciones basadas en datos reales de la central de ciclo combinado Nehuenco II.

El trabajo futuro considerará incorporar, con más detalle dentro, el proceso de partida dentro del esquema de control, es decir, modelar también el funcionamiento

CAPÍTULO 6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

de la máquina desde que es encendida hasta que se sincroniza con la red. En este trabajo se simplificó dicho proceso a un retardo existente entre el instante en que la señal de encendido se activa y el instante en que la central está produciendo potencia, sin embargo, la operación real consiste en que las máquinas rotatorias pasen de una velocidad cero a la velocidad de sincronismo y posteriormente comienza el proceso de toma de carga. Para realizar este trabajo se debe modelar el stress térmico que sufre el rotor de las turbinas que es inversamente proporcional al tiempo que la turbina toma en llegar a la velocidad de sincronismo y además se debe incluir dentro del sistema de control de la turbina a gas la rama que controla la velocidad de rotación de la máquina. De esta manera el diseño del controlador se hará más robusto y sin duda mejorará la operación del ciclo combinado.

Apéndice A

Demostración de la ecuación (2.3.3)

Se desea demostrar que el problema de control óptimo:

$$J(u_0^{T-1}, x_0) \triangleq \sum_{t=0}^{T-1} \|u(t) - u_f\|_{Q_1}^2 + \|\delta(t, x_0, u_0^t) - \delta_f\|_{Q_2}^2 + \quad (\text{A.0.1})$$
$$\|z(t, x_0, u_0^t) - z_f\|_{Q_3}^2 + \|x(t, x_0, u_0^{t-1}) - x_f\|_{Q_4}^2 +$$
$$\|y(t, x_0, u_0^{t-1}) - y_f\|_{Q_5}^2$$

s.a.

$$x(T, x_0, u_0^{T-1}) = x_f$$

se puede escribir como:

$$\min_{\mathcal{V}} \mathcal{V}' S_1 \mathcal{V} + 2(S_2 + x_0' S_3) \mathcal{V}$$
$$\text{s.a. } F_1 \mathcal{V} \leq F_2 + F_3 x_0, \quad (\text{A.0.2})$$

APÉNDICE A. DEMOSTRACIÓN DE EQUIVALENCIA

El funcional planteado en la ecuación A.0.1 puede escribirse de forma matricial:

$$\begin{aligned}
 J &= \Omega' Q_1 \Omega - 2\Omega'_f Q_1 \Omega + \Xi' Q_3 \Xi - 2\Xi'_f Q_3 \Xi + \Delta' Q_2 \Delta - 2\Delta'_f Q_2 \Delta + \\
 &\quad X' \underbrace{(Q_4 + c' Q_5 c)}_{Q_{45}} X - 2X'_f (Q_4 + c' Q_5 c) X + X'_f (Q_4 + c' Q_5 c) X_f + \\
 &\quad \Omega_f Q_1 \Omega_f + \Xi_f Q_3 \Xi_f + \Delta_f Q_2 \Delta_f \\
 &= \mathcal{V}' \underbrace{\begin{bmatrix} Q_1 & 0 & 0 \\ 0 & Q_2 & 0 \\ 0 & 0 & Q_3 \end{bmatrix}}_{Q_{123}} \mathcal{V} + \underbrace{\begin{bmatrix} -2\Omega_f Q_1 & -2\Delta_f Q_2 & -2\Xi_f Q_3 \end{bmatrix}}_{Q_{123f}} \mathcal{V} + X' Q_{45} X - 2X'_f Q_{45} X + C
 \end{aligned}$$

donde:

$$\Omega \triangleq \begin{bmatrix} u(0) \\ \vdots \\ u(T-1) \end{bmatrix}, \quad \Delta \triangleq \begin{bmatrix} \delta(0) \\ \vdots \\ \delta(T-1) \end{bmatrix}, \quad \Xi \triangleq \begin{bmatrix} z(0) \\ \vdots \\ z(T-1) \end{bmatrix}, \quad X \triangleq \begin{bmatrix} x(1) \\ \vdots \\ x(T) \end{bmatrix}, \quad \mathcal{V} \triangleq \begin{bmatrix} \Omega \\ \Delta \\ \Xi \end{bmatrix}$$

y C corresponde a la suma de los términos constantes. La ecuación (2.3.2) sirve para dejar el vector X en función de Ω , Δ y Ξ para lo cual se debe escribir cada término $[x(1), \dots, x(T)]$ en función de $[u(0), \dots, u(T-1)]$, $[\delta(0), \dots, \delta(T-1)]$ y $[z(0), \dots, z(T-1)]$, y finalmente escribir el resultado en forma matricial:

$$\begin{aligned}
 X &= \begin{bmatrix} A \\ A^2 \\ \vdots \\ A^T \end{bmatrix} x_0 + \begin{bmatrix} B_1 & 0 & \cdots & 0 & B_2 & 0 & \cdots & 0 & B_3 & 0 & \cdots & 0 \\ B_1 AB_1 & \cdots & 0 & B_2 AB_2 & \cdots & 0 & B_2 AB_3 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots \\ B_1 AB_1 \cdots A^T B_1 & B_2 AB_2 \cdots A^T B_2 & B_2 AB_3 \cdots A^T B_3 \end{bmatrix} \mathcal{V} \\
 &= A_0 x_0 + B \mathcal{V} \tag{A.0.3}
 \end{aligned}$$

APÉNDICE A. DEMOSTRACIÓN DE EQUIVALENCIA

Reemplazando (A.0.3) en J se llega a:

$$J_1 = J - C = \mathcal{V}' S_1 \mathcal{V} + 2(S_2 + x'_0 S_3) \mathcal{V} \quad (\text{A.0.4})$$

donde:

$$S_1 = [Q_{123} + B' Q_{45} B]$$

$$S_2 = -[Q_{123f} + X'_f Q_{45} B]$$

$$S_3 = A'_0 Q_{45} B$$

y si se reemplaza (A.0.3) en (2.2.1c) es fácil llegar a:

$$\left[\begin{array}{c} \left[\begin{array}{cccccccc} E_{1t} & 0 & \cdots & 0 & E_{2t} & 0 & \cdots & 0 & E_{3t} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & E_{1t} & \cdots & 0 & 0 & E_{2t} & \cdots & 0 & 0 & E_{3t} & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & E_{1t} & 0 & 0 & \cdots & E_{1t} & 0 & 0 & \cdots & E_{1t} \end{array} \right] \\ - B \end{array} \right] \mathcal{V} \leq \left[\begin{array}{c} \left[\begin{array}{cccc} E_{5t} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E_{5t} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & E_{5t} \end{array} \right] + \\ \left[\begin{array}{cccc} E_{4t} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E_{4t} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & E_{4t} \end{array} \right] Ax'_0 \end{array} \right] \quad (\text{A.0.5})$$

donde se identifican claramente F_1 , F_2 y F_3 . ■

Apéndice B

Transformación de un problema MILP a uno LP

En [1] se propone un método para optimizar funciones lineales por tramos utilizando variables binarias. Esto permite formular el problema de optimización original como uno MILP para el cual existen herramientas de solución eficientes. Sin embargo, trasladar esta estrategia a la solución del problema MPC puede llegar a ser muy costoso debido a que al aumentar el horizonte de predicción, aumentaría la cantidad de variables binarias asociadas. Es por ello que en [16] se propone utilizar la identidad (B.0.1) para evitar el uso de variables binarias auxiliares.

APÉNDICE B. TRANSFORMACIÓN DE UN PROBLEMA MILP A UNO LP

$$\min p|x| \equiv \min p\eta \quad (\text{B.0.1})$$

$$p > 0 \quad p > 0$$

$$x \in \mathbb{R}^n \quad \eta, x \in \mathbb{R}^n$$

$$Ax \leq b \quad Ax \leq b$$

$$x \leq \eta$$

$$-x \leq \eta$$

donde p es un vector de coeficientes positivos, x es el vector de incógnitas y η es el vector de variables auxiliares reales. En este caso $|x|$ corresponde al valor absoluto de cada componente del vector x ordenadas en un vector.

Para demostrar esta identidad se utilizará el siguiente razonamiento: Cualquier vector real se puede escribir como resta de dos vectores positivos, es decir:

$$x = x_1 - x_2 \text{ donde } x \in \mathbb{R}^n, x_1 \geq 0 \in \mathbb{R}^n \text{ y } x_2 \geq 0 \in \mathbb{R}^n \quad (\text{B.0.2})$$

Además se impone la siguiente igualdad:

$$|x| = x_1 + x_2 \quad (\text{B.0.3})$$

Con ello el problema inicial se transforma en el mostrado en la ecuación B.0.4

APÉNDICE B. TRANSFORMACIÓN DE UN PROBLEMA MILP A UNO LP

$$\min p|x| \equiv \min p(x_1 + x_2) \quad (\text{B.0.4})$$

$$p > 0 \quad p > 0$$

$$x \in \mathbb{R}^n \quad x_1, x_2 \in \mathbb{R}^n$$

$$Ax \leq b \quad A(x_1 - x_2) \leq b$$

$$x_1 \geq 0$$

$$x_2 \geq 0$$

El óptimo obliga a que al menos x_1 ó x_2 debe ser cero. En caso contrario se puede definir $d = \min\{x_1, x_2\}$ y obtener un nuevo óptimo $x'_1 = x_1 - d$ y $x'_2 = x_2 - d$, pues la restricción $A(x_1 - d - x_2 + d) = A(x_1 - x_2) \leq b$ se mantiene, pero el valor de la función objetivo disminuye a $p(x_1 + x_2 - 2d)$ que es menor al óptimo anterior. El hecho de que una de las variables necesariamente sea nula, permite utilizar una variable auxiliar η para representar el valor absoluto, tal que $x \leq \eta$ y $-x \leq \eta$. Ello asegura que $\eta \geq 0$ llegando a la formulación original del problema.

Este tipo de transformacion también se pueden aplicar a funciones $\max(x, y)$ y $\min(x, y)$ recordando las identidades (B.0.5) y (B.0.6).

$$\min(x, y) = \frac{(x + y - |x - y|)}{2} \quad (\text{B.0.5})$$

$$\max(x, y) = \frac{(x + y + |x - y|)}{2} \quad (\text{B.0.6})$$

luego, se pueden plantear las siguientes equivalencias:

APÉNDICE B. TRANSFORMACIÓN DE UN PROBLEMA MILP A UNO LP

$$\min \{p \min(x, y)\} \equiv \min \left\{ p \frac{x + y - \eta}{2} \right\} \quad (\text{B.0.7})$$

$$p > 0 \quad p > 0$$

$$x \in \mathbb{R}^n \quad \eta, x \in \mathbb{R}^n$$

$$Ax \leq b \quad Ax \leq b$$

$$(x - y) \leq \eta$$

$$-(x - y) \leq \eta$$

$$\min \{p \max(x, y)\} \equiv \min \left\{ p \frac{x + y + \eta}{2} \right\} \quad (\text{B.0.8})$$

$$p > 0 \quad p > 0$$

$$x \in \mathbb{R}^n \quad \eta, x \in \mathbb{R}^n$$

$$Ax \leq b \quad Ax \leq b$$

$$(x - y) \leq \eta$$

$$-(x - y) \leq \eta$$

En caso de que el vector ponderador p sea negativo, entonces es necesario recordar las siguientes identidades:

$$-\min(x, y) = \max(-x, -y)$$

$$-\max(x, y) = \min(-x, -y)$$

que permiten evitar la restricción de (B.0.1) traspasando el signo negativo a las variables.

Apéndice C

Consideraciones Termodinámicas en la Operación de Máquinas Térmicas

Dentro de la optimización en la operación de una central térmica basada en un control predictivo híbrido es de vital importancia contar con un modelo de predicción que capture la mayor cantidad de características relativas a su funcionamiento. Esto permite que la predicción que realiza el controlador a medida que optimiza el funcional de costos sea muy parecida al comportamiento real que exhibiría la planta al aplicarle el mismo set de entradas. Sin embargo, a menudo un modelo no queda definido completamente sin considerar perturbaciones que modifican su operación: en el caso de una CCPP una perturbación que es interesante de estudiar es la acción de la temperatura ambiente sobre la actual producción de potencia eléctrica. Para entender como está perturbación afecta el funcionamiento de la CCPP es necesario estudiar la termodinámica asociada a las turbinas y con ello analizar la forma de integrar su efecto en la modelación del proceso. En el presente capítulo se abordará el estudio termodinámico del proceso y su integración en el modelo predictivo.

Las principales razones que explican el impacto que tiene la temperatura ambien-

APÉNDICE C. CONSIDERACIONES TERMODINÁMICAS EN LA OPERACIÓN DE MÁQUINAS TÉRMICAS

te en la producción de potencia y eficiencia de una turbina son las siguientes:

- El aumento de la temperatura del aire reduce la densidad del aire y con ello se reduce el flujo másico de aire que se ingresa al sistema.
- La potencia consumida por el compresor aumenta en igual proporción al aumento de la temperatura del aire, sin que ello implique un correspondiente aumento en la potencia que produce la turbina.
- Como la capacidad de absorción de la turbina permanece constante, la presión antes de la turbina disminuye pues el flujo másico disminuye al aumentar la temperatura. Con ello disminuye la razón de presión dentro de la turbina lo que afecta su rendimiento.

Estas consideraciones se pueden observar al analizar un diagrama temperatura-entropía del proceso (ciclo brayton o Joule) cuya forma se muestra en la figura C.1. Dicho diagrama muestra las distintas etapas que se suceden durante el funcionamiento de una turbina a gas.

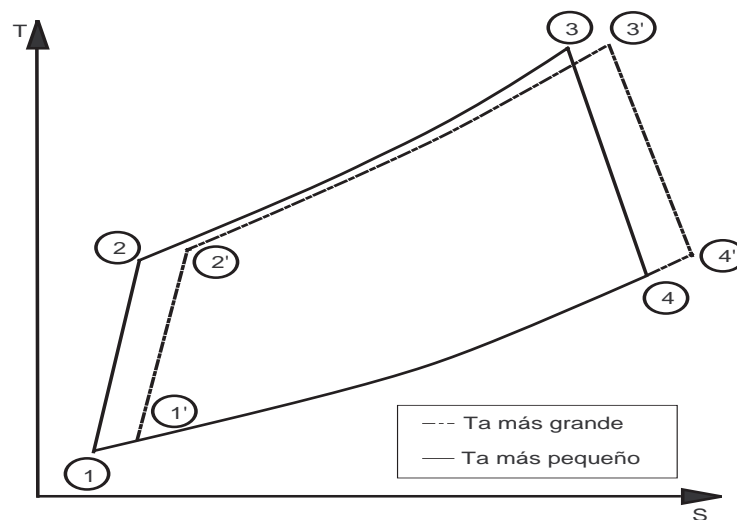


Figura C.1: Diagrama temperatura-entropía.

APÉNDICE C. CONSIDERACIONES TERMODINÁMICAS EN LA OPERACIÓN DE MÁQUINAS TÉRMICAS

Las fases del ciclo se explican a continuación:

- Etapa de compresión (1-2): durante esta etapa se toma aire desde el ambiente y se comprime aumentando su temperatura y presión.
- Etapa de combustión (2-3): durante esta etapa el aire comprimido es quemado usando gas para aumentar su temperatura, es decir, se le ha añadido una cantidad de calor al aire aumentando su energía.
- Etapa de expansión (3-4): durante esta etapa el aire caliente pasa a la turbina donde se expande generando trabajo útil en el eje. De esta forma se transmite la energía contenida en los gases y se convierte en energía cinética rotatoria.
- Cierre del ciclo (4-1): Corresponde a una simplificación teórica que describe el paso del aire desde la turbina al ambiente donde posteriormente se enfría y vuelve a ser utilizado al comienzo del ciclo. Esto corresponde a una simplificación pues el aire que entra a la turbina no es exactamente el que fue expulsado.

Una medida de la cantidad de energía que puede ser transformada en trabajo útil está dada por el primer principio de la termodinámica que se sintetiza en la fórmula (C.0.1) donde

$$\Delta H = c\Delta T \quad (\text{C.0.1})$$

donde H corresponde a la entalpía, Q corresponde al calor y W es el trabajo técnico realizado. Los signos de la ecuación se deben ajustar a las direcciones mostradas en la figura C.2.

APÉNDICE C. CONSIDERACIONES TERMODINÁMICAS EN LA OPERACIÓN DE MÁQUINAS TÉRMICAS

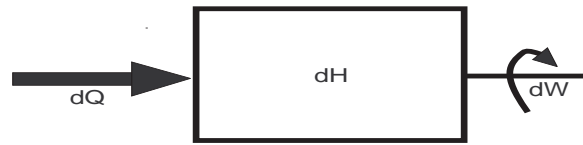


Figura C.2: Primer principio de la termodinámica

La entalpía corresponde a una medida de la energía que posee un proceso. Es por ello que al observar los diagramas mostrados en la figura C.1, se puede concluir que la cantidad de energía que la turbina puede rescatar del aire caliente es mayor cuando la temperatura ambiente es menor, ello debido a que $\Delta H_{34} = c(T_3 - T_4) > \Delta H_{3'4'} = c(T_{3'} - T_{4'})$. Esto explicaría por que a mayor temperatura la eficiencia de una central de ciclo combinado baja y con ello baja la potencia producida bajo las mismas sollicitaciones de combustible.

Sin embargo, existen ciertos caso en que la eficiencia de la central de ciclo combinado puede exhibir un perfil de rendimiento absolutamente dispar a la explicación anterior. La figura C.3 muestra dicho perfil, donde se puede observar que el rendimiento del ciclo combinado aumenta cuando la temperatura del aire aumenta también. Este comportamiento se explica debido a que cuando la temperatura de los gases de escape es mayor se aumenta la eficiencia del ciclo de vapor y dicho aumento es mayor a la caída en la eficiencia del ciclo de gas solamente, por lo tanto, al juntarse en un ciclo combinado el resultado es un aumento en la eficiencia del ciclo completo. Por supuesto, se debe clarificar que este comportamiento no es general y sólo se da cuando la capacidad del condensador de quitar el calor de los gases de escape es relativamente constante. En caso de tener un condensador donde el agua de refrigeración es enfríada en una torre de enfriamiento y con una humedad relativa del aire del 60% entonces el comportamiento cambia drásticamente como muestra la figura C.4.

APÉNDICE C. CONSIDERACIONES TERMODINÁMICAS EN LA OPERACIÓN DE MÁQUINAS TÉRMICAS

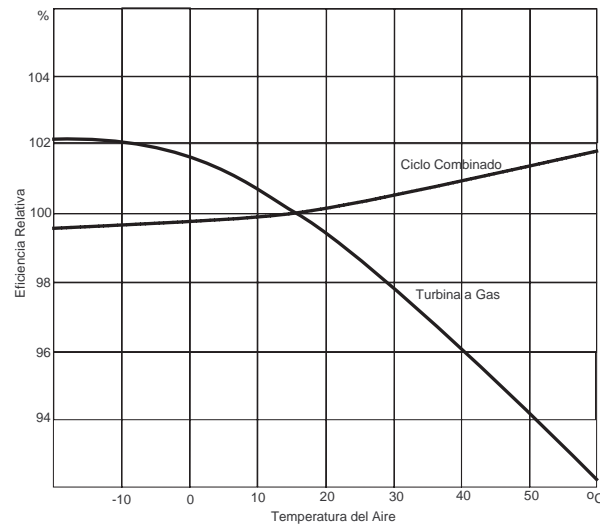


Figura C.3: Comparación de Eficiencias Turbina a Gas Vs Ciclo Combinado

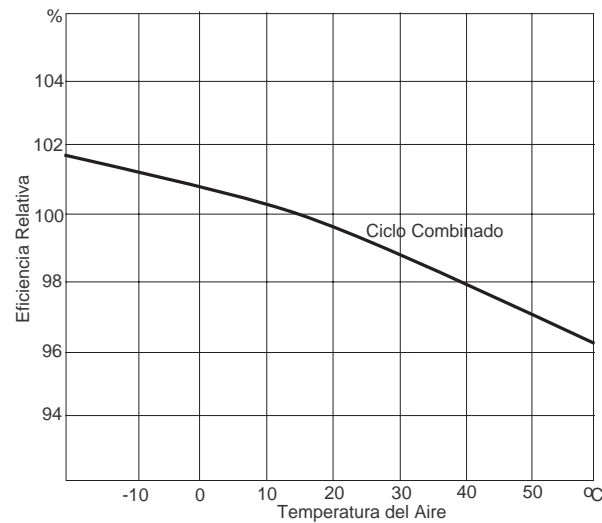


Figura C.4: Eficiencia ciclo combinado usando agua refrigerada en torre de enfriamiento

En este trabajo se modelará el caso en que la eficiencia baja al aumentar la temperatura ambiente, esta decisión se basa en que la aplicación será hecha sobre una central que posee una torre de enfriamiento y de acuerdo a la figura 4.7 su eficiencia baja al aumentar la temperatura ambiente.

Apéndice D

Temperatura Ambiente: Integración en Esquema MLD

Tal como se mencionó en la sección referente a la modelación de la CCPP, un factor importante a considerar es el papel que cumple la temperatura ambiente en la eficiencia de las turbinas. Para abordar este tópico se plantearon 2 posibilidades: modelación basada en funciones lineales por tramos y modelación difusa. Además, dentro de cada posibilidad se plantearon 2 enfoques: uno on-line y otro off-line. A continuación se explica el detalle de la integración de cada alternativa en el esquema MLD.

D.1. Modelación Lineal a Tramos: Caso Off-Line

Esta aproximación es la más simple entre las consideradas en este trabajo, pues sólo basta conocer la temperatura ambiente actual para seleccionar el modelo de predicción adecuado. La explicación formal es la siguiente: Se tienen n modelos lineales M_1, \dots, M_n , n rangos de temperatura disjuntos $[T_1, T_2], \dots, [T_n, T_{n+1}]$ y n varia-

bles binarias $\delta_i, i = 1 \dots n$ junto a la relación lógica mostrada en la ecuación (D.1.1).

$$T_{amb}(t) \in [T_i, T_{i+1}] \iff \delta_i = 1, \quad \sum_{i=1}^n \delta_i = 1 \quad (D.1.1)$$

donde $T_{amb}(t)$ es la temperatura ambiente en el instante t . De esta forma es posible escribir el modelo de la potencia (tanto de la turbina a vapor como de la turbina a gas) como se muestra en la ecuación (D.1.2).

$$P(t+1) = \sum_{i=1}^n M_i \delta_i \quad (D.1.2)$$

Se considerará que la temperatura ambiente en el instante t determina el modelo de predicción a utilizar, y dicho modelo se mantiene constante durante el horizonte de predicción. Luego la implementación es simple:

- Se evalúa la $T_{amb}(t)$.
- De acuerdo a su valor, se selecciona el modelo de predicción a utilizar.
- Dicho modelo se mantiene constante durante la optimización.
- Se resuelve el problema de optimización y se determinan las acciones de control óptimas.
- Se repite el proceso en el siguiente instante.

D.2. Modelación Lineal a Tramos: Caso On-Line

En este caso se repiten las ecuaciones (D.1.1) y (D.1.2), pero teniendo en consideración que durante el horizonte de predicción la temperatura ambiente puede cambiar, luego el modelo de predicción debe cambiar. Esto obliga a tener una predicción

del comportamiento de la temperatura ambiente durante el horizonte de predicción, la que se puede obtener mediante un estudio de las condiciones ambientales de la zona donde se encuentra la CCPP. A la predicción de la temperatura ambiente se le llamará T_{amb}^{pred} , la cual corresponderá a un vector con M^1 componentes ordenadas según la evolución temporal de la temperatura ambiente. La implementación será la siguiente:

- Se evalúa el valor de las variables binarias que tienen valor 1 en cada predicción de acuerdo al valor de cada componente T_{amb}^{pred} , de esta forma se sabe que modelo lineal por tramos está activo en cada paso del horizonte de predicción.
- Se generan las restricciones de manera que a cada paso de predicción se tenga el modelo acorde a la predicción de temperatura.
- Se resuelve el problema de optimización y se determinan las acciones de control óptimas.
- Se repite el proceso actualizando T_{amb}^{pred} .

D.3. Modelación Difusa: Caso Off-line

En este caso se tendrán n funciones de pertenencia de cada modelo a un cluster o conjunto difuso, la cantidad de modelos también serán n . Las funciones de pertenencia serán evaluadas en función de la temperatura ambiente en el instante t generando un grado de activación ω_i para luego calcular el modelo predictivo según la fórmula mostrada en la ecuación (D.3.1).

¹ M corresponde al horizonte de predicción

$$P(t + 1) = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i(T_{amb}) \times M_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i(T_{amb})} \quad (D.3.1)$$

El modelo resultante tiene los parámetros fijos y por lo tanto puede ser usado durante todo el horizonte de predicción. La implementación es la siguiente:

- Se calculan los grado de pertenencia de cada modelo de acuerdo al valor de $T_{amb}(t)$.
- Se calcula el modelo resultante según la fórmula (D.3.1).
- El modelo resultante se utiliza como modelo predictivo durante todo el horizonte de predicción.
- Se resuelve el problema de optimización y se determinan las acciones de control óptimas.
- Se repite el proceso en el siguiente instante.

D.4. Modelación Difusa: Caso On-line

Tal como se hizo con el modelo lineal a tramos, en este caso se debe tener en consideración que durante el horizonte de predicción la temperatura ambiente puede cambiar, luego el modelo de predicción debe cambiar. El problema de la modelación lineal a tramos es que para tener transiciones suaves de un modelo a otro se debe tener una gran cantidad de funciones lineales, lo que trae como consecuencia un retardo asociado al computo del modelo. En el caso de la modelación difusa, las transiciones ocurren gradualmente gracias al uso de funciones de pertenencia suaves y dicho comportamiento es más adecuado a una situación real. Este caso se diferencia

APÉNDICE D. TEMPERATURA AMBIENTE: INTEGRACIÓN EN ESQUEMA MLD

del anterior por requerir una predicción del comportamiento de la temperatura ambiente durante el horizonte de predicción tal como se vio en la implementación del caso lineal por tramos. La implementación es la siguiente:

- Se evalúa el valor de las funciones de pertenencia en cada predicción de acuerdo al valor de cada componente T_{amb}^{pred} , de esta forma se tendrá un promedio ponderado distinto a cada instante de predicción.
- Se generan las restricciones de manera que a cada paso de predicción se tenga el modelo acorde a la predicción de temperatura.
- Se resuelve el problema de optimización y se determinan las acciones de control óptimas.
- Se repite el proceso actualizando T_{amb}^{pred} .

Para ejemplificar este procedimiento se supondrá que se tienen los siguientes modelos:

- Turbina a gas:
 - Modelo de potencia eléctrica para temperaturas ambientales bajas:

$$(1 - a_1 z^{-1})P_{TG}(k) = \alpha_1 [b_1 u_1(k) + b_2 u_2(k)] \text{ si } T_{amb} \in [-\infty^\circ C, 7^\circ C] \quad (D.4.1)$$

donde α_1 corresponde al ponderador elegido de acuerdo al valor del rendimiento medio en ese tramo de temperatura.

- Modelo de potencia eléctrica para temperaturas ambientales medias :

$$(1 - a_1 z^{-1})P_{TG}(k) = \alpha_2 [b_1 u_1(k) + b_2 u_2(k)] \text{ si } T_{amb} \in [7^\circ C, 35^\circ C] \quad (D.4.2)$$

donde α_2 corresponde al ponderador elegido de acuerdo al valor del rendimiento medio en ese tramo de temperatura.

- Modelo de potencia eléctrica para temperaturas ambientales altas :

$$(1 - a_1 z^{-1})P_{TG}(k) = \alpha_3[b_1 u_1(k) + b_2 u_2(k)] \text{ si } T_{amb} \in [35^\circ C, \infty^\circ C] \quad (D.4.3)$$

donde α_3 corresponde al ponderador elegido de acuerdo al valor del rendimiento medio en ese tramo de temperatura.

- Turbina a Vapor

- Modelo de potencia eléctrica para temperaturas ambientales bajas :

$$(1 - a_2 z^{-1})P_{TV}(k) = \beta_1[b_3 u_3(k)] \text{ si } T_{amb} \in [-\infty^\circ C, 15^\circ C] \quad (D.4.4)$$

donde β_1 corresponde al ponderador elegido de acuerdo al valor del rendimiento medio en ese tramo de temperatura.

- Modelo de potencia eléctrica para temperaturas ambientales altas :

$$(1 - a_2 z^{-1})P_{TV}(k) = \beta_2[b_3 u_3(k)] \text{ si } T_{amb} \in [15^\circ C, \infty^\circ C] \quad (D.4.5)$$

donde β_2 corresponde al ponderador elegido de acuerdo al valor del rendimiento medio en ese tramo de temperatura.

Como se puede observar, los ponderadores no modifican los polos del sistema, sólo modifican la importancia de las entradas.

El enfoque PWM off-line a cada instante de optimización elige sólo un modelo de predicción, tanto para la turbina a gas como para la turbina a vapor, de acuerdo

APÉNDICE D. TEMPERATURA AMBIENTE: INTEGRACIÓN EN ESQUEMA MLD

al valor de T_{amb} . Dicho modelo se utiliza para realizar todas las predicciones dadas por el horizonte de predicción. Por otro lado, el enfoque on-line elige un modelo de predicción al inicio de la optimización de acuerdo al valor de T_{amb} en dicho instante, pero al realizar la siguiente predicción modifica el modelo de acuerdo al valor de que posee la predicción de la temperatura ambiente relativo al perfil de temperatura dado.

El enfoque difuso off-line evalúa primero el valor de las funciones de pertenencia de los distintos modelos de la turbina a gas y vapor. De esta forma, para una temperatura ambiente T_{amb} se tienen los siguientes grados de activación y modelos finales:

- Modelo de potencia eléctrica de la turbina a gas:
 - Temperaturas ambientales bajas: w_{11}
 - Temperaturas ambientales medias: w_{12}
 - Temperaturas ambientales altas: w_{13}
 - Modelo Final:

$$(1 - a_1 z^{-1})P_{TG}(k) = \frac{\alpha_1 w_{11} + \alpha_2 w_{12} + \alpha_3 w_{13}}{w_{11} + w_{12} + w_{13}} [b_1 u_1(k) + b_2 u_2(k)] \quad (D.4.6)$$

- Modelo de potencia eléctrica de la turbina a vapor:
 - Temperaturas ambientales bajas: w_{21}
 - Temperaturas ambientales altas: w_{22}
 - Modelo Final:

$$(1 - a_2 z^{-1})P_{TV}(k) = \frac{\beta_1 w_{21} + \beta_2 w_{22}}{w_{21} + w_{22}} [b_3 u_3(k)] \quad (D.4.7)$$

APÉNDICE D. TEMPERATURA AMBIENTE: INTEGRACIÓN EN ESQUEMA MLD

El enfoque difuso on-line es completamente análogo al caso PWM on-line.

Apéndice E

Datos Utilizados en la Modelación de Nehuenco II

E.1. Turbina a Gas

Las figuras E.1, E.2 y E.3 muestran los datos de potencia eléctrica, flujo de combustible y flujo de aire, respectivamente. Estos datos corresponden a muestreos de señales reales de Nehuenco II durante las fechas 2/11/2005 al 9/11/2005.

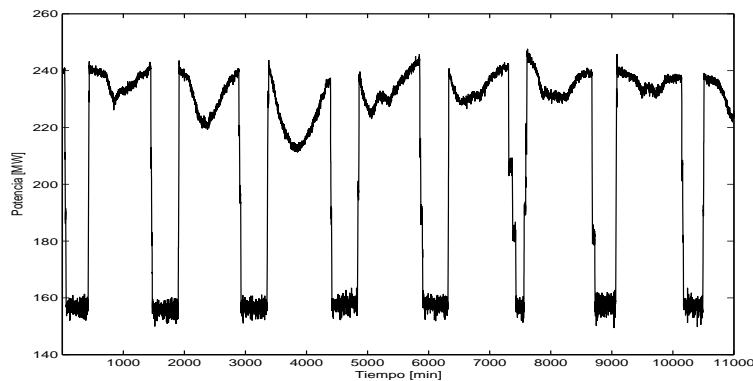


Figura E.1: Potencia eléctrica

APÉNDICE E. DATOS UTILIZADOS EN LA MODELACIÓN DE NEHUENCO II

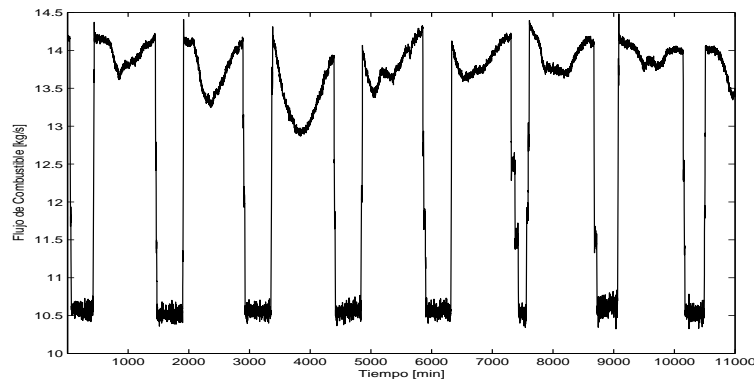


Figura E.2: Consumo de combustible

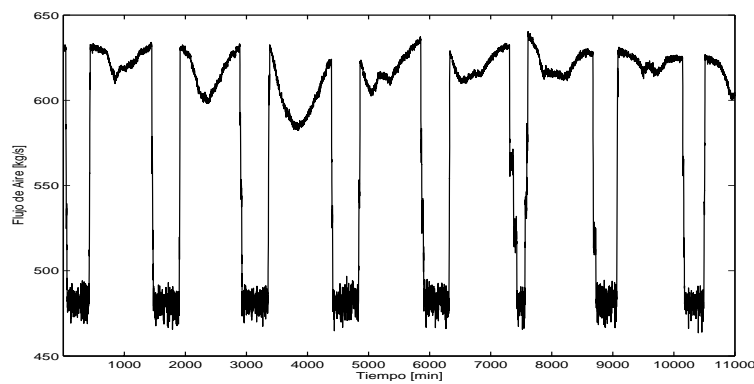


Figura E.3: Flujo de aire que ingresa al compresor

Las figuras E.4 y E.5 muestran una comparación entre la predicción a 10 pasos de los modelos de potencia y temperatura de gases de escape.

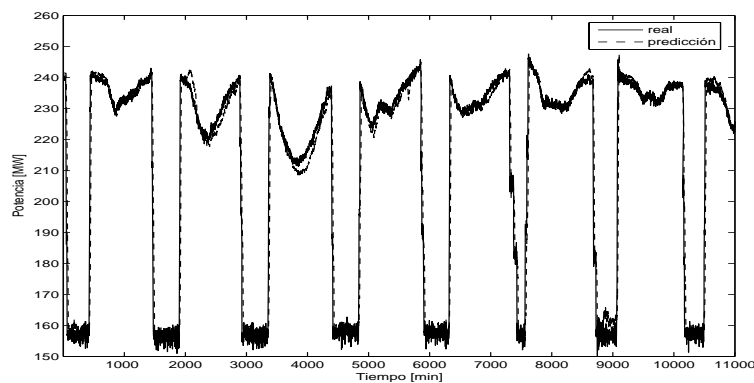


Figura E.4: Modelo potencia eléctrica

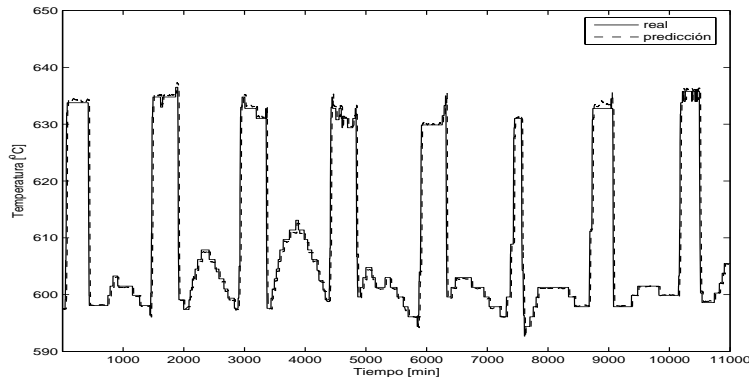


Figura E.5: Modelo de temperatura de gases de escape

E.2. Turbina a Vapor

Las figuras E.6 y E.7 muestran los datos de potencia eléctrica, flujo de combustible y flujo de aire, respectivamente. Estos datos corresponden a muestreos de señales reales de Nehuenco II durante las fechas 2/11/2005 al 9/11/2005.

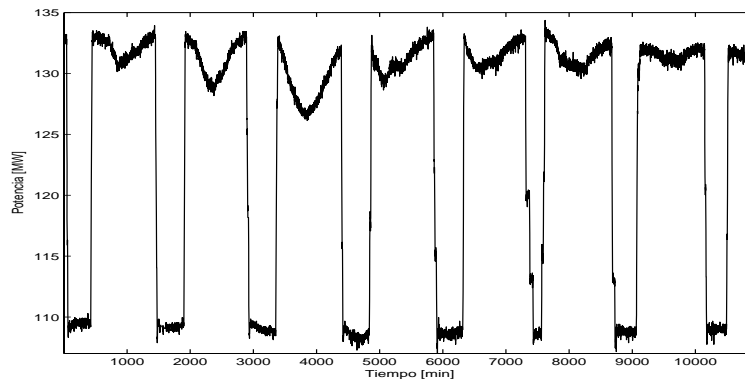


Figura E.6: Potencia eléctrica

APÉNDICE E. DATOS UTILIZADOS EN LA MODELACIÓN DE NEHUENCO II

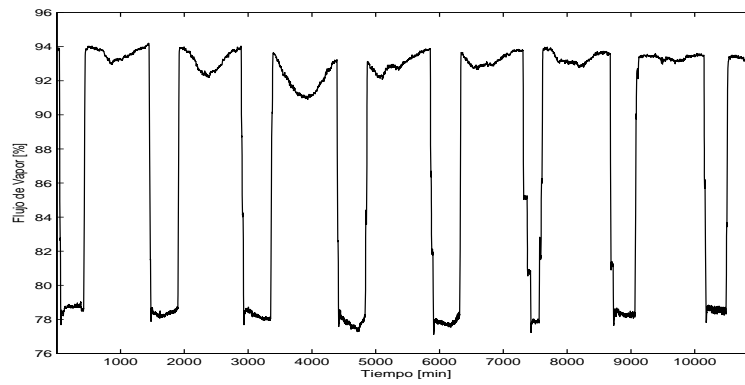


Figura E.7: Flujo de vapor

La figura E.8 muestra una comparación entre la predicción a 10 pasos del modelo de potencia.

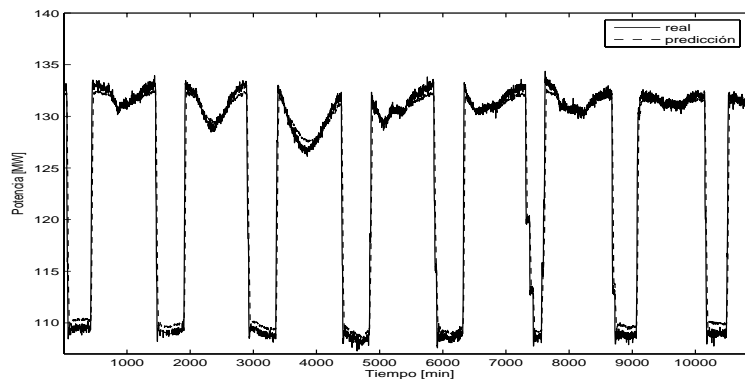


Figura E.8: Modelo potencia eléctrica

Bibliografía

- [1] G. Ferrari-Trecate, P. Letizia, and M. Spedicato. Optimization with piecewise-affine cost functions. *Technical Report, AUT01-13*, 2001.
- [2] E.F. Camacho and C. Bordons. *Model Predictive Control*. Springer, 1998.
- [3] D.Q. Mayne. Constrained model predictive control: Stability and optimality. *Automatica*, 36(6):789–814, Sept 2000.
- [4] E.D. Sontag. Nonlinear regulation: The piecewise linear approach. *IEEE Trans. Aut. Control*, 26 (2):346–357, 1981.
- [5] A. Bemporad and M. Morari. Control of systems integrating logic, dynamics and constraints. *Automatica*, 35:407–427, 1999.
- [6] W.P.M.H Heemels, J.M. Schumacher, and S. Weiland. Linear complementary systems. *SIAM J. Appl. Math.*, 60(4):1234–1269, 2000.
- [7] A. Bemporad, G. Ferrari-Trecate, and M. Morari. Observability and controllability of piecewise affine and hybrid systems. In *Proc. of the 38th Conference on Decisión and Control*, Dec 1999.
- [8] A. Bemporad, W. Heemels, and B. De Schutter. On hybrid systems and closed-loop mpc systems. *IEEE Transaction on Automatic Control*, 47:863–869, 2002.

BIBLIOGRAFÍA

- [9] G. Ferrari-Trecatte, F. A. Cuzzola, D. Mignone, and M. Morari. Analysis of discrete-time piecewise affine and hybrid systems. *Automatica*, 38(12):2139–2146, 2002.
- [10] D. Mignone, G. Ferrari-Trecatte, and M. Morari. Stability and stabilization of piecewise affine and hybrid systems: a lmi approach. In *Proc. 39th Conf. Decision and Control*, 2000.
- [11] A. Bemporad, D. Mignone, and M. Morari. An efficient branch and bound algorithm for state estimation and control of hybrid systems. *Technical Report*.
- [12] A. Ordys, A. Pike, M. Johnson, R. Katebi, and M. Grimble. *Modeling and Simulation of Power Generation Plants*. Series Advances in Industrial Control. Springer-Verlag London, 1994.
- [13] A.Ñakai, M.Ñakamoto, A. Kakehi, and S. Hayashi. Turbine start-up algorithm based on prediction of rotor thermal stress. In *Proceedings of the 34th SICE Annual Conference*, July 1995.
- [14] H. Matsumoto, S. Takahasi, T. Akiyama, and O. Ishiguro. Startup optimization of a combined cycle power plant based on cooperative fuzzy reasoning and a neural network. *IEEE Transactions on Energy Convesion*, 12(1):51–59, March 1997.
- [15] A Kamiya, I. Ono, M. Yamamura, and S. Kobayashi. Thermal power plant start-up scheduling with evolutionary computation by using an enforcement operator. In *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 1995. 'Intelligent Systems for the 21st Century'*, Oct 1995.
- [16] G. Ferrari-Trecate, E. Gallestey, P. Letizia, M. Speticato, and M. Morari. Model-

BIBLIOGRAFÍA

- ing and control of co-generation power plants: A hybrid system approach. *IEEE Trans. on Contr. Syst. Tech.*, 12(5):694–705, 2004.
- [17] R. Kehlhofer. *Combined Cycle Gas & Steam Turbine Power Plants*. PennWell.
- [18] D. Sáez, A. Cipriano, and A. Ordys. *Optimization of industrial processes at supervisory level: Application to control of thermal power plants*. Series Advances in Industrial Control. Springer-Verlag London, 2002.
- [19] D. Sáez, A. Ordys, and J. Grimble. Design of a supervisory predictive controller and its applications to thermal power plants. *Optimal Control Applications and Methods*, 26(4):169–198, July / August 2005.