

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



Profesor Patrocinante:
Ing. Juan P. Segovia V.

Informe de Memoria de Título
para optar al título de:
Ingeniero Civil Electrónico

Análisis y desarrollo de estrategias de solución al problema
de identificación de parámetros mediante procesamiento
distribuido

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Profesor Patrocinante:
Dr. Juan P. Segovia V.

Análisis y desarrollo de estrategias de solución al problema de identificación de parámetros mediante procesamiento distribuido

José Eduardo Baeza Novoa

Informe de Memoria de Título
para optar al Título de

Ingeniero Civil Electrónico

Marzo 2016

Resumen

El uso de la programación paralela ha tomado mucha importancia con el correr de los años, y cada vez son más las aplicaciones que dependen de ella, y la identificación estructural y paramétrica no es la excepción. Cuando se busca evaluar un determinado proceso, es importante conocer bien el sistema que hace posible tal proceso, pero para ello es necesario la modelación de dicho sistema. Es aquí donde entra en juego la identificación estructural y paramétrica. El problema presente en ello es que existen muchos factores que pueden influir tales como el tiempo de muestreo de las variables involucradas, el orden del sistema, el tamaño de la ventana de datos, la calidad de los datos, entre otros. Esto conlleva a un número elevado de combinaciones de factores que entregan diferentes resultados, lo cual implica un tiempo excesivo de estudio. Para poder discriminar esas combinaciones, se recurren a determinados índices de medición de calidad del modelo con el fin de encontrar cual combinación de factores entrega la mejor solución. Ante este problema, la paralelización se presenta como una solución destinada a reducir el periodo de estudio.

En el presente informe se ha investigado acerca del uso que se le puede dar a las herramientas de *Parallel Computing Toolbox* de MATLAB, para realizar estrategias de solución de identificación estructural y paramétrica, en donde se requieran enormes cantidades de cálculos matemáticos. En particular, se plantea usar diferentes valores de tiempo de muestreo, tiempo de retardo, tamaño de ventana de datos y valor mínimo del determinante de la pseudoinversa de la matriz de información, y distribuir las diferentes combinaciones de esos 4 factores en los procesadores que estén disponibles, para que cada procesador realice la identificación estructural y paramétrica y así poder reducir el costo y el tiempo de ejecución. La idea es realizar en el menor tiempo posible la tarea de encontrar la combinación de estos cuatro factores descritos que entregue el modelo con el mejor índice de calidad. Previamente se ha estudiado el modelo dinámico fenomenológico que representa a una unidad de tratamiento de aire de un quirófano y analizado las variables de interés.

Los resultados obtenidos muestran lo factible que es la utilización de la programación paralela en el ámbito de la búsqueda de un modelo de caja negra (black box) que represente de la forma más fiel posible el sistema en estudio, con el fin de implementar a futuro una buena aplicación de control, entre otros trabajos futuros.

Agradecimientos

A todos los profesores que me ayudaron a formarme como ingeniero, a mis amigos y compañeros que me han ayudado, y a mi familia por apoyarme en este proceso. Estos días en los que he estado realizando esta tesis fueron especialmente muy duros, por lo que agradezco de todo corazón su apoyo y confianza en estos días tan difíciles.

Deseo con toda el alma que después de obtener el título de Ingeniero Civil Electrónico pueda tener una vida maravillosa como persona y como profesional.

Gracias.



Tabla de contenido

LISTA DE TABLAS.....	VII
LISTA DE FIGURAS.....	VIII
NOMENCLATURA.....	X
ABREVIACIONES.....	XII
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
1.2. TRABAJOS PREVIOS	2
1.3. HIPÓTESIS DE TRABAJO	3
1.4. OBJETIVOS	3
1.4.1 <i>Objetivo general</i>	3
1.4.2 <i>Objetivos específicos</i>	4
1.5. ALCANCES Y LIMITACIONES.....	4
CAPÍTULO 2. PROGRAMACIÓN PARALELA	5
2.1. INTRODUCCIÓN	5
2.2. SIMULACIÓN PARALELA.....	5
2.2.1 <i>¿Qué es el cálculo paralelo?</i>	6
2.2.2 <i>Tipos de ordenadores paralelos</i>	7
2.2.3 <i>Conceptos de programación paralela</i>	8
2.3. LIMITACIONES DE LA PROGRAMACIÓN PARALELA.....	9
2.4. METODOLOGÍA DE DISEÑO DE ALGORITMOS PARALELOS	9
2.4.1 <i>Descomposición de tareas</i>	9
2.4.2 <i>Asignación de tareas</i>	10
2.5. MATLAB PARALLEL COMPUTING TOOLBOX	11
CAPÍTULO 3. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	13
3.1. INTRODUCCIÓN	13
3.2. DESCRIPCIÓN GENERAL	13
3.2.1 <i>Tipos de HVAC</i>	13
3.2.2 <i>Entrada de aire UTA</i>	16
3.2.3 <i>Componentes de una UTA</i>	16
3.2.4 <i>Descripción del Intercambiador de Calor</i>	18
3.3. MODELACIÓN FENOMENOLÓGICA	19
3.3.1 <i>Ecuaciones Dinámicas Zona térmica</i>	20
3.3.2 <i>Ecuaciones dinámicas unidad climatizadora</i>	22
3.3.3 <i>Ecuaciones Intercambiador de Calor</i>	23
CAPÍTULO 4. MODELACIÓN ESTRUCTURAL Y PARAMÉTRICA	25
4.1. SET DE DATOS TOMADOS	25
4.2. ANÁLISIS DE VARIABLES	26
4.2.1 <i>Estudio de Correlaciones</i>	27
4.2.2 <i>Correlaciones de las variables</i>	27
4.3. MODELO APROXIMADO DEL SISTEMA.....	37
4.3.1 <i>Discretización del sistema</i>	37
4.3.2 <i>Tipos de estructuras</i>	43
4.3.3 <i>Elección del modelo</i>	44
CAPÍTULO 5. IDENTIFICACIÓN DEL SISTEMA.....	45
5.1. INTRODUCCIÓN	45
5.2. MÍNIMOS CUADRADOS	45
5.3. ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS	46

5.4.	PROGRAMACIÓN PARALELA	50
5.5.	METODOLOGÍA DE IDENTIFICACIÓN	53
5.5.1	<i>Criterios</i>	53
5.5.2	<i>Valores usados para la identificación</i>	53
5.5.3	<i>Obtención y distribución del ECM, la media de varianza y la mejor relación ECM/varianza</i>	55
CAPÍTULO 6. RESULTADOS		62
6.1.	MODELO CON MENOR ERROR CUADRÁTICO MEDIO	62
6.2.	MODELO CON MENOR VARIANZA GENERAL	68
6.3.	MODELO CON MEJOR RELACIÓN ECM/VARIANZA.....	74
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES		81
7.1.	SUMARIO	81
7.2.	CONCLUSIONES.....	81
7.3.	TRABAJO FUTURO	81
BIBLIOGRAFÍA.....		83
ANEXO A. CÓDIGOS		85
A.1.	CÓDIGO DE CORRELACIONES	85
A.2.	CÓDIGO SPMD	92
A.3.	CÓDIGO M CORREL	101
A.4.	CÓDIGO CORREL	102
A.5.	CÓDIGO MODELO_ARX_DIF	102
A.6.	CÓDIGO FILTRAJE.....	105



Lista de Tablas

TABLA 2.1 Ventajas y desventajas de las memorias compartida y distribuida.....	8
TABLA 4.1: Valores máximos y mínimos permitidos para cada parámetro.....	36
TABLA 5.1: Ordenes de los polinomios autoregresivo y de media móvil.....	46
TABLA 5.2: Número de retardos usados.....	53
TABLA 5.3: Número de muestreos de 5 seg. Usados.....	53
TABLA 5.4: Tamaño ventanas usadas.....	54
TABLA 5.5: Límites mínimos requeridos para el determinante.....	54
TABLA 5.6: Variables fijas.....	54
TABLA 6.1: Combinación $T_d-T_0-m-lim_{det}$ para menor ECM	62
TABLA 6.2: Parámetros estimados, varianzas y desviaciones estándar para menor ECM.....	62
TABLA 6.3: Combinación $T_d-T_0-m-lim_{det}$ para menor varianza general	69
TABLA 6.4: Parámetros estimados, varianzas y desviaciones estándar para menor varianza general.....	69
TABLA 6.5: Combinación $T_d-T_0-m-lim_{det}$ para mejor relación ECM/varianza.....	74
TABLA 6.6: Parámetros estimados, varianzas y desviaciones estándar para mejor relación ECM/varianza.....	75



Lista de Figuras

Figura 2.1: Cálculo serial.....	5
Figura 2.2: Sectores de interés.....	6
Figura 2.3: Cálculo paralelo.....	7
Figura 2.4: Tipos de ordenadores paralelos.....	8
Figura 2.5: Descomposición del modelo.....	10
Figura 2.6: Tipos de Granularidad.....	10
Figura 2.7: Asignación de objetos.....	11
Figura 2.8: Tipos de asignación de tareas.....	11
Figura 2.9: Diagrama cliente-worker.....	12
Figura 3.1: Visiones externas de una unidad de tratamiento de aire con intercambiador de calor....	14
Figura 3.2: Diagrama UTA con intercambiador de calor.....	15
Figura 3.3: Diagrama UTA con caja de mezcla de aire.....	15
Figura 3.4: Intercambiador de flujo cruzado.....	18
Figura 3.5: Estructura interna de un intercambiador de calor de flujo cruzado.....	19
Figura 3.6: Esquema de la planta a simular con intercambiador de calor.....	20
Figura 4.1: Gráficos de las variables tomadas de la base de datos.....	26
Figura 4.2: Ubicación de los transmisores y set-points correspondientes al set de datos.....	26
Figura 4.3: Modelo de caja negra de la unidad de tratamiento de aire.....	28
Figura 4.4: Gráfico de coeficientes de autocorrelación de la temperatura del aire en el interior del quirófano.....	29
Figura 4.5: Gráfico de coeficientes de autocorrelación de la humedad relativa (HR) del aire en el interior del quirófano.....	30
Figura 4.6: Gráfico de coeficientes de correlación cruzada apertura válvula agua fría vs temperatura aire quirófano.....	31
Figura 4.7: Gráfico de coeficientes de correlación cruzada apertura válvula agua fría vs HR aire quirófano.....	32
Figura 4.8: Gráfico de coeficientes de correlación cruzada caudal aire vs temperatura aire quirófano.....	33
Figura 4.9: Gráfico de coeficientes de correlación cruzada caudal aire vs HR aire quirófano.....	34
Figura 4.10: Gráfico de coeficientes de correlación cruzada temperatura aire quirófano vs HR aire quirófano.....	35
Figura 4.11: Carta psicométrica Mollier.....	36
Figura 5.1: Esquema general de la preparación de los datos antes de la estimación del modelo.....	47
Figura 5.2: Esquema general del estudio de la evolución del determinante de la matriz $\Phi^T \Phi$	48
Figura 5.3: Esquema general del algoritmo general de identificación de parámetros.....	49
Figura 5.4: Descomposición y asignación de recursos del trabajo de identificación de parámetros (Descripción general).....	51
Figura 5.5 Ejemplo simple de uso del comando “parfor”.....	51
Figura 5.6: Ejemplo simple de uso del comando “spmd”.....	51
Figura 5.7 Ejemplo básico de ejecución paralela de diferentes tareas para cada procesador.....	52
Figura 5.8: Usos de spmd como parfor.....	52
Figura 5.9: Distribución de recursos en función de T_0	55
Figura 5.10: Creacion de matrices y matrices de celdas de ECM, promedio de varianzas y norma ECM/varianza.....	58

Figura 5.11: Ilustración de la supermatriz de $(n_{id} * n_{ven}) \times (n_{i0} * n_{det})$	59
Figura 5.12: Creación de la supermatriz de celdas.....	59
Figura 5.13: Creación de la supermatriz de ECM y búsqueda de la fila y la columna del menor valor de la misma	60
Figura 5.14: Búsqueda de la combinación de numero de muestreos, n° de retardos, tamaño de la ventana y límite mínimo del determinante que genera el menor ECM	61
Figura 6.1: Evolución del determinante de $\Phi^T \Phi$ para modelo de menor ECM.....	63
Figura 6.2: Evolución de la estimación paramétrica para modelo de menor ECM.....	64
Figura 6.3: Comparación entre la salida real y la estimada para modelo de menor ECM.....	65
Figura 6.4: Error de estimación para modelo de menor ECM.....	66
Figura 6.5: Autocorrelación del error de estimación para modelo de menor ECM.....	67
Figura 6.6: Análisis parámetro v/d determinante para modelo de menor ECM.....	68
Figura 6.7: Evolución del determinante de $\Phi^T \Phi$ para modelo de menor varianza general.....	69
Figura 6.8: Evolución de la estimación paramétrica para modelo de menor varianza general.....	70
Figura 6.9: Comparación entre la salida real y la estimada para modelo de menor varianza general.....	71
Figura 6.10: Error de estimación para modelo de menor varianza general.....	72
Figura 6.11: Autocorrelación del error de estimación para modelo de menor varianza general.....	73
Figura 6.12: Análisis parámetro v/s determinante para modelo de menor varianza general.....	74
Figura 6.13: Evolución del determinante de $\Phi^T \Phi$ para modelo de mejor relacion ECM/varianza...75	75
Figura 6.14: Evolución de la estimación paramétrica para modelo de mejor relacion ECM/varianza.....	76
Figura 6.15: Comparación entre la salida real y la estimada para modelo de mejor relacion ECM/varianza.....	77
Figura 6.16: Error de estimación para modelo de mejor relacion ECM/varianza.....	78
Figura 6.17: Autocorrelación del error de estimación para modelo de mejor relacion ECM/varianza.....	79
Figura 6.18: Análisis parámetro v/s determinante para modelo de mejor relacion ECM/varianza...80	80

Nomenclatura

Matrices

Φ : matriz de regresores del sistema de orden $m \times d$.

Vectores

θ : vector de d parámetros del sistema, $\theta = [\theta_1 \theta_2 \dots \theta_d]^T$

Y : vector de m muestras de salida, $Y = [y_1 y_2 \dots y_m]^T$

\hat{Y} : vector de m muestras estimadas de salida $\hat{Y} = [\hat{y}_1 \hat{y}_2 \dots \hat{y}_m]^T$

U : vector de m muestras de entrada, $U = [u_1 u_2 \dots u_m]^T$

V : vector de m muestras de ruido, $V = [v_1 v_2 \dots v_m]^T$

Escalares

$V_n(\theta)$: función de pérdidas asociado a θ

$A(q^{-1})$: polinomio autoregresivo, $A(q^{-1}) = 1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_{n_a} q^{-n_a}$

n_a : orden de $A(q^{-1})$

a_{n_a} : n_a -ésimo coeficiente de $A(q^{-1})$

$B(q^{-1})$: polinomio exógenos, $B(q^{-1}) = b_1 q^{-1} + \dots + b_{n_b} q^{-n_b}$

n_b : orden de $B(q^{-1})$

b_{n_b} : n_b -ésimo coeficiente de $B(q^{-1})$

$C(q^{-1})$: polinomio de media móvil, $C(q^{-1}) = 1 + c_1 q^{-1} + \dots + c_{n_c} q^{-n_c}$

c_{n_c} : n_c -ésimo coeficiente de $C(q^{-1})$

M : masa

\dot{m} : flujo másico

c : calor específico

cp : calor específico del aire

T : temperatura

Q : flujo de calor

h : coeficiente de transferencia de calor

A : área

V : volumen

\dot{v}, q : flujo volumétrico o caudal

ρ : densidad

W : humedad

R : resistencia a la transferencia térmica

ε : eficiencia en la transferencia de calor

C : capacidad calorífica

$var(x)$: varianza del vector x

ρ_{xy} : correlación cruzada entre las señales x e y

T_0 : tiempo de muestreo

T_d : tiempo de retardo de la entrada

\bar{x} : promedio del conjunto x

$\|x\|$: norma del vector x .



Abreviaciones

Mayúsculas

ECM	: Error cuadrático medio.
CPU	: Unidad central de procesamiento.
MPI	: Interfaz de paso de mensajes.
HVAC	: Sistema de calefacción, ventilación y aire acondicionado.
UTA	: Unidad de tratamiento de aire.
SP	: Set-point.
ARX	: Modelo autoregresivo con variables exógenas.
ARMAX	: Modelo autoregresivo de media móvil con variables exógenas.
BJ.	: Modelo Box-Jenkins.
ARIMA	: Modelo autoregresivo integrado de media móvil.
HR	: Humedad relativa.



Capítulo 1. Introducción

1.1. Introducción General

A lo largo de la historia el hombre ha intentado hacer modelos que representen de mejor manera un determinado sistema, con el fin de analizar su comportamiento y estabilidad para mejorar sus diseños y funcionalidad. Hacer eso es muy importante al momento de trabajar con sistemas automatizados, sobre todo cuando éstos se hacen cada día más complejos y flexibles, así como más exigentes en términos de precisión, pues se evita potenciales riesgos de los cuales lamentar.

Para llevar eso a cabo existen diversos métodos y herramientas de simulación con los cuales uno puede obtener los parámetros necesarios para modelar el sistema y así chequear la forma en que se comporta ante determinados eventos, determinar la relación existente entre las entradas, las salidas y las variables de estado presentes, determinar su estabilidad, etc. Todo ello es de suma importancia al momento de implementar la mejor estrategia de control para dicho sistema.

Podemos afirmar que la moderna simulación nace en épocas de la II Guerra Mundial y la Guerra Fría^[7], donde el uso del ordenador permitió resolver la problemática de la logística, estrategias de combate, uso efectivo de las armas, etc. En esta última década, el uso de la simulación ha resultado ser un medio indispensable en la experimentación, entendimiento y diseño de sistemas industriales, la cual está presente en casi todas las aplicaciones científicas. Entre sus ventajas podemos mencionar:

- Permiten analizar problemas complejos basados en datos históricos para los que no están disponibles resultados fenomenológicos.
- Como con cualquier forma de simulación, la simulación por computadora permite que quien tome una decisión experimente con muchas políticas y argumentos diferentes sin cambiar o experimentar realmente con el sistema existente real.
- La simulación por computadora permite escalamiento en el tiempo. En procesos donde su dinámica tarda días o meses, su simulación podría solo tardar unos cuantos minutos, mejorando así la toma de decisión.

Uno de los inconvenientes más grandes que se presentan es que el campo de la simulación requiere un enorme poder de cálculo y una entrega de resultados en un período de tiempo aceptable, En otras palabras, todo ello se traduce en un enorme costo de recursos humanos que es necesario evitar. Por otra parte, el desempeño de los microprocesadores se ha incrementado en un promedio de

un 50% por año entre 1986 y 2002, una cifra que se ha visto considerablemente reducida desde 2002 en adelante (un incremento del rendimiento de un 20% por año)^[1]. Desde ese entonces los mayores fabricantes de procesadores han elegido una nueva ruta a seguir para incrementar el desempeño de sus microprocesadores: la paralelización.

La simulación paralela, así como la programación distribuida se presenta como una herramienta útil para dar respuesta a problemas determinados utilizando sistemas de cómputo distribuido con el menor costo computacional posible.

En este trabajo se procede a aplicar las ventajas que ofrece la paralelización en la obtención de un modelo para un sistema de tratamiento de aire dentro de una sala quirúrgica, con el fin de implementar a largo plazo un sistema de control de temperatura.

1.2. Trabajos previos

A continuación se mostrarán los trabajos previos de donde se obtuvo el mayor aporte para este trabajo:

- ♣ Parallel Computing Toolbox™ User's Guide.
http://www.mathworks.com/help/pdf_doc/distcomp/distcomp.pdf

Se trata de una guía de usuario con una información robusta y detallada sobre el uso de *Parallel Computing Toolbox* de MATLAB. Incluye las funciones más relevantes, información acerca de la creación de clusters, etc.

- ♣ Parallel Computing Toolbox – Videos & examples.
<http://www.mathworks.com/videos/series/parallel-and-gpu-computing-tutorials-97719.html>

Aquí se presentan videos tutoriales que ayudan a complementar con más claridad lo descrito en la bibliografía anterior.

- ♣ C. Mancilla, “*Estudio comparativo de unidades de tratamiento de aire para quirófanos con mezcla versus intercambiador de calor sujeto a control experto*”, Memoria de Título, Ingeniero Civil Electrónico, Abril 2014, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción.

Esta tesis entrega información valiosa respecto al funcionamiento de un sistema de tratamiento de aire usado en quirófanos, así como las ecuaciones dinámicas que representan el modelo del sistema.

- ♣ J. Segovia, “*Estudio de un modelo predictivo de la calidad del arrabio en el alto horno n°2 de Huachipato y su utilización en control*”, Memoria de Título, Ingeniero Civil Electrónico,

Diciembre 1988, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción.

En el capítulo 2 de dicho informe, se presenta la forma en que se puede identificar cuál variable afecta a cual por medio de la correlación cruzada, así como la información que puede entregar en relación al sistema en estudio.

- ♣ C Torregrosa, “*Simulación Paralela para Múltiples Modelos de Parámetros Distribuidos*”, Memoria de Título, Ingeniero Civil Electrónico, Junio 2010, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción.

Aquí se profundiza en el concepto de programación paralela y detalla el funcionamiento de MATLAB “*Parallel Computing Toolbox*”. Además muestra la forma en que se distribuyen las tareas (las cuales son las que se usan para el modelado de una planta de decantación por corriente), así como la forma en que se comunican los procesadores para determinados instantes de la ejecución.

- ♣ F. Mesa, “*Diseño de herramientas de software para datos*”, Memoria de Título, Ingeniero Civil Electrónico, Marzo 2011, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción.

Parte del algoritmo general usado en esta tesis para la identificación paramétrica del proceso de chancado y molienda SAG (Semiautógeno) y que se describe en el capítulo 4 de la misma se usó como base para el algoritmo general usado en esta tesis, la cual se describirá más adelante.

1.3. Hipótesis de trabajo

Es posible reducir el tiempo de obtención de un modelo analítico adecuado, mediante la paralelización de las combinatorias de factores que intervienen en la estructura y cantidad de parámetros.

1.4. Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Desarrollar e implementar algoritmos de solución al problema de identificación estructural y paramétrica para series de tiempo, mediante técnicas de selección intensiva de datos utilizando una combinación de estructuras hipergeométricas. Analizar y evaluar la aplicación en la minimización de recursos humanos.

1.4.2 Objetivos específicos

- Desarrollar técnicas de programación paralela que permitan automatizar la obtención y evaluación de los resultados del proceso de identificación estructural y paramétrica.

1.5. Alcances y limitaciones

- Desarrollar técnicas de identificación fuera de línea y aplicando técnicas de procesamiento paralelo disponibles en MATLAB Parallel.



Capítulo 2. Programación Paralela

2.1. Introducción

Es sabido que la simulación intenta replicar lo más fielmente posible el comportamiento dinámico de un sistema real, con el fin de mejorar diseños, evaluar comportamientos y desempeño de procesos dinámicos. Muchas veces cuando no existe un modelo validado como solución aparece la simplificación del orden, pero esto implica la pérdida de la fidelidad del mismo al sistema real.

Existe otra solución que es dedicar más recursos. Por ejemplo, usar un multiprocesador para acelerar la modelación. Pero con ello surge otra interrogante: ¿cómo asignar estos recursos y qué condiciones deben cumplirse para hacerlo?

A continuación se realizará una descripción de qué es la simulación paralela, sus ventajas y limitaciones así como la metodología de cómo identificar metodologías paralelizables en un sistema. También se describirá la herramienta de trabajo *Parallel Computing Toolbox* de MATLAB, la cual será la herramienta para este trabajo.

2.2. Simulación paralela

Históricamente se han desarrollado programas de simulación mediante el uso de programas de cálculo serial y funcionar en computadores con un solo procesador. Es decir, el problema es dividido en un conjunto de instrucciones que son ejecutadas secuencialmente y una a la vez.

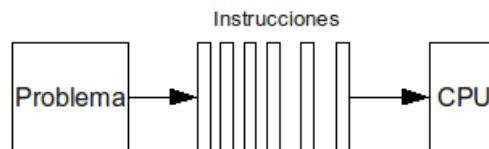


Figura 2.1: Cálculo serial

Esta forma de programación presenta la ventaja de ser intuitivamente más comprensible y permitir al programador una fácil depuración en caso de fallas o cambios en las rutinas programadas, donde los resultados estarán disponibles dependiendo de la velocidad del procesador con que se trabaje.^[7]

A principios de esta última década, diseñadores de microprocesadores han buscado incrementar el desempeño de estos empujando su frecuencia de reloj (hz) al máximo. Pero las limitantes físicas como el alto consumo eléctrico y disipación de calor han desencadenado una decisión crucial en la industria, escalar el desempeño mediante el uso de múltiples núcleos.

En la actualidad, la gran masificación de los procesadores multinúcleo y de las redes de ordenadores han potenciado la difusión de la programación paralela. La comunidad "TOP 500" [8], ha realizado una estadística de usuarios que dan uso a la programación paralela. El siguiente grafico resume las distintas áreas de interés en este tipo de programación [9][7]:

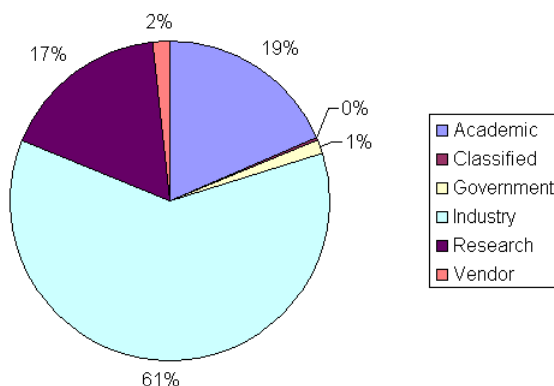


Figura 2.2: Sectores de interés

Como se puede observar, la industria da un gran uso del procesamiento paralelo para simular una planta, debido a que su operación está compuesta de una gran número de procesos los cuales trabajan de forma paralela y se comunican entre sí, generando las siguientes ventajas:

- Mayor velocidad de ejecución.
- Buena relación costo/prestaciones.
- Permite atacar problemas considerados irresolubles.
- Aprovecha al máximo el trabajo de los procesadores multinúcleo.

2.2.1 ¿Qué es el cálculo paralelo?

El cálculo paralelo consiste en usar múltiples recursos simultáneamente para resolver un problema dado. Esto se logra a través de ordenadores con múltiples CPUs, donde el problema es dividido en partes independientes y cada parte comprende un conjunto de instrucciones las cuales son ejecutadas secuencialmente y resueltas simultáneamente.

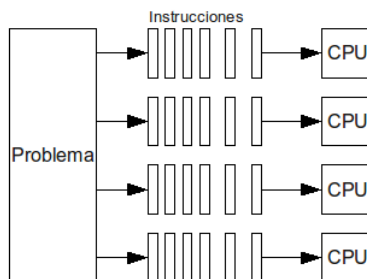


Figura 2.3: Cálculo paralelo

Cabe destacar que aun con procesos trabajados paralelamente, los resultados de dichos procesos deben ser compartidos, comúnmente por medio de la memoria. De acuerdo a la forma de distribuir la memoria los ordenadores paralelos se clasifican en 2 tipos:

2.2.2 Tipos de ordenadores paralelos

- **Ordenadores de memoria compartida:**
 - Los procesadores interactúan modificando datos en espacio de direcciones compartido.
 - Cambios en la memoria son visibles por todas las CPUs.
 - Hay principalmente dos tipos de configuraciones: UMA (Intel Xeon) y NUMA (AMD Opteron).
 - Estándar de comunicación: OpenMP.
- **Ordenadores de memoria distribuida:**
 - Cada CPU tiene su propia memoria local.
 - La memoria local de una CPU no es visible por las demás CPUs
 - La información es compartida entre CPUs por una red.
 - Interacción vía paso de mensajes.
 - Estándar de comunicación: MPI.

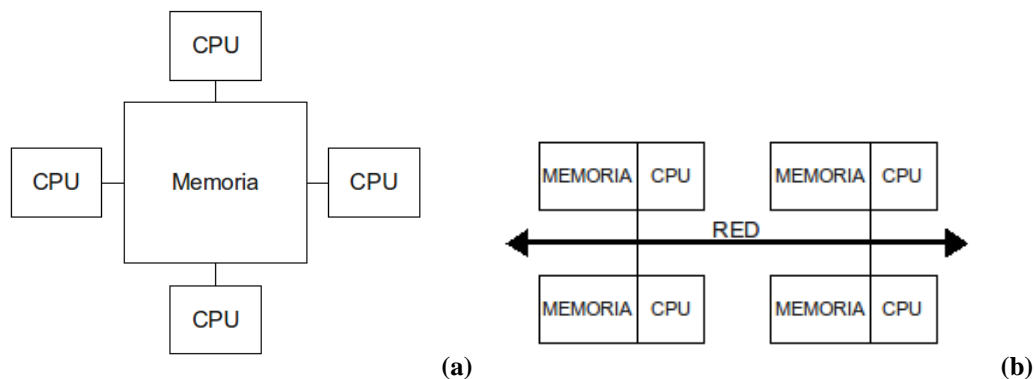


Figura 2.4: Tipos de ordenadores paralelos:
 (a) Memoria compartida, (b) Distribuida

Entre las ventajas y desventajas que presenta cada una de estas arquitecturas están las siguientes:^[7]

TABLA 2.2 Ventajas y desventajas de las memorias compartida y distribuida.

Memoria Compartida		Memoria distribuida	
Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas
Fácil de programar conceptualmente	Escalabilidad de memoria y CPUs nula	Buena escalabilidad de memoria y CPUs	El programador es responsable de las comunicaciones
Más fácil y más rápido a la hora de compartir datos	Altos costos en hacer ordenadores con muchas CPUs	El costo es lineal con el número de CPUs	La red de comunicaciones suele ser un cuello de botella

2.2.3 Conceptos de programación paralela

Algunos conceptos asociados a la programación paralela son:^[7]

- **Programa:** Solución general del modelo a simular y está compuesta por el conjunto de tareas a procesar y las instrucciones que permiten la distribución, sincronización y comunicación de ellas.
- **Tarea:** Corresponde al conjunto de instrucciones que procesan una parte específica del sistema a simular.
- **Sincronización:** Es la coordinación de las distintas tareas y a menudo se asocia como el momento donde las tareas se comunican.
- **Comunicación:** Acción de enviar y recibir datos entre tareas.
- **Latencia de comunicación:** Tiempo requerido por la red de comunicaciones en iniciar el envío de datos.

- **Ancho de banda:** Cantidad de datos que puede transferir la red.
- **Parallel overhead:** Es el sobrecosto debido la ejecución paralela de un programa. Esto está dado por el tiempo requerido para que una tarea se inicie, se sincronice y comunique con otras tareas y su posterior destrucción.

2.3. Limitaciones de la programación paralela:

Si bien la paralelización presenta sus ventajas, también presenta ciertas limitaciones o desventajas como:^[7]

- **Herramienta de paralelización:** Si bien se cuenta con un equipo compuesto por múltiples unidades de proceso, el software encargado de la sincronización, distribución y comunicación de estos aún no ha sido muy difundido y la aplicación de algunos de ellos no es trivial. En general el programador está encargado de sincronizar los procesadores así como la comunicación de estos. También presentan graves problemas en la identificación de errores ya que los depuradores no realizan un seguimiento de la información entre procesadores.
- **Parallel overhead:** Si la aplicación apunta a simular un proceso en tiempo real, con tiempos críticos muy estrechos, el parallel overhead presenta ser un obstáculo en la paralelización. Esto último conlleva a que el programador debe tener un conocimiento pleno del proceso a simular a fin de decidir si su uso es factible o no.

2.4. Metodología de diseño de algoritmos paralelos

En esta sección se describe básicamente la solución a la problemática del cómo descomponer el código con el cual trabajar en tareas, así como la asignación de recursos:

2.4.1 Descomposición de tareas

A la hora de descomponer las tareas, hay que considerar que al menos un par de ellas sea independiente, ya que el paralelismo se aprovecha mucho más cuanto más independientes sean las tareas entre sí. De otro modo no ofrecería ventaja alguna.

Una buena forma consiste en identificar su composición. Se identifican 2 tipos de modelos:^[7]

- **Modelo de subprocesos distribuidos:** Modelo que presenta un único proceso compuesto por múltiples procesos distintos. El proceso P descrito en la figura 2.5 (A) se divide en varios subprocesos distintos, y cada uno es evaluado como tarea a medida que hay recursos disponibles.

- **Modelo de procesos balanceados:** Modelo compuesto por múltiples procesos de similar carga. Aquí los procesos P1 y P2 descritos en la figura 2.5 (B) se evalúan directamente como tareas.

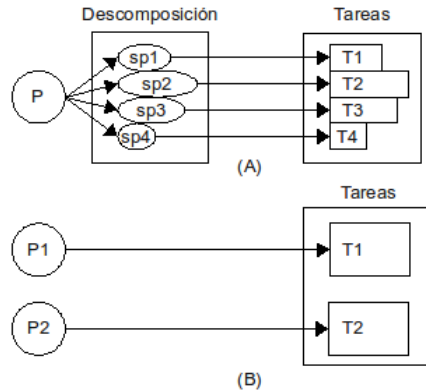


Figura 2.5: Descomposición del modelo: (A) distribuido (B) Balanceado

Durante la descomposición de tareas se debe tener en cuenta la arquitectura con la que se trabaja a fin de cuantificar los tiempos de comunicación entre cada tarea. De lo anterior nace el concepto de granularidad, la cual es una medida cualitativa del cociente entre el tiempo dedicado a la computación y el tiempo dedicado a la comunicación. Se identifican dos tipos.^[7]

- **Granularidad fina:** La descomposición genera un número elevado de pequeñas tareas aumentando la comunicación entre ellas.
- **Granularidad gruesa:** Se obtienen pocas tareas de gran tamaño, minimizando la comunicación entre ellas.

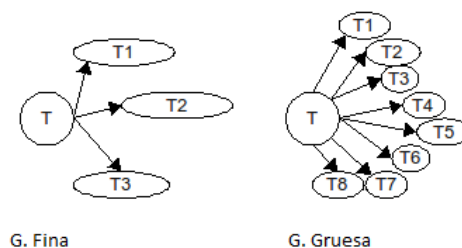


Figura 2.6: Tipos de Granularidad

2.4.2 Asignación de tareas

Una vez realizada la descomposición, se procede a asignar las tareas a cada CPU disponible. Primero se procede a evaluar la dependencia entre cada tarea.

En la figura 2.7, puede verse que las tareas T2, T3 y T4 dependen de la tarea T1. Sin embargo, como puede verse también en la figura, tanto T2 como T3 son independientes entre sí. Por

lo tanto primero se procede a ejecutar T1, luego se ejecutan T2 y T3 de forma paralela, y al final, se procede a evaluar T4, ya que ésta depende de las tareas anteriores.^[7]

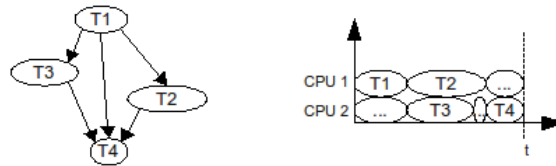


Figura 2.7: Asignación de objetos

La clave para desarrollar una buena estrategia de asignación es:

- Maximizar la concurrencia, asignando tareas independientes a diferentes procesadores de forma equilibrada.
- Asignar tareas que interactúen mucho a un mismo procesador.
- Evitar fuentes de ociosidad producto del desequilibrio de carga.

Luego se elige el esquema de asignación, dependiendo de la descomposición de tareas realizada:^[7]

- **Asignación estática o trabajo paralelo:** Este esquema es utilizado cuando se tiene un número n de tareas similares en requerimiento de cómputo las cuales son asignadas a n -procesadores. Su aplicación permite la comunicación entre tareas.
- **Asignación dinámica o trabajo distribuido:** Este esquema realiza un reparto del trabajo computacional entre los procesos en ejecución. Este esquema es utilizado cuando las tareas se generan dinámicamente y su tamaño es desconocido. En general no se permite la comunicación de tareas entre procesos.

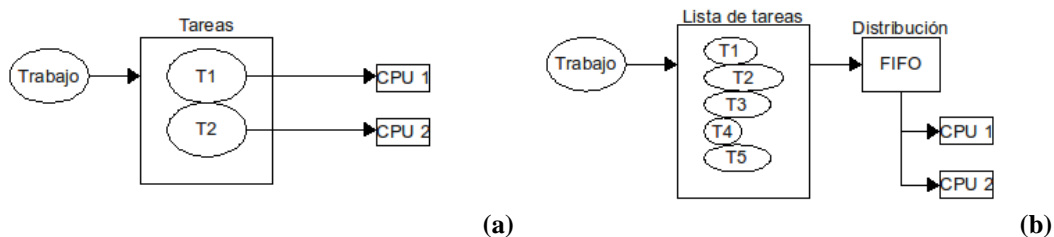


Figura 2.8: Tipos de asignación de tareas. (a) Estática (b) Dinámica

2.5. Matlab Parallel Computing Toolbox

La herramienta que se usará para la realización de este trabajo es el *Parallel Computing Toolbox* de MATLAB. Dicha herramienta, nacida en 2004 permite resolver problemas

computacionales y de alta calidad de data utilizando procesadores múltiples, GPUs, y clústers computacionales.

Dispone de instrucciones especiales como “parfor” (ciclos for paralelos), “spmd”, tipos especiales de arrays y algoritmos numéricos paralelizados. Con estas instrucciones es posible realizar en MATLAB la paralelización de forma simple y transparente, y todo eso sin la necesidad de variar profundamente el código existente. También están disponibles instrucciones más avanzadas en caso de que se presente una mayor complejidad del modelo y restricciones en el tiempo.

Parallel Computing Toolbox permite la ejecución de aplicaciones en varios procesadores que corren localmente. Sin cambiar el código, pueden correrse las mismas aplicaciones en un clúster o en un grid, por medio de *MATLAB Distributed Computing Server*TM (en otras palabras, permite formar una red mediante maquinas remotas).^[10]

En síntesis, esta herramienta permite coordinar y ejecutar secciones independientes de MATLAB simultáneamente en un conjunto de procesadores, acelerando el trabajo a realizar. Este *trabajo* es dividido en segmentos llamados *tareas* o “*tasks*” (según lo requerido en el problema). El *cliente* corresponde a la maquina donde se programa *Matlab* y es quien define el *trabajo* a realizar. El *programa o rutina de trabajo* es el motor que coordina la ejecución del *trabajo* y se encarga de distribuir las diferentes *tareas* en las distintas secciones de *Matlab*, llamadas *trabajadores* o “*workers*”. Una vez terminadas todas las *tareas*, el *programa* entrega los *resultados* al *cliente* para su posterior manipulación y conclusión.^[7]

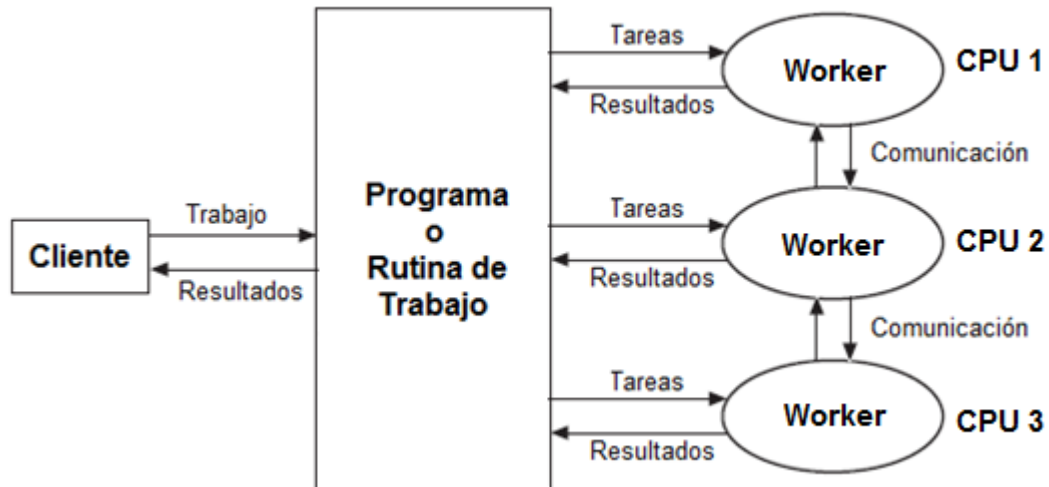


Figura 2.9: Diagrama cliente-worker

Capítulo 3. Descripción del problema

3.1. Introducción

El objetivo principal consiste en identificar el modelo que más se asemeje a un sistema de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC), empleando las ventajas que ofrece la programación paralela.

Para ello es fundamental conocer primero cómo funciona un HVAC, qué elementos lo componen y las ecuaciones que lo representan, entre otras cosas de vital importancia.

3.2. Descripción General

Los sistemas HVAC son los encargados de la realización del acondicionamiento de aire, necesario para mantener los valores de humedad, temperatura y limpieza del aire de una zona térmica dada. El principal componente de los sistemas HVAC son las denominadas UTA (unidad de tratamiento de aire).

Las UTA permiten variar la temperatura, humidificar y filtrar el aire a través de baterías de frío, calor y vapor. Además posee una serie de filtros para mejorar la pureza del aire circulante. A su vez vienen equipados con reguladores de flujo, cajas de mezcla de aire y recuperadores de energía, entre otros componentes.

Por sí mismos las UTA no producen calor ni frío ya que éstos se generan externamente por medio de calderas o de máquinas frigoríficas, por tuberías de agua o gas refrigerante. Pueden las UTA no obstante hacer aportes de calor mediante una serie de intercambiadores presentes en su interior.^[2]

3.2.1 Tipos de HVAC

Existen 2 tipos principales de HVAC: los que funcionan con un cajón de mezcla y aquellos que utilizan un intercambiador de calor^[2]. En este trabajo se emplearán los datos tomados de un sistema HVAC con intercambiador de calor.



(a)



(b)

Figura 3.1: Visiones externas de una unidad de tratamiento de aire con intercambiador de calor.

(a) Vista salida de aire + baterías de frío y calor.

(b) Vista entrada de aire + intercambiador de calor

- **Sistema UTA con intercambiador de calor:** En una UTA con intercambiador de calor el aire entra a través de la rejilla de aire ambiental de entrada gracias al ventilador impulsor de aire tratado, el aire de retorno es expulsado y fluye a través del intercambiador con ayuda de

un ventilador encargado de extraer el aire proveniente de la zona térmica. El fluido de entrada absorberá o cederá calor dependiendo de su temperatura, y seguirá su curso a través del filtro y las baterías de frío, calor y vapor [2].

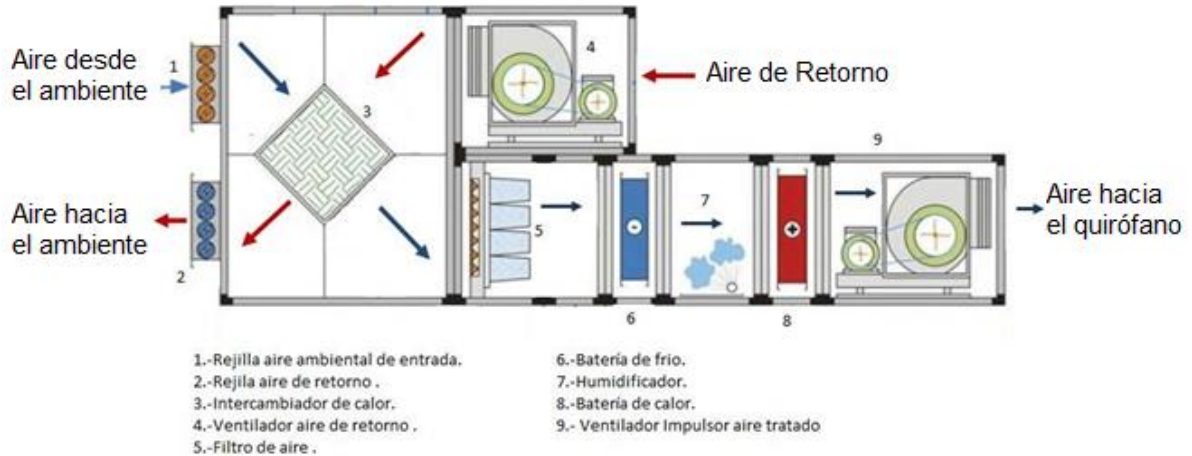


Figura 3.2: Diagrama UTA con recuperador de calor

- Sistemas UTA con caja mezcladora:** Aquí el aire exterior ingresa a través de la rejilla de entrada con ayuda del ventilador extractor de aire ambiental. En ese mismo instante el ventilador extractor de aire de retorno impulsa el aire hacia la caja de mezcla, lugar en el cual el dámper deja pasar una cierta cantidad de aire, mientras que el restante es expulsado por la rejilla de salida hacia el exterior. Es así como se mezcla el aire de retorno con el ambiental pasando a través del filtro de eliminación de bacterias y partículas en suspensión. Posteriormente pasa a través de las baterías de frío, calor y vapor, las cuales actúan dependiendo de la temperatura y el grado de humedad del aire [2].

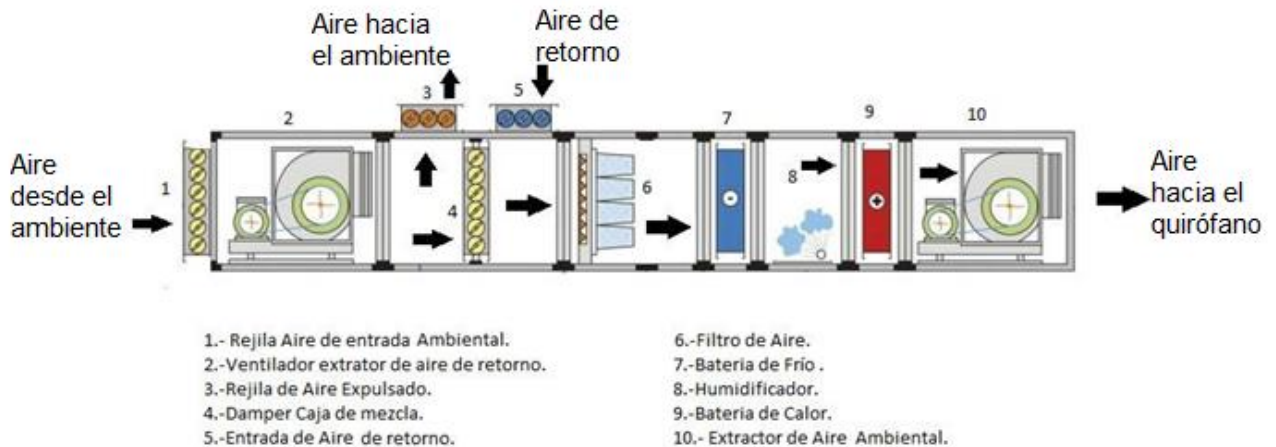


Figura 3.3: Diagrama UTA con caja de mezcla de aire.

3.2.2 Entrada de aire UTA

Existen 2 formas en las que puede entrar el aire que es tratado en el climatizador, dependiendo del tipo de elemento que presente la UTA:

- **Aire exterior:** Para que el sistema cumpla con una de las condiciones de climatización, sabemos que es necesaria la renovación de aire, para asegurar que el aire dentro de la zona térmica, se encuentre con una mínima cantidad de gases o partículas en suspensión. La unidad climatizadora posee extractores de aire externos para cumplir con dicha condición ^[2].
- **Aire mezclado:** El aire proveniente del exterior, requiere de una mayor o menor cantidad de energía térmica en el caso de que se quiera aumentar o disminuir la temperatura; y una mayor cantidad de vapor dependiendo de las condiciones climáticas externas. El aire ya tratado en la zona térmica requiere menor cantidad ya sea de acción de frío, calor y vapor, en comparación con el aire externo. Por ende el climatizador toma aire de los conductos de retorno y lo mezcla con el aire de ventilación (aire primario), tratando conjuntamente la mezcla antes de introducirlo en la zona térmica. Cabe destacar, que para mezclar las masas de aire, hay una cámara o caja de mezcla en la que por medio de compuertas motorizadas, se dejan pasar caudales adecuados de uno y otro, conforme a las exigencias de caudal de aire de ventilación, a las condiciones del aire de retorno, y a las necesidades de las salas que requieren regulación. No siempre se utiliza esta mezcla de aire, y es aquí donde nace una de las grandes problemáticas que será abordada en la propuesta de control: la relación utilizada de aire recirculante y exterior. A priori ya se puede vislumbrar que la relación de estas variables es de vital importancia en la acción de control. Otro punto a destacar es que a veces en la aplicación de la mezcla de aire hay que tener sumo cuidado, pues el aire recirculado puede no estar en adecuadas condiciones, ya sea por olor o bacterias presentes en el aire ^[2].

3.2.3 Componentes de una UTA

En una UTA se pueden encontrar diferentes elementos entre los cuales cabe destacar los siguientes:

^[2]

- **Batería de filtros:** los filtros de aire retienen las partículas en suspensión mejorando la calidad de aire a impulsar. El tipo de filtro varía conforme sean las exigencias de pureza. Un ejemplo de esto es la diferencia existente entre el aire que circula por un edificio compuesto por oficinas, y el caso de una sala de urgencias en el hospital. Este último caso requiere de una mayor exigencia en el filtrado del aire, pues no solo se limpia el aire de partículas de

diversos tamaños, sino que también se eliminan microorganismos especiales a través de filtros electrostáticos y de carbón activo para la eliminación de olores.

- **Baterías de frío y calor:** están compuestas por serpentines a través de los cuales circula agua. El agua helada se obtiene en una enfriadora de agua que circula un refrigerante en un evaporador de placa o doble tubo, enfriando el agua hasta una temperatura apta para el proceso. El agua caliente, por su parte, circula por un serpentín de calor suministrado desde una caldera.
- **Control de la humedad:** el control de la humedad en verano se hace en la batería de refrigeración, en cuyas aletas condensa el exceso de vapor de agua, pero en invierno es necesario un humificador, o humectador, que puede ser de varios tipos (placas, membrana, entre otros) y siempre, un separador de gotas, que impide que el agua condensada o del humificador en forma de gotas, entre en el circuito de distribución. Estos dispositivos requieren una bandeja de recogida de agua condensada y el humificador de un suministro de agua limpia.
- **Intercambiador de Calor:** existen de diversos tipos: flujo cruzado con mezcla de aire, flujo cruzado sin contacto entre lo que ingresa y sale de la UTA, flujo paralelo, entre otros. Su función es la de nivelar la temperatura del aire entrante con la que se encuentra saliendo de la unidad de tratamiento de aire, es decir, su función es aportar o disminuir calor sensible dependiendo de la temperatura con la que sale el fluido. El aire fluye a través de la estructura a través de convección forzada, el fluido que está saliendo traspasa su energía a través de convección hacia las paredes, y luego esta energía es transferida por contacto y convección a la masa entrante. La eficiencia de este tipo de intercambiadores en general es bastante baja, siendo la de flujo cruzado una de las que posee mayores eficiencias. Pueden alcanzar porcentajes que bordean el 77% en el mejor de los casos para instalaciones de gran calidad, pero las más comúnmente utilizadas se encuentran alrededor de un 42%.
- **Ventilador:** es el elemento mecánico incorporado en la UTA, para generar el caudal necesario y alcanzar la presión estática para hacer circular el aire dentro de los conductos de la red de tuberías.

3.2.4 Descripción del Intercambiador de Calor

Dado que se trabaja con una UTA con intercambiador de calor y no con caja mezcladora, a continuación se describirá con más detalle el funcionamiento de este elemento. Como detalle el intercambiador usado es del tipo flujo cruzado:

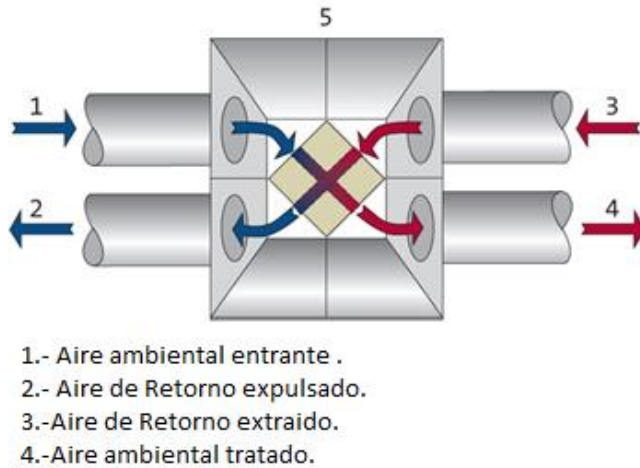
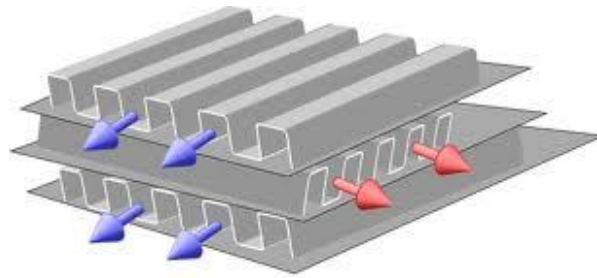


Figura 3.4: Intercambiador de flujo cruzado

En los intercambiadores de calor los fluidos pueden circular en direcciones ortogonales o perpendiculares entre sí, de tal forma que el flujo caliente y el flujo frío se cruzan.

El flujo cruzado se clasifica en mezclado (uno de los fluidos fluye libremente en dirección ortogonal al otro sin restricciones) y en no mezclado (se disponen unas placas para guiar el flujo de uno de los fluidos).

Tal y como se observa en la figura 2.4, el recorrido del aire a través de la estructura, en donde el aire entrante en 1 entregará (proceso de enfriar) o recibirá energía (calentamiento del aire), dependiendo de la temperatura de salida y entrada del aire en 1 y en 3.



Cross Flow

Figura 3.5: Estructura interna de un intercambiador de calor de flujo cruzado

En un intercambiador de flujo cruzado se busca la máxima cantidad de área de transferencia de calor, mediante la utilización de placas intercaladas entre las cuales circula el aire ambiental y el de retorno. El área de transferencia se ve aumentada, pues el intercambio se produce en la parte inferior y superior a través de la cual circula el aire.

3.3. Modelación fenomenológica

Como se mencionó anteriormente, interesa solamente el proceso en un UTA con intercambiador de calor, pues de ese tipo es el que se utiliza en el hospital. A continuación se presentarán las ecuaciones que modelan lo más fielmente posible al sistema en estudio.

Dada el alto costo que implica realizar pruebas en una planta real, es necesaria una simulación total de lo que acontece en el interior de la unidad climatizadora y en la zona térmica.

El modelo se realiza mediante transferencias de energía y humedad en la zona térmica. Estas transferencias de energía incluyen tanto la energía proveniente de las personas como de instrumentos, paredes, filtraciones y el aire proveniente de la UTA.

El modelo se crea para la zona térmica. Sin embargo, si se quiere un sistema físico más acercado a la realidad, es altamente requerido incluir ecuaciones físicas que involucren transferencias de energía en el interior de la UTA. Aquí se involucran intercambios de energía entre el aire circulante dentro de la UTA, y el agua circulante por los serpentines de las baterías que posee la unidad climatizadora.

En la siguiente figura se ilustra el modelo que se desea simular, considerando las componentes más importantes que han sido enunciados anteriormente.

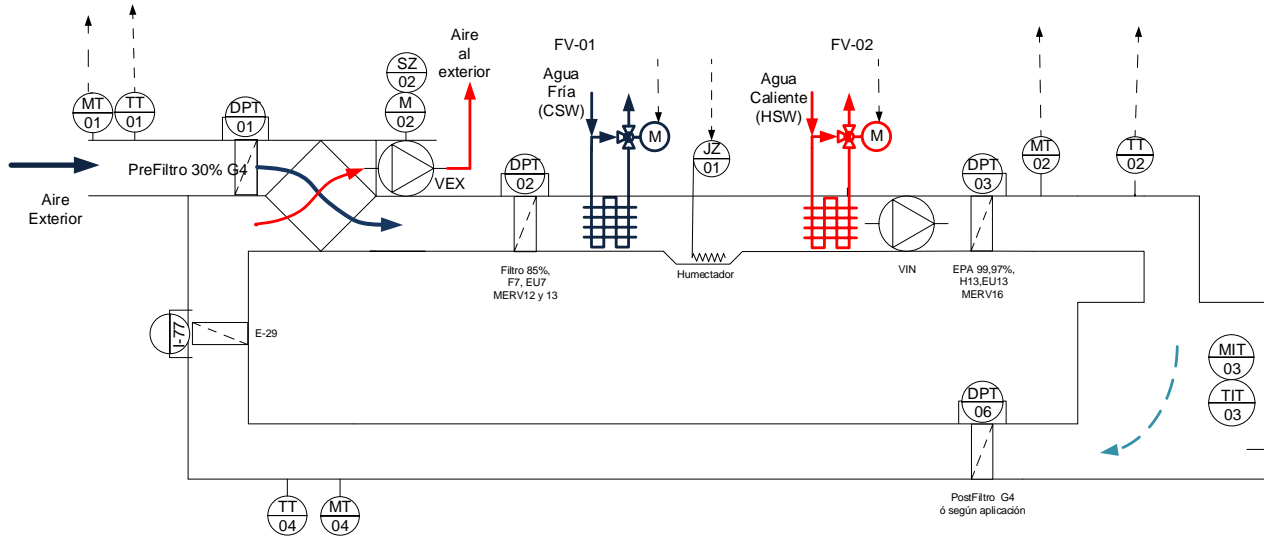


Figura 3.6: Esquema de la planta a simular con intercambiador de calor

3.3.1 Ecuaciones Dinámicas Zona térmica

Balance de energía del aire en la zona térmica:

El balance de energía en esta zona considera las transferencias de calor energético de la habitación. La capacidad calorífica de la masa de aire, está dada por la suma de los flujos de calor entre el aire y los muros, el entregado por la UTA, las infiltraciones de calor en la sala, y lo aportado por las personas y equipos médicos presentes en la zona térmica. [2]

Luego las ecuaciones están dadas por:

$$M_a cp \frac{dT_a}{dt} = Q_m + Q_{HVAC} + Q_{inf} + Q_G \quad (3.1)$$

Donde M_a es la masa del aire dentro de la sala, cp equivale al calor específico del aire, T_a representa la temperatura del aire dentro de la sala, Q_m representa el flujo de calor convectivo entre el movimiento del aire con la superficie de los muros de la sala, incluyendo el piso y el techo, Q_m representa el flujo de calor dado por el aire de impulsión del sistema de climatización, Q_{inf} es el flujo de calor dado por las infiltraciones de aire exterior o anexo a la sala, y Q_G es el flujo de calor aportado por cada persona y/o equipo presente en la sala. [3] Respectivamente, cada uno de tres primeros términos es:

$$Q_m = \sum_{mi=1}^m h_{mi} A_{mi} (T_{mi} - T_a) \quad (3.2)$$

$$Q_{HVAC} = \dot{m}_s cp (T_s - T_a) \quad (3.3)$$

$$Q_{inf} = \dot{m}_{inf} cp (T_{ext} - T_a) \quad (3.4)$$

Donde h_{mi} es el coeficiente de transferencia de calor convectivo del muro i , A_{mi} es el área del muro i , \dot{m}_s es el flujo másico impulsado por la HVAC, \dot{m}_{inf} es el flujo másico infiltrado a la

sala, T_{mi} es la temperatura del muro i , T_s es la temperatura del aire de impulsión y T_{ext} es la temperatura del aire de infiltración [3].

Dicho esto, la ecuación 2.1 se reescribe de la siguiente forma:

$$M_a c_p \frac{dT_a}{dt} = \sum_{mi=1}^m h_{mi} A_{mi} (T_{mi} - T_a) + \dot{m}_s c_p (T_s - T_a) + \dot{m}_{inf} c_p (T_{ext} - T_a) + Q_G \quad (3.5)$$

Cabe destacar que la temperatura de los muros varía en forma dinámica, su entalpía asociada está ligada a los materiales que la componen y a sus dimensiones. [2] Acorde a la información anteriormente proporcionada se tiene que la expresión generalizada de la capacidad calórica de los muros está dada por:

$$M_m c_m \frac{dT_m}{dt} = h_m A_m (T_a - T_m) + \frac{k_m A_m}{e} (T_{ext} - T_m) \quad (3.6)$$

Donde M_m , c_m y k_m son respectivamente la masa, el calor específico y el coeficiente de conducción del muro, mientras que e corresponde al espesor del muro. [3]

Los parámetros c_m y k_m son propios del material del muro, mientras que h_m está dada por las correlaciones de Fisher y Petersen para difusores de superficies con flujo laminar. [2] Dicho esto, los coeficientes de calor de cada muro son:

$$h_{piso} = 3.873 + 0.082 ACH^{0.98} \quad (3.7)$$

$$h_{techo} = 2.234 + 4.099 ACH^{0.503} \quad (3.8)$$

$$h_{muros} = 1.208 + 1.012 ACH^{0.604} \quad (3.9)$$

Donde ACH son los cambios de aire por hora. [2]

Balance de humedad en la zona térmica:

El balance de humedad consiste básicamente en un balance de masas compuesto por las sumatorias de las fuentes de humedad. [2] Cabe destacar que los equipos médicos presentes en la sala, no aportan a la humedad, por lo que no son considerados en este caso.

Las ecuaciones dinámicas que modelan el balance de humedad en la sala son:

$$V_a \rho_a \frac{dW_a}{dt} = M_{HVAC} + M_{inf} + M_G \quad (3.10)$$

$$V_a \rho_a \frac{dW_a}{dt} = \dot{v}_s \rho_a (W_s - W_a) + \dot{v}_{inf} \rho_a (W_{ext} - W_a) + M_G \quad (3.11)$$

Donde V_a es el volumen del aire dentro de la sala (o más bien el volumen del interior de la sala), ρ_a es la densidad del aire, \dot{v}_s y \dot{v}_{inf} son los flujos volumétricos de aire impulsado e infiltrado respectivamente, M_G es la ganancia de humedad por personas, y W_a , W_s y W_{ext} corresponden al valor de la humedad (relación existente entre la masa de vapor de agua y la masa total) del aire de la sala, de impulsión y de infiltración respectivamente [2][3].

Como puede verse, las ecuaciones dinámicas con respecto a la humedad se basan simplemente en un balance de masa, pues la masa total del aire es el producto entre el volumen de aire y la densidad del mismo. Este resultado, multiplicado por W_a , da como resultado simplemente la masa de aire húmedo agregado al sistema.

3.3.2 Ecuaciones dinámicas unidad climatizadora

La construcción del modelo relacionado con la unidad climatizadora obedece a la intención de obtener un sistema que describirá con mayor calidad, lo que realmente ocurre en la realidad de los fenómenos físicos asociados a la temperatura y humedad de la sala que se quieren controlar.

Las ecuaciones presentes a continuación describen las dinámicas de las baterías de frío y calor. La clave es encontrar el factor de transferencia de calor de las baterías; esta constante puede ser global, es decir, describir la totalidad de calor transferida por la batería o encontrar las ganancias individuales asociadas al traspaso de calor del agua al serpentín, y de este al aire de la unidad climatizadora.

Se deduce a partir de las ganancias de la modelación dinámica, que éstas pueden ser generadas a través de dos balances de energía. El primero describe el traspaso de energía calórica del agua a la superficie de la tubería, y finalmente de ésta al aire, como la energía nunca se pierde, la sumatoria de todos los traspasos es igual a cero.

La temperatura del serpentín está sujeta al traspaso de calor de la superficie de la tubería al aire, aquí nace el segundo balance de energía para la superficie del serpentín. ^[2]

Balance de energía del agua de circulación:^[2]

$$M_w c_w \frac{dT_w}{dt} + \dot{m}_w c_w (T_w - T_{w0}) + \frac{1}{R_w} (T_{w0} - T_{serp}) = 0 \quad (3.12)$$

Donde M_w y c_w son la masa y el calor específico del agua respectivamente, \dot{m}_w es el flujo másico del agua que circula por el serpentín, R_w es la resistencia a la transferencia térmica del agua, y las temperaturas T_w , T_{w0} y T_{serp} son las temperaturas del agua, la inicial del agua, y la de la superficie del serpentín.^[3]

Balance de energía en la superficie del serpentín:^[2]

- Seco:

$$M_{serp} c_{serp} \frac{dT_{serp}}{dt} + \frac{1}{R_a} (T_{serp} - T_{a0}) + \frac{1}{R_w} (T_{serp} - T_{w0}) = 0 \quad (3.13)$$

- Húmedo:

$$M_{serp} c_{serp} \frac{dT_{serp'}}{dt} + \frac{1}{R'_a} (h_{sat} - h_{a0}) + \frac{1}{R_w} (T'_{serp} - T_{w0}) = 0 \quad (3.14)$$

Donde M_{serp} y c_{serp} son la masa y el calor específico del serpentín, R_a es la resistencia a la transferencia térmica del aire en estado seco y R'_a es la resistencia a la transferencia térmica del aire en estado húmedo. La variable T_{serp}' representa la temperatura de la superficie del serpentín en estado húmedo.^[3]

Temperatura y humedad de salida del aire:^[2]

- Seco:

$$T_a = T_{a0} + \varepsilon_a (T_{serp} - T_{a0}) \quad (3.15)$$

$$W_a = W_{a0} \quad (3.16)$$

- Húmedo

$$T_a = T_{a0} + \varepsilon'_a (T_{serp} - T_{a0}) \quad (3.17)$$

$$W_a = f(T_a, h_a) \quad (3.18)$$

Donde T_a es la temperatura de salida del aire, T_{a0} es la temperatura de entrada de aire, ε_a y ε'_a son las eficiencias en las transferencias de calor del lado aire en estado seco y húmedo respectivamente, W_a y W_{a0} corresponden a la humedad del aire de salida y de entrada respectivamente, y h_a representa la entalpía del aire de salida, cuya fórmula viene dada por:

$$h_a = h_{a0} + \varepsilon_a^* (h_{sat} - h_{a0}) \quad (3.19)$$

Donde h_{a0} es la entalpía del aire de entrada y h_{sat} es la entalpía del aire saturado, mientras que ε_a^* corresponde a la eficiencia en la transferencia de calor por entalpías del lado aire en estado húmedo.^[3]

3.3.3 Ecuaciones Intercambiador de Calor

La ecuación correspondiente a la temperatura saliente del intercambiador de calor es bastante sencilla: simplemente se calcula de la siguiente manera:

$$T_{cold,out} = T_{cold,in} + \varepsilon \left(\frac{C_{min}}{C_{cold}} (T_{hot,in} - T_{cold,in}) \right) \quad (3.20)$$

Donde $T_{cold,in}$ representa la temperatura del aire que entra a la UTA, y por ende al intercambiador de calor, $T_{cold,out}$ es la temperatura que sale del intercambiador de calor, $T_{hot,in}$ es la temperatura del aire de recirculación proveniente de la zona térmica, C_{min} corresponde al valor mínimo entre las capacidades caloríficas asociadas al aire de entrada (C_{cold}) y de salida (C_{hot}). Por su parte, el parámetro ε equivale a:

$$\epsilon = \frac{Q}{Q_{\max}} \quad (3.21)$$

Donde

$$Q = C_{cold}(T_{cold,out} - T_{cold,in}) \quad (3.22)$$

$$Q_{\max} = C_{min} * (T_{hot,in} - T_{cold,in}) \quad (3.23)$$



Capítulo 4. Modelación estructural y paramétrica

Ahora que se han descrito las ecuaciones fenomenológicas que modelan la dinámica tanto de la temperatura como de la humedad del aire en el quirófano, se presentarán los datos obtenidos en la UTA n° 12 del Hospital Guillermo Grant Benavente de Concepción, las correlaciones existentes entre ellos, y con ello obtener un modelo analítico más simplificado del sistema en estudio.

4.1. Set de Datos tomados

El set de datos tomado para realizar la tarea de identificación del sistema se realizó el día 26 de Septiembre del 2015, entre las 12:45:00 y las 15:00:00; muestreados cada 5 segundos (un total de 1621 muestras); y fue extraído de la batería de frío. Esos datos son los siguientes:

- **Temperatura del surtidor T_{w0} :** Corresponde a la temperatura del agua que fluye por el serpentín. En este caso, corresponde al agua de refrigeración que circula por el serpentín de la batería de frío de la UTA.
- **Set-Point de la válvula de agua fría u :** Indica el grado de apertura en porcentajes de la válvula de agua fría que circula por la batería de frío.
- **Set-Point del caudal de aire SPq_s :** Corresponde al valor que se desea darle al caudal del aire de impulsión.
- **Caudal de aire q_s :** Es el flujo volumétrico que circula por el canal de aire de impulsión que ingresa al quirófano.
- **Temperatura del quirófano T_{quir} :** Indica la temperatura del aire dentro de la zona térmica.
- **Humedad relativa del quirófano $W_{quir,rel}$:** Porcentaje de humedad presente en la masa de aire dentro del quirófano con respecto a la máxima humedad absoluta permitida bajo la misma temperatura.

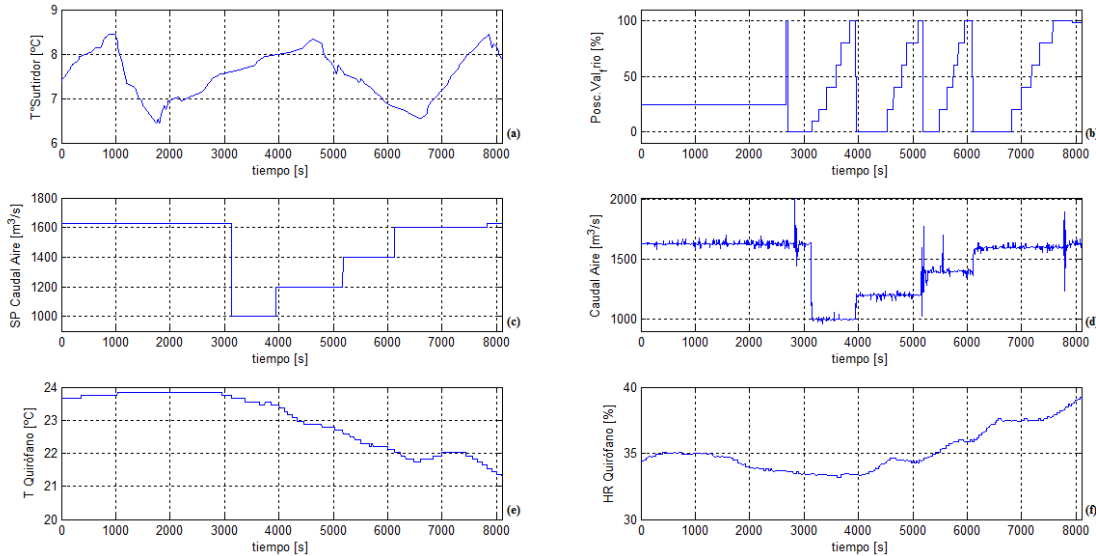


Figura 4.1: Gráficos de las variables tomadas de la base de datos

- (a) Temperatura del agua circulante del serpentín de frío
- (b) Porcentaje de apertura de la válvula de frío
- (c) Set-Point del caudal del aire de impulsión
- (d) Caudal del aire de impulsión
- (e) Temperatura del aire dentro del quirófano
- (f) Humedad relativa del aire del quirófano

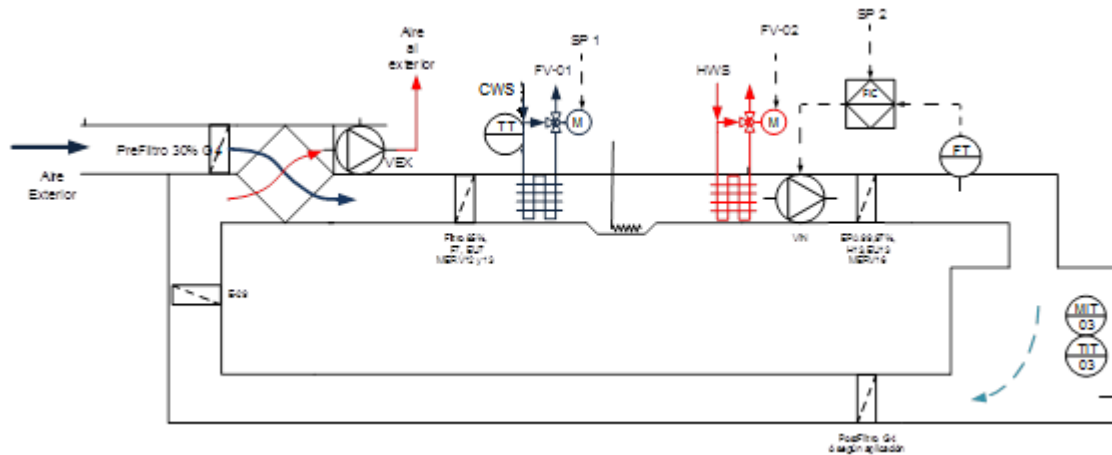


Figura 4.2: Ubicación de los transmisores y set-points correspondientes al set de datos: MIT-03: Humedad relativa quirófano, TIT-03: Temperatura quirófano, FT: Flujo volumétrico (caudal) del aire de impulsión, TT: Temperatura surtidor agua fría, SP 1: Set-point apertura válvula de agua fría, SP2: Set-point de caudal de aire. FIC: Controlador del caudal de aire.

4.2. Análisis de Variables

Es importante conocer las relaciones existentes entre una variable y otra, si es que existen. Para ello se ha recurrido a métodos de estimación no paramétricas.

La idea fundamental de la estimación estructural es el cálculo de índices que permitan caracterizar la serie, además de su relación con otras series del mismo proceso, pero no implica conocer los parámetros ni la estructura del sistema en estudio.

Las relaciones entre las series pueden ser de tipo lineal o cuadrático, y pueden trabajarse ya sea en el dominio del tiempo o de la frecuencia. Para este trabajo se usó el estudio de correlaciones entre una variable y otra, y de las auto-correlaciones de cada una de las variables en estudio. Cabe destacar que las correlaciones forman parte del estudio de relaciones cuadráticas en el dominio del tiempo.^[4]

4.2.1 Estudio de Correlaciones

Para poder discriminar si los coeficientes de las correlaciones son cero o no, se han establecido ciertos criterios, los cuales sólo serán enunciados, y no serán puestos en práctica para este estudio.

Para las correlaciones se define la varianza de la correlación con la aproximación de Barlett:^[4]

$$\text{var}[\rho_{xx}(t)] = \frac{1}{N} \left(1 + 2 \sum_{r=1}^q \rho_r^2 \right) \quad k > q \quad (4.1)$$

Dado que ρ_r presenta valores menores que uno implica que su aporte se reduce al aumentar el valor de q , por lo que se define un cierto valor en función del efecto de las perturbaciones del sistema. Luego, se acepta la correlación siempre y cuando:^[4]

$$|\rho_{xx}| > 2\text{var}[\rho_{xx}]$$

Para el cálculo de las correlaciones cruzadas, se supone señales con distribución normal, luego, para un intervalo de confianza del 95% puede aplicarse el siguiente test de hipótesis: se rechaza $H_0: (k) = 0$ y se acepta $H_1: (k) = 0$ si

$$-\frac{1.96}{N} < \rho(k) < +\frac{1.96}{N} \quad (4.2)$$

Siendo N el largo de la correlación.^[4]

4.2.2 Correlaciones de las variables

Para las evaluaciones de las correlaciones se utilizó una ventana de una hora (720 datos), con un índice de corrimiento de 1 minuto (12 muestras) con el fin de evaluar la totalidad de cada variable extraída.

Primero es importante conocer cuáles de las variables que aparecen en el set de datos tomados corresponden a las entradas del sistema UTA y cuáles son las salidas. La siguiente figura muestra el modelo caja negra de dicho sistema, en donde se muestran las entradas y las salidas que participan en él.

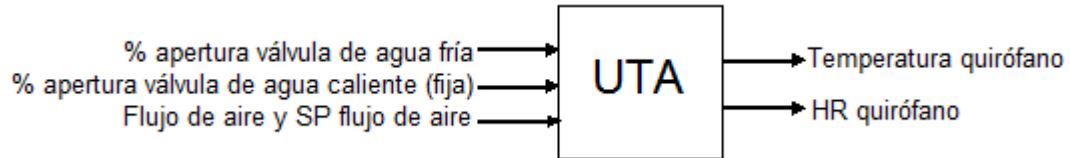


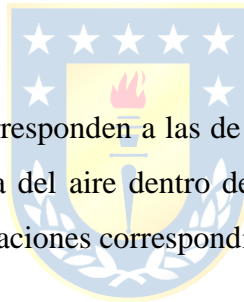
Figura 4.3: Modelo de caja negra de la unidad de tratamiento de aire

Teniendo ya el modelo de caja negra, es procede a realizar las correlaciones correspondientes, de las cuales las más importantes son:

- Autocorrelación de la temperatura del quirófano.
- Autocorrelación de la humedad relativa (HR) del quirófano.
- Correlación cruzada % apertura de la válvula de agua fría v/s temperatura del quirófano.
- Correlación cruzada % apertura de la válvula de agua fría v/s HR del quirófano.
- Correlación cruzada flujo de aire v/s temperatura del quirófano.
- Correlación cruzada flujo de aire v/s HR del quirófano.
- Correlacion crizada temperatura del quirófano v/s HR del quirófano.

Autocorrelaciones de las salidas

Las siguientes autocorrelaciones corresponden a las de las salidas del modelo de caja negra que aparece en la figura 4.3: la temperatura del aire dentro del quirófano y a la humedad relativa del mismo. De ellas se realizarán las observaciones correspondientes.



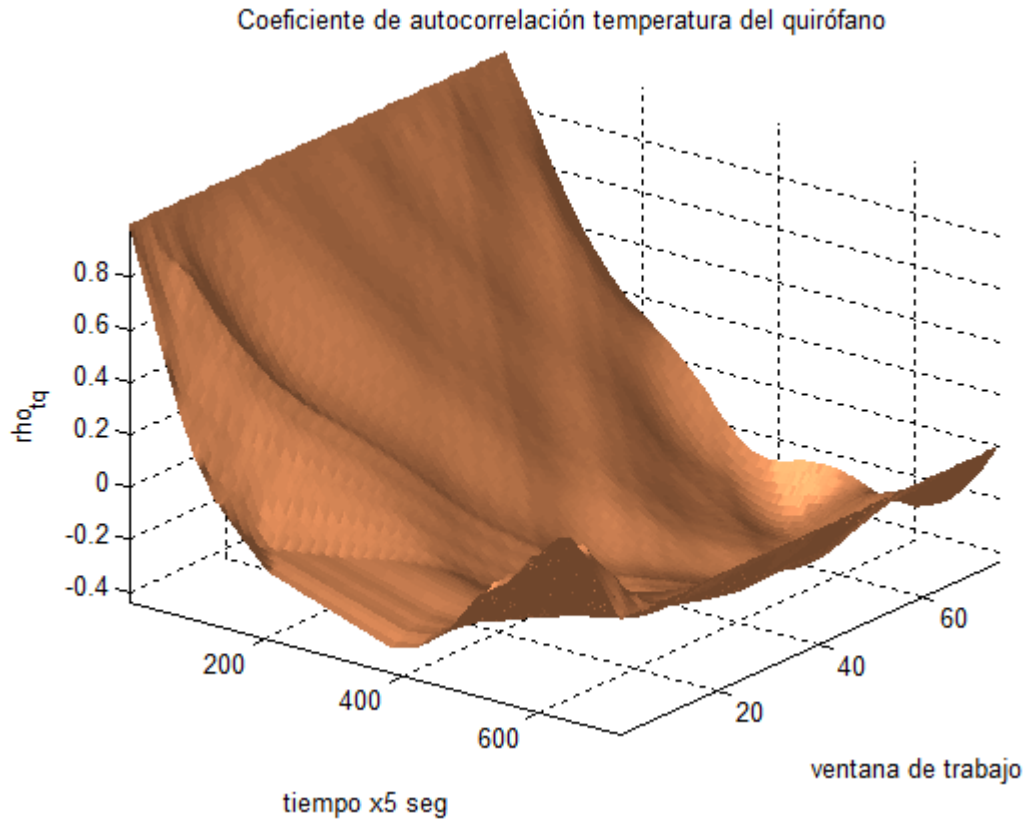


Figura 4.4: Gráfico de coeficientes de autocorrelación de la temperatura del aire en el interior del quirófano

Como puede apreciarse en la figura 4.4, la autocorrelación de la temperatura del aire dentro del quirófano toma bastante tiempo en reducirse completamente (unos 2000 segundos aproximadamente), lo cual es señal de la existencia de un fuerte componente autoregresivo asociado a ella. Físicamente hablando, significa que la temperatura del quirófano presenta un retardo considerable.

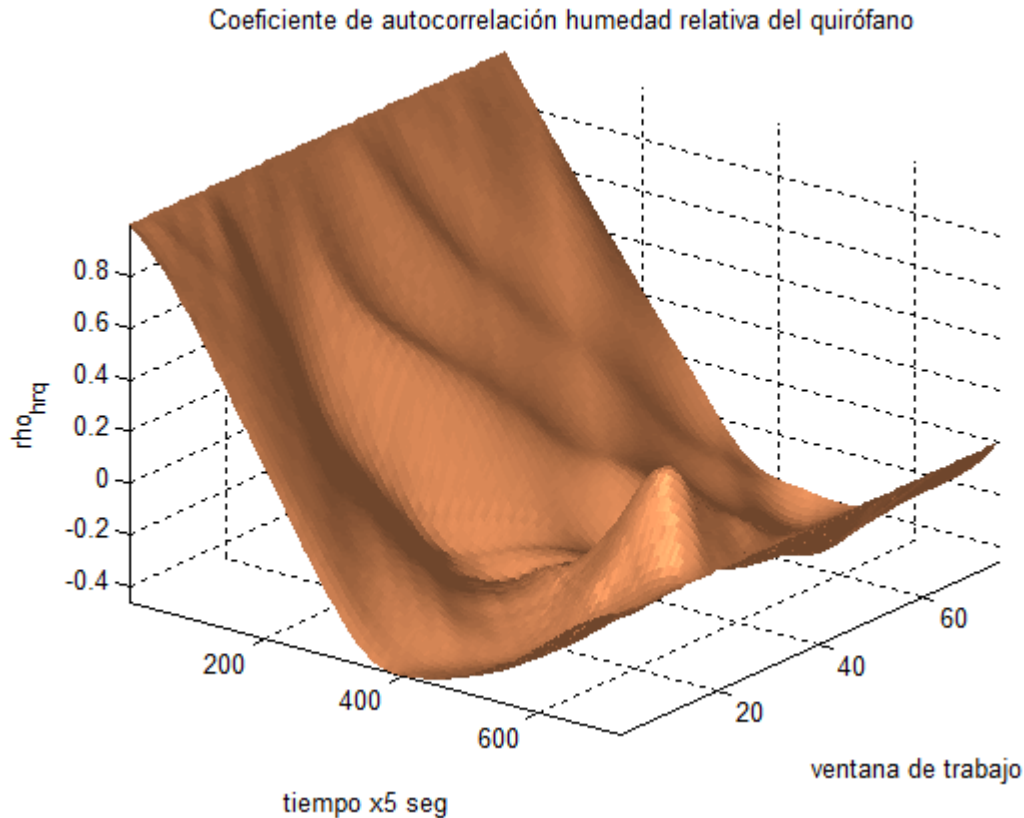


Figura 4.5: Gráfico de coeficientes de autocorrelación de la humedad relativa (HR) del aire en el interior del quirófano

Con la humedad relativa también ocurre lo mismo que con la temperatura: presenta un componente autoregresivo asociado bastante fuerte, lo cual explica porqué la autocorrelación de la HR del aire del quirófano alcanza su valor mínimo a los 2000 segundos aproximadamente. De la figura 4.5 se llega a la conclusión de que existe un retardo considerable que afecta a la humedad relativa del quirófano.

Correlaciones cruzadas entre cada entrada y las salidas

A continuación se mostrarán los gráficos correspondientes a las correlaciones entre cada una de las entradas y las salidas correspondientes al modelo de caja negra descrito en la figura 4.3, así como las observaciones que se obtuvieron a partir de ellas.

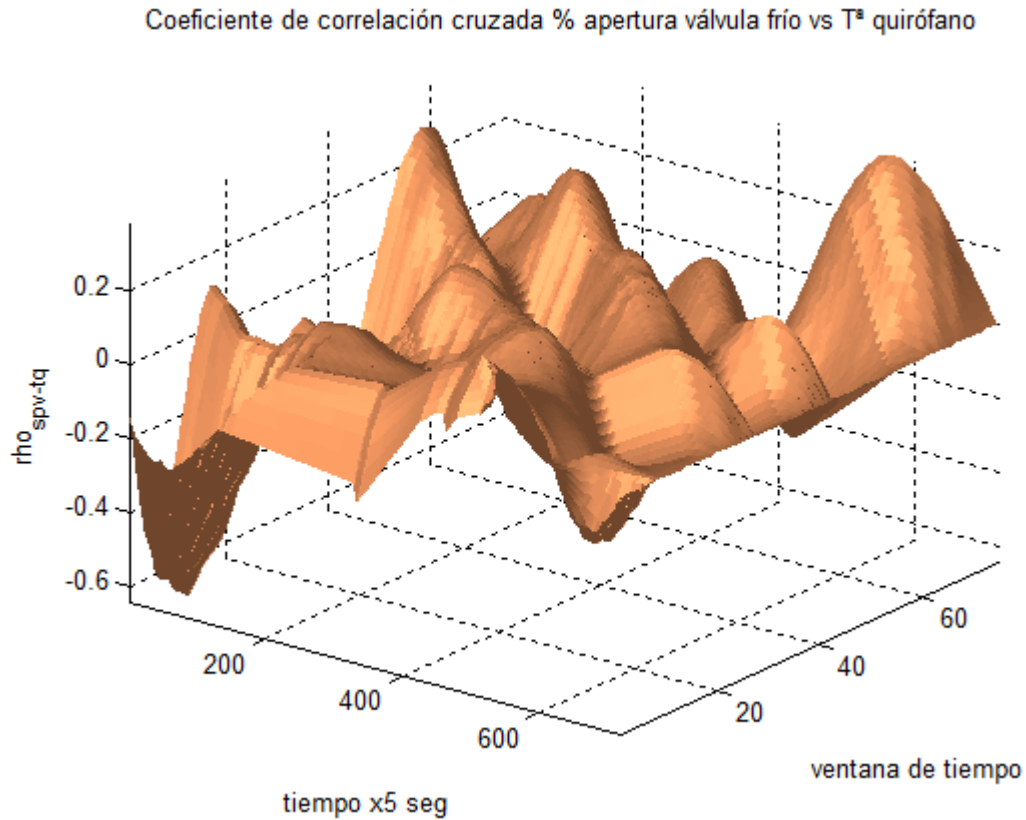


Figura 4.6: Gráfico de coeficientes de correlación cruzada apertura válvula agua fría vs temperatura aire quirófano

Puede notarse a partir de la figura 4.6 que existe a corto plazo una relación inversa muy fuerte entre el nivel de apertura de la válvula de agua fría y la temperatura dentro del quirófano. Durante los primeros 250 segundos aproximadamente, puede evidenciarse a partir del valor que toma la correlación cruzada en ese instante, que el valor de la temperatura dentro de la sala disminuye a medida que se abre más la válvula de agua fría. Esto quiere decir que el valor del componente de media móvil asociado a esta entrada debe ser negativa.

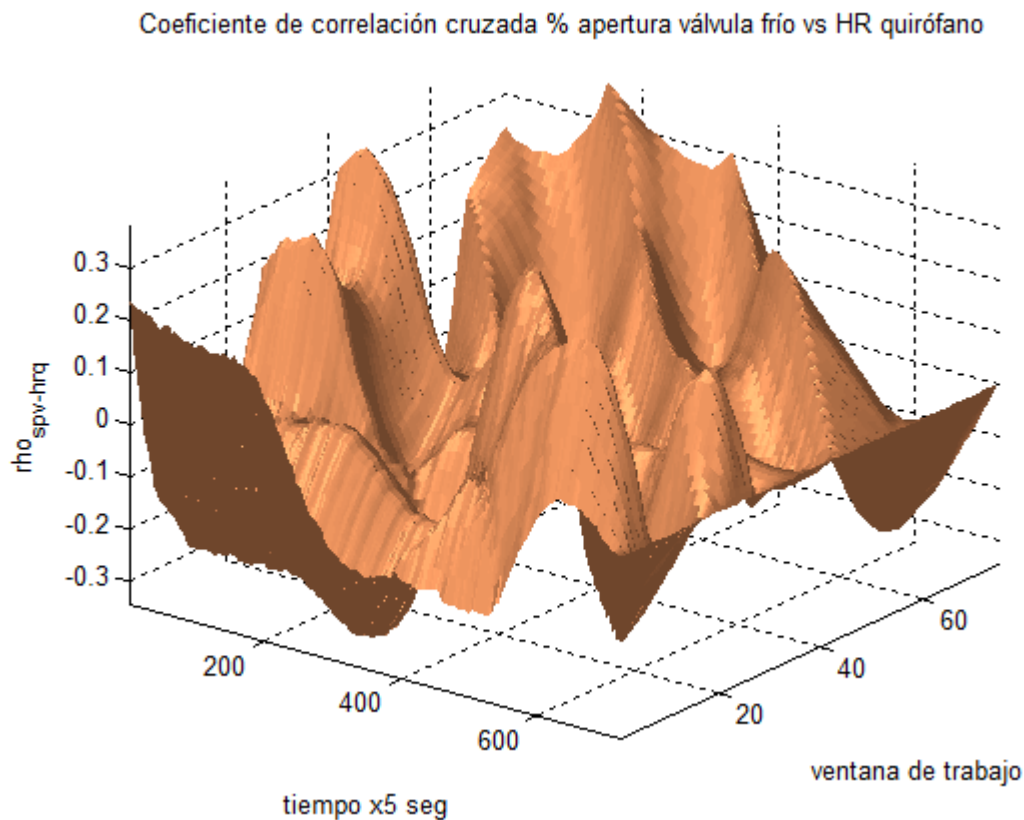


Figura 4.7: Gráfico de coeficientes de correlación cruzada apertura válvula agua fría vs HR aire quirófano

Al igual que con la temperatura, la humedad relativa presenta una relación inversa considerable con el grado de apertura de la válvula de agua fría, sin embargo, ésta presenta una dinámica más lenta y la relación en sí no es tan fuerte, de acuerdo a lo mostrado en el gráfico de la figura 4.7. Durante los primeros 1500 segundos se observa que la HR del quirófano descende a medida que se abre más la válvula de agua fría, por lo tanto, el componente de media móvil asociado a la entrada debe ser negativo para que el modelo entrada/salida que se busca represente de manera fidedigna al sistema.

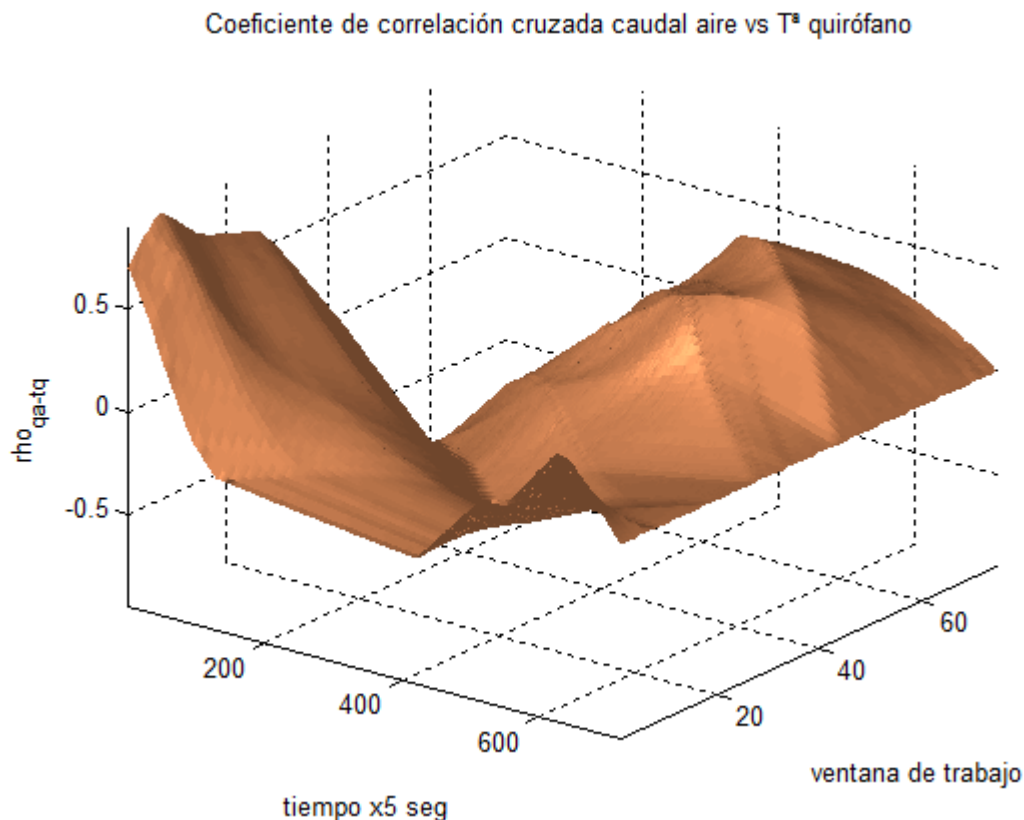


Figura 4.8: Gráfico de coeficientes de correlación cruzada caudal aire vs temperatura aire quirófano

Analizando de forma detallada el gráfico correspondiente a la correlación cruzada entre el flujo volumétrico (caudal) del aire entrante a la sala y la temperatura de la misma, puede apreciarse que a corto plazo existe una relación directa entre ambas variables, es decir, que la temperatura aumenta conforme aumenta el flujo de aire. Sin embargo, pasados los 500 segundos pasa lo contrario, que la temperatura disminuye conforme aumenta el flujo de aire. Eso es porque el aire de impulsión que entra a la sala proviene del aire exterior, cuya temperatura puede ser mayor, igual o menor a la de la sala. También entran en juego el efecto de las baterías de frío y calor, así como la temperatura del aire de retorno, pues ambas influyen en la temperatura del aire de impulsión, al cual repercute al final en la temperatura de la sala. Por lo tanto, el efecto de esos factores determinarán el efecto del aire de impulsión sobre la temperatura en la zona térmica.

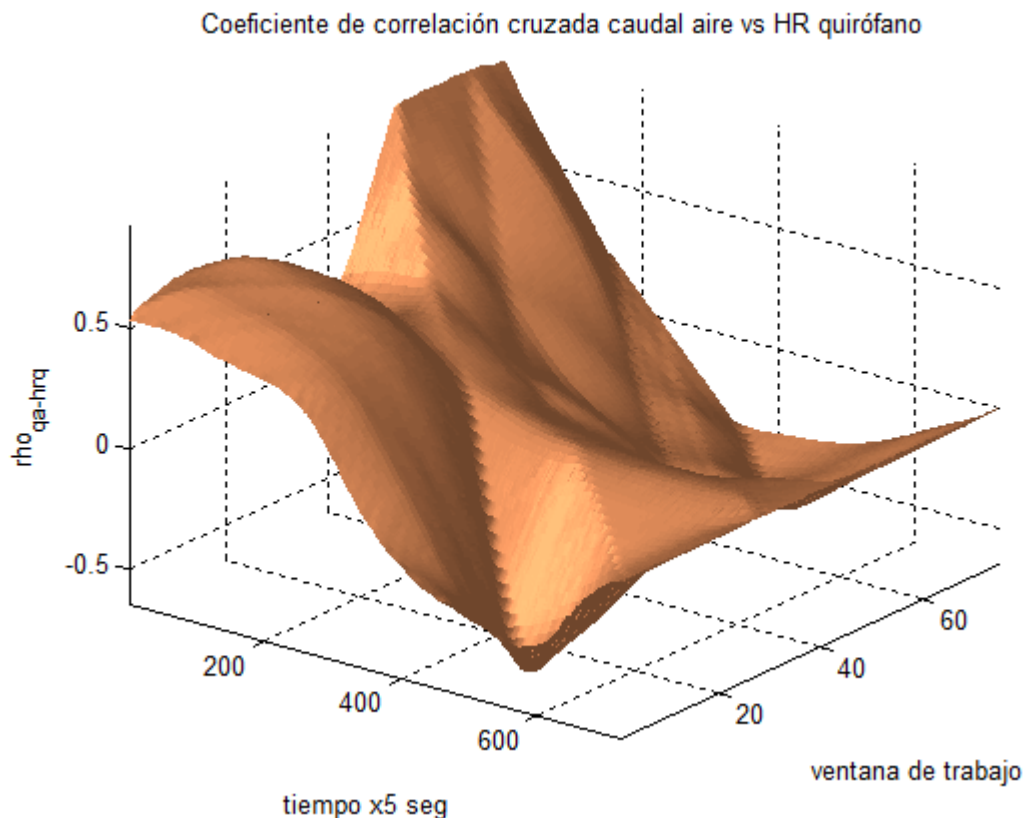


Figura 4.9: Gráfico de coeficientes de correlación cruzada caudal aire vs HR aire quirófano

El resultado arrojado por el cálculo de la correlación cruzada entre el flujo de aire y la HR del quirófano indica que dicha humedad es directamente proporcional al efecto ejercido por el aire de impulsión. Eso es porque gran parte de la humedad presente en la sala quirúrgica proviene del exterior. Además, los valores de correlación cruzada entre el caudal de aire impulsado y la HR de la sala, tanto positivos como negativos, son bastante altos, lo cual indica que hay una fuerte dependencia entre estas variables. Hay que considerar que en la ecuación fenomenológica de la humedad dentro de la zona térmica está presente el flujo volumétrico del aire de impulsión.

Correlación cruzada entre las salidas

Finalmente y no menos importante que las demás correlaciones cruzadas, está la correlación cruzada entre la temperatura del quirófano y la humedad relativa del mismo.

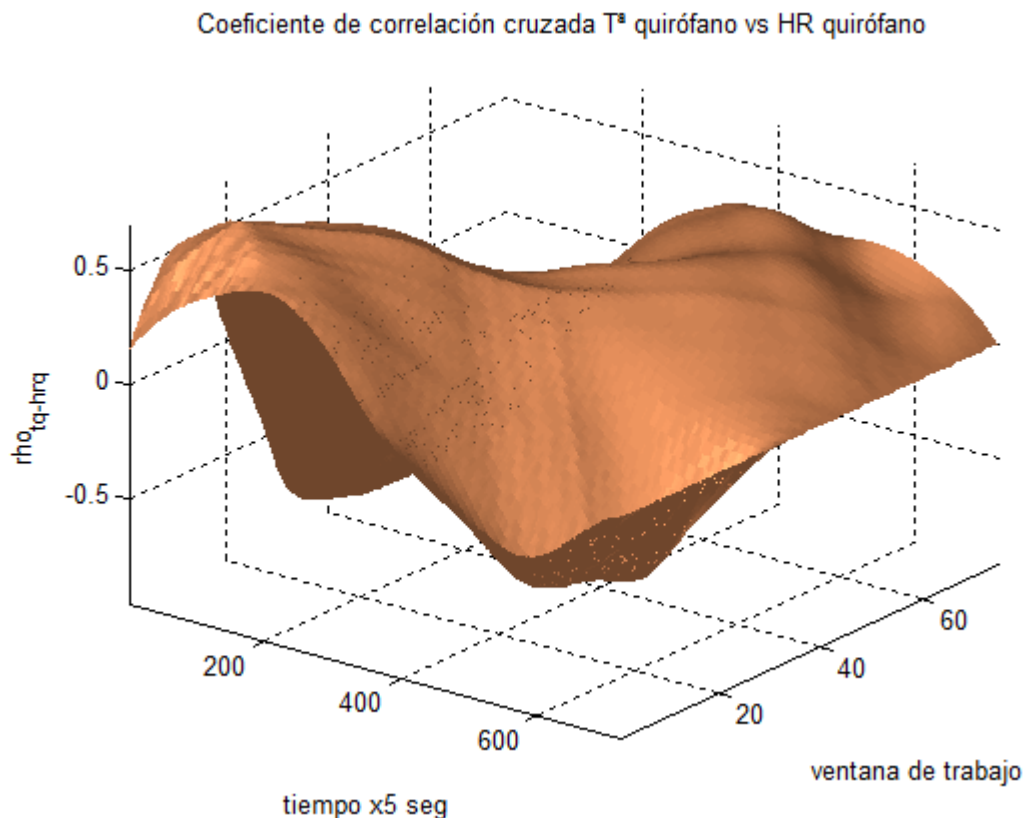


Figura 4.10: Gráfico de coeficientes de correlación cruzada temperatura aire quirófano vs HR aire quirófano

Puede verse que a partir de la figura 4.10 que, aunque son salidas totalmente distintas y ninguna de estas variables aparece en la ecuación fenomenológica de la otra, se presenta una correlación cruzada considerable entre ellas. La razón de esto es que la humedad y la temperatura se encuentran acopladas entre sí.

Dicho acoplamiento se explica por medio de la psicometría, una parte de la ciencia que usa las leyes termodinámicas para analizar las y procesos relacionados con el aire húmedo, y el efecto de la humedad atmosférica sobre los materiales y el confort humano ^[2]. Acorde a esto se tiene que la cantidad de vapor presente es proporcional a la temperatura, esto indica que a mayor temperatura se podrá almacenar una mayor cantidad de vapor de agua y viceversa, por ende si queremos obtener un menor porcentaje de humedad será de vital importancia disminuir la temperatura del aire, ya que al disminuirla se lleva a su temperatura de punto de rocío, que es en la cual el vapor de aire se condensa sobre una superficie. ^[2]

El diagrama psicrométrico de Mollier ayuda a expresar las relaciones existentes entre variables tales como temperaturas de bulbo seco, entalpía, humedad específica, entre otras, a través de curvas. Su utilidad radica en que pueden obtenerse con bastante rapidez los valores de las

variables anteriormente mencionadas, mediante esta clase de diagramas, pues basta con ubicar la temperatura de bulbo seco y humedad específica para obtener las demás. [2]

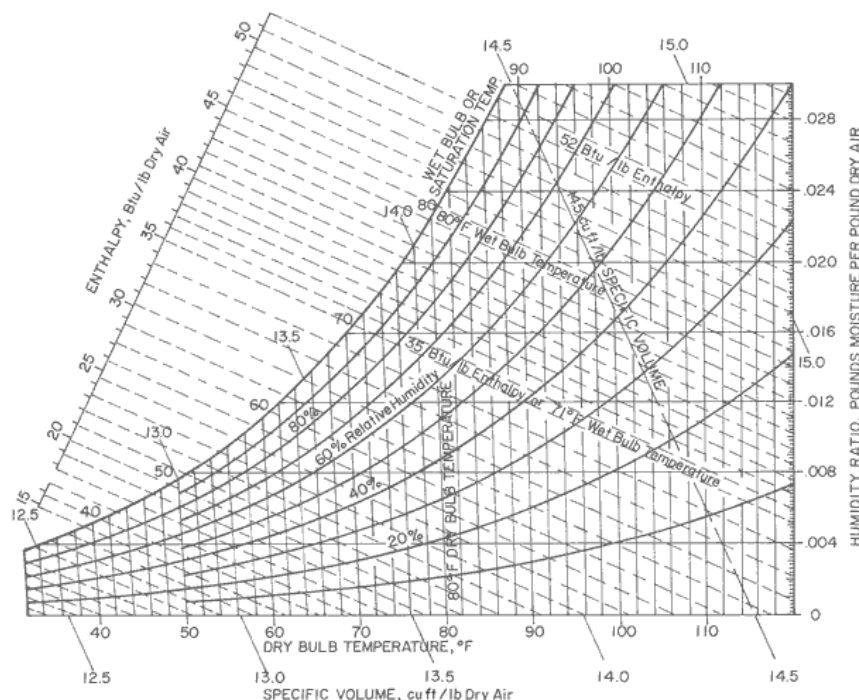


Figura 4.11: Carta psicrométrica Mollier

Conclusiones

Dado que lo que se busca en este trabajo es un modelo que represente el proceso de manejo de la temperatura dentro del quirófano a partir del grado de apertura de la válvula de agua fría, y tomando en cuenta lo observado a partir de las correlaciones mostradas anteriormente, se concluye que los valores que deben presentar los parámetros presentes en el modelo a estimar son los siguientes:

TABLA 4.1: Valores máximos y mínimos permitidos para cada parámetro

Parámetro	Valor mínimo	Valor máximo
θ_1	0.99	1.01
$\theta_2 = \alpha$	0	1
$\theta_3 = \beta$	-1	0

Como puede verse, el valor de θ_3 , el cual está asociado a la entrada del sistema (la válvula de agua fría), debe estar entre -1 y 0 porque es con ese rango de valores se cumple que la temperatura del quirófano (la salida del sistema) disminuya cuanto más se abra la válvula de agua fría. Después de todo, la función de la batería de frío es enfriar el aire que viene desde el exterior hacia la zona térmica.

Por su parte, se tienen 2 parámetros asociados a la salida del sistema. El valor de θ_1 debe ser un valor cercano a 1 y θ_2 debe estar entre 0 y 1 porque así se explica en el modelo la fuerte autocorrelación que presenta la temperatura de la zona térmica.

4.3. Modelo aproximado del sistema

El interés de este trabajo es encontrar un modelo discreto que represente lo más fielmente posible la relación entre el grado de apertura de la válvula de agua fría y la temperatura en el interior del quirófano. Sin embargo, de las ecuaciones descritas en la sección 3.3, cabe mencionar que hay datos que no están presentes entre aquellos que fueron extraídos y que fueron descritos en la sección 4.1, como lo son los cambios de aire por hora (ACH), la temperatura de cada muro de la sala, la temperatura del aire en el exterior de la sala y la temperatura del agua resultante producto de la apertura o cierre de la válvula de agua, entre otros. Es por eso que se busca encontrar una versión simplificada del modelo que más se ajuste al sistema de análisis.

4.3.1 Discretización del sistema

Tal y como se mostró en la ecuación 3.5, el modelo correspondiente a la dinámica de la temperatura del quirófano es:

$$M_a cp \frac{dT_a}{dt} = \sum_{mi=1}^m h_{mi} A_{mi} (T_{mi} - T_a) + \dot{m}_s cp (T_s - T_a) + \dot{m}_{inf} cp (T_{ext} - T_a) + Q_G$$

Como el operador sumatoria es un operador lineal, y sabiendo que el flujo másico de impulsión de aire $\dot{m}_s = \dot{v}_s \rho_a$, donde \dot{v}_s corresponde al caudal impulsado de aire y ρ_a es la densidad del aire, se tiene entonces:

$$M_a cp \frac{dT_a}{dt} = \sum_{mi=1}^m h_{mi} A_{mi} T_{mi} - T_a \sum_{mi=1}^m h_{mi} A_{mi} + \rho_a cp \dot{v}_s T_s - \rho_a cp \dot{v}_s T_a + \rho_a cp \dot{v}_{inf} T_{ext} - \rho_a cp \dot{v}_{inf} T_a + Q_G \quad (4.3)$$

Reduciendo términos semejantes se tiene:

$$M_a cp \frac{dT_a}{dt} = k_1 T_a + k_2 \dot{v}_s T_a + k_3 \dot{v}_{inf} T_a + k_4 \dot{v}_s T_s + k_5 \dot{v}_{inf} T_{ext} + \sum_{mi=1}^m h_{mi} A_{mi} T_{mi} + Q_G \quad (4.4)$$

Donde

$$k_1 = - \sum_{mi=1}^m h_{mi} A_{mi}$$

$$k_2 = -\rho_a cp$$

$$k_3 = k_2$$

$$k_4 = k_2$$

$$k_5 = k_3$$

Para la ecuación 3.6 se asume que no existe variación en las temperaturas de cada muro $T_m = cte$. Por lo tanto para la dinámica de la temperatura de cada muro del quirófano se tiene:

$$0 = h_m A_m (T_a - T_m) + \frac{k_m A_m}{e} (T_{ext} - T_m) \quad (4.5)$$

$$T_m \left(h_m A_m + \frac{k_m A_m}{e} \right) = h_m A_m T_a + \frac{k_m A_m}{e} T_{ext} \quad (4.6)$$

Por lo tanto, despejando T_m se tiene:

$$T_m = p_{1m} T_a + p_{2m} T_{ext} \quad (4.7)$$

Donde

$$p_{1m} = \frac{h_m A_m e}{h_m A_m e + k_m A_m}$$

$$p_{2m} = \frac{k_m A_m}{h_m A_m e + k_m A_m}$$

Los valores de p_1 y de p_2 dependen de cada muro. Por lo tanto, se tiene, y reduciendo nuevamente términos semejantes:

$$M_a c_p \frac{dT_a}{dt} = q_1 T_a + q_2 T_{ext} + k_2 \dot{v}_s T_a + k_3 \dot{v}_{inf} T_a + k_4 \dot{v}_s T_s + k_5 \dot{v}_{inf} T_{ext} + Q_G \quad (4.8)$$

Donde:

$$q_1 = k_1 + \sum_{mi=1}^m h_{mi} A_{mi} p_{1mi}$$

$$q_2 = \sum_{mi=1}^m h_{mi} A_{mi} p_{2mi}$$

Ahora se procede a revisar la temperatura del aire de impulsión descrita en la ecuación 3.15.

Se asume estado seco. Se tiene que:

$$T_s = T_{a,sal} = T_{a0} + \varepsilon_a (T_{serp} - T_{a0}) \quad (4.9)$$

$$T_{a,sal} = T_{a0} + \varepsilon_a T_{serp} - \varepsilon_a T_{a0} \quad (4.10)$$

Se asume $T_{serp} = cte$. Por lo tanto, para la dinámica de la temperatura de la superficie del serpentín (Ecuación 3.13, estado seco) se tiene:

$$\frac{1}{R_a} (T_{serp} - T_{a0}) + \frac{1}{R_w} (T_{serp} - T_w) = 0 \quad (4.11)$$

$$T_{serp} \left(\frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_w} \right) = \frac{1}{R_a} T_{a0} + \frac{1}{R_w} T_w \quad (4.12)$$

Despejando T_{serp} , se tiene entonces:

$$T_{serp} = f_1 T_{a0} + f_2 T_w \quad (4.13)$$

Donde

$$f_1 = \frac{1}{R_a \left(\frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_w} \right)}$$

$$f_2 = \frac{1}{R_w \left(\frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_w} \right)}$$

Reemplazando en la ec. 4.10 se tiene:

$$T_{a,sal} = T_{a0} + \varepsilon_a (f_1 T_{a0} + f_2 T_w) - \varepsilon_a T_{a0} \quad (4.14)$$

Reduciendo términos semejantes se tiene:

$$T_{a,sal} = c_1 T_{a0} + \varepsilon_a f_2 T_w \quad (4.15)$$

Donde:

$$c_1 = 1 + \varepsilon_a f_1 - \varepsilon_a$$

Ahora se analiza la temperatura del agua (Ec. 3.12). Se asume constante. Se tiene entonces:

$$\dot{m}_w c_w (T_w - T_{w0}) + \frac{1}{R_w} (T_{w0} - T_{serp}) = 0 \quad (4.16)$$

Reemplazando términos y sabiendo que $\dot{m}_w = u_w \dot{v}_w \rho_w$, donde \dot{v}_w corresponde al caudal volumétrico de agua, ρ_w es la densidad del agua y u_w corresponde al grado de apertura de la válvula de la batería (de frío en este caso), con valores que van de 0 a 1, se tiene:

$$u_w \dot{v}_w \rho_w c_w (T_w - T_{w0}) + \frac{1}{R_w} (T_{w0} - f_1 T_{a0} - f_2 T_w) = 0 \quad (4.17)$$

$$T_w \left(\dot{v}_w \rho_w c_w u_w - \frac{f_2}{R_w} \right) = f_1 T_{a0} + \dot{v}_w \rho_w c_w u_w T_{w0} - \frac{1}{R_w} T_{w0} \quad (4.18)$$

Asumiendo \dot{v}_w constante, se tiene al despejar T_w :

$$T_w = \frac{f_1}{l_1 u_w + l_2} T_{a0} + \frac{l_1}{l_1 u_w + l_2} u_w T_{w0} - \frac{1}{R_w (l_1 u_w + l_2)} T_{w0} \quad (4.19)$$

Donde:

$$l_1 = \dot{v}_w \rho_w c_w$$

$$l_2 = -\frac{f_2}{R_w}$$

Reemplazando en la ecuación 4.15 se tiene:

$$T_{a,sal} = c_1 T_{a0} + \varepsilon_a f_2 \left[\frac{f_1}{l_1 u_w + l_2} T_{a0} + \frac{l_1}{l_1 u_w + l_2} u_w T_{w0} - \frac{1}{R_w (l_1 u_w + l_2)} T_{w0} \right] \quad (4.20)$$

Ahora se analiza a la ecuación del intercambiador de calor (Ec 3.20):

$$T_{a0} = T_{cold,out} = T_{cold,in} + \varepsilon \left(\frac{C_{min}}{C_{cold}} (T_{hot,in} - T_{cold,in}) \right)$$

Donde $T_{cold,in} = T_{ext}$ y $T_{hot,in} = T_a$. Reduciendo términos se tiene:

$$T_{a0} = g_1 T_a + g_2 T_{ext} \quad (4.21)$$

Donde:

$$g_1 = \varepsilon \frac{C_{min}}{C_{cold}}$$

$$g_2 = 1 - g_1$$

Reemplazando en la ecuación 4.20 se tiene:

$$T_{a,sal} = c_1 g_1 T_a + c_1 g_2 T_{ext} + \frac{\varepsilon_a f_2 f_1 g_1}{l_1 u_w + l_2} T_a + \frac{\varepsilon_a f_2 f_1 g_2}{l_1 u_w + l_2} T_{ext} + \frac{\varepsilon_a f_2 l_1}{l_1 u_w + l_2} u_w T_{w0} - \frac{\varepsilon_a f_2}{R_w (l_1 u_w + l_2)} T_{w0} \quad (4.22)$$

$$T_{a,sal} = m_1 T_a + m_2 T_{ext} + \frac{m_3}{l_1 u_w + l_2} T_a + \frac{m_4}{l_1 u_w + l_2} T_{ext} + \frac{m_5}{l_1 u_w + l_2} u_w T_{w0} + \frac{m_6}{l_1 u_w + l_2} T_{w0} \quad (4.23)$$

Donde

$$m_1 = c_1 g_1$$

$$m_2 = c_1 g_2$$

$$m_3 = \varepsilon_a f_2 f_1 g_1$$

$$m_4 = \varepsilon_a f_2 f_1 g_2$$

$$m_5 = \varepsilon_a f_2 l_1$$

$$m_6 = -\frac{\varepsilon_a f_2}{R_w}$$

Se tiene entonces:

$$M_a cp \frac{dT_a}{dt} = q_1 T_a + q_2 T_{ext} + k_2 \dot{v}_s T_a + k_3 \dot{v}_{inf} T_a + k_4 \dot{v}_s \left(m_1 T_a + m_2 T_{ext} + \frac{m_3}{l_1 u_w + l_2} T_a + \frac{m_4}{l_1 u_w + l_2} T_{ext} + \frac{m_5}{l_1 u_w + l_2} u_w T_{w0} + \frac{m_6}{l_1 u_w + l_2} T_{w0} \right) + k_5 \dot{v}_{inf} T_{ext} + Q_G \quad (4.24)$$

Discretizando y asumiendo \dot{v}_{inf} y T_{ext} constantes se tiene:

$$\frac{M_a c_p}{T_0} T_{a_{k+1}} - \frac{M_a c_p}{T_0} T_{a_k} = q_1 T_{a_k} + q_2 T_{ext} + k_2 \dot{v}_{s_k} T_{a_k} + k_3 \dot{v}_{inf} T_{a_k} + k_4 m_1 \dot{v}_{s_k} T_{a_k} + k_4 m_2 T_{ext} \dot{v}_{s_k} + \frac{k_4 m_3}{l_1 u_{w_k} + l_2} \dot{v}_{s_k} T_{a_k} + \frac{k_4 m_4 T_{ext}}{l_1 u_{w_k} + l_2} \dot{v}_{s_k} + \frac{k_4 m_5}{l_1 u_{w_k} + l_2} u_{w_k} \dot{v}_{s_k} T_{w0_k} + \frac{k_4 m_6}{l_1 u_w + l_2} \dot{v}_{s_k} T_{w0_k} + k_5 \dot{v}_{inf} T_{ext} + Q_G \quad (4.25)$$

Donde \dot{v}_{s_k} , u_{w_k} , T_{a_k} y T_{w0_k} corresponden respectivamente al flujo volumétrico (caudal) de aire de impulsión, grado de apertura de la válvula de agua fría, temperatura del quirófano y temperatura del agua que fluye por el serpentín de la batería de frío, todos ellos muestreados en el instante k. Multiplicando la ecuación 4.25 por $l_1 u_w + l_2$ y siendo $r_1 = \frac{M_a c_p}{T_0}$ se tiene:

$$r_1 l_1 u_{w_k} T_{a_{k+1}} + r_1 l_2 T_{a_{k+1}} - r_1 l_1 u_{w_k} T_{a_k} - r_1 l_2 T_{a_k} = q_1 l_1 u_{w_k} T_{a_k} + q_1 l_2 T_{a_k} + q_2 l_1 T_{ext} u_{w_k} + q_2 l_2 T_{ext} + k_2 l_1 u_{w_k} \dot{v}_{s_k} T_{a_k} + k_2 l_2 \dot{v}_{s_k} T_{a_k} + k_3 l_1 \dot{v}_{inf} u_{w_k} T_{a_k} + k_3 l_2 \dot{v}_{inf} T_{a_k} + k_4 m_1 l_1 u_{w_k} \dot{v}_{s_k} T_{a_k} + k_4 m_1 l_2 \dot{v}_{s_k} T_{a_k} + k_4 m_2 T_{ext} l_1 u_{w_k} \dot{v}_{s_k} + k_4 m_2 T_{ext} l_2 \dot{v}_{s_k} + k_4 m_3 \dot{v}_{s_k} T_{a_k} + k_4 m_4 T_{ext} \dot{v}_{s_k} + k_4 m_5 u_{w_k} \dot{v}_{s_k} T_{w0_k} + k_4 m_6 \dot{v}_{s_k} T_{w0_k} + k_5 T_{ext} l_1 \dot{v}_{inf} u_{w_k} + k_5 T_{ext} l_2 \dot{v}_{inf} + Q_G l_1 u_{w_k} + Q_G l_2 \quad (4.26)$$

Reduciendo términos semejantes y despejando $T_{a_{k+1}}$ se tiene:

$$T_{a_{k+1}} = M_1 T_{a_k} + M_2 \dot{v}_{s_k} + M_3 u_{w_k} + M_4 u_{w_k} \dot{v}_{s_k} + M_5 u_{w_k} T_{a_k} + M_6 u_{w_k} T_{a_{k+1}} + M_7 \dot{v}_{s_k} T_{a_k} + M_8 \dot{v}_{s_k} T_{w0_k} + M_9 u_{w_k} \dot{v}_{s_k} T_{a_k} + M_{10} u_{w_k} \dot{v}_{s_k} T_{w0_k} + K \quad (4.27)$$

Donde:

$$M_1 = \frac{r_2 l_2 + q_1 l_2 + k_3 l_2 \dot{v}_{inf} + k_5 T_{ext} l_2 \dot{v}_{inf}}{r_1 l_2}$$

$$M_2 = \frac{k_4 m_2 T_{ext} l_2 + k_4 m_4 T_{ext}}{r_1 l_2}$$

$$M_3 = \frac{k_5 T_{ext} l_1 \dot{v}_{inf} + Q_G l_1 + q_2 l_1 T_{ext}}{r_1 l_2}$$

$$M_4 = \frac{k_4 m_2 T_{ext} l_1}{r_1 l_2}$$

$$M_5 = \frac{k_3 l_1 \dot{v}_{inf} + r_1 l_1 + q_1 l_1}{r_1 l_2}$$

$$M_6 = -\frac{r_1 l_1}{r_1 l_2}$$

$$M_7 = \frac{k_2 l_2 + k_4 m_3 + k_4 m_1 l_2}{r_1 l_2}$$

$$M_8 = \frac{k_4 m_6}{r_1 l_2}$$

$$M_9 = \frac{k_4 m_1 l_1 + k_2 l_1}{r_1 l_2}$$

$$M_{10} = \frac{k_4 m_5}{r_1 l_2}$$

$$K = \frac{Q_G l_2 + q_2 l_2 T_{ext}}{r_1 l_2}$$

Se considera como perturbación no medible la siguiente expresión:

$$p_k = M_2 \dot{v}_{s_k} + M_3 u_{w_k} + M_4 u_{w_k} \dot{v}_{s_k} + M_5 u_{w_k} T_{a_k} + M_6 u_{w_k} T_{a_{k+1}} + M_7 \dot{v}_{s_k} T_{a_k} + M_8 \dot{v}_{s_k} T_{w0_k} + M_9 u_{w_k} \dot{v}_{s_k} T_{a_k} + K \quad (4.28)$$

Por lo tanto, la ecuación 4.28 se reescribe de la siguiente forma:

$$T_{a_{k+1}} = M_1 T_{a_k} + M_{10} u_{w_k} \dot{v}_{s_k} T_{w0_k} + p_k \quad (4.29)$$

Como $T_{a_{k+1}}$ indica un muestreo futuro, entonces la fórmula con la cual se planea trabajar para T_{a_k} queda expresado como:

$$T_{a_k} = M_1 T_{a_{k-1}} + M_9 u_{w_{k-1}} \dot{v}_{s_{k-1}} T_{w0_{k-1}} + p_{k-1} \quad (4.30)$$

Con el fin de minimizar al máximo el efecto de la perturbación, se procede restar la ecuación anterior por la siguiente:

$$T_{a_{k-1}} = M_1 T_{a_{k-2}} + M_9 u_{w_{k-2}} \dot{v}_{s_{k-2}} T_{w0_{k-2}} + p_{k-2} \quad (4.31)$$

El resultado es el siguiente:

$$T_{a_k} - T_{a_{k-1}} = M_1 (T_{a_{k-1}} - T_{a_{k-2}}) + M_9 (u_{w_{k-1}} \dot{v}_{s_{k-1}} T_{w0_{k-1}} - u_{w_{k-2}} \dot{v}_{s_{k-2}} T_{w0_{k-2}}) + p_{k-1} - p_{k-2} \quad (4.32)$$

Por lo tanto, la ecuación para T_{a_k} queda expresado como:

$$T_{a_k} = T_{a_{k-1}} + \alpha \Delta T_{a_{k-1}} + \beta \Delta u_{w_{k-1}} \dot{v}_{s_{k-1}} T_{w0_{k-1}} + \Delta p_{k-1} \quad (4.33)$$

Donde

$$\alpha = M_1$$

$$\beta = M_9$$

$$\Delta T_{a_{k-1}} = T_{a_{k-1}} - T_{a_{k-2}}$$

$$\Delta u_{w_{k-1}} \dot{v}_{s_{k-1}} T_{w0_{k-1}} = u_{w_{k-1}} \dot{v}_{s_{k-1}} T_{w0_{k-1}} - u_{w_{k-2}} \dot{v}_{s_{k-2}} T_{a_{k-2}}$$

$$\Delta p_{k-1} = p_{k-1} - p_{k-2}$$

Asumiendo que el efecto de Δp_{k-1} es una perturbación, entonces:

$$T_{a_k} = T_{a_{k-1}} + \alpha \Delta T_{a_{k-1}} + \beta \Delta u_{w_{k-1}} \dot{v}_{s_{k-1}} T_{w0_{k-1}} \quad (4.34)$$

A continuación se presentarán las estructuras más usadas a la hora de estimar el modelo de un sistema cualquiera.

4.3.2 Tipos de estructuras

Estructura ARMA

Una de las representaciones entrada/salida más simples que existan es el modelo ARMA. Su representación en una ecuación de diferencias es:

$$A(q^{-1})y_k = B(q^{-1})u_{k-T_d} + e_k \quad (4.35)$$

Donde y_k y u_k son las señales de salida y de entrada del sistema respectivamente, T_d corresponde al retardo asociado a la entrada del sistema, e_k es la señal de ruido blanco que entra al sistema como un error directo, y $A(q^{-1})$ y $B(q^{-1})$ representan los polinomios con los componentes auto-regresivos y de media móvil respectivamente:

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + a_2q^{-2} + \dots + a_{n_a}q^{-n_a}$$

$$B(q^{-1}) = b_1q^{-1} + b_2q^{-2} + \dots + b_{n_b}q^{-n_b}$$

El valor de n_a corresponde al orden del polinomio auto-regresivo y físicamente representa el número de polos del sistema entrada/salida, mientras que n_b corresponde al orden del polinomio de media móvil, el cual físicamente representa la suma entre la unidad y el número de ceros presentes en el sistema.

Estructura ARMAX

Este tipo de modelo es similar al modelo ARMA, pero con la diferencia de que incorpora un elemento conocido como media en movimiento (moving average) del ruido blanco, con el cual compensar la desventaja del ARMA residente en la escasez o falta de libertad en la descripción del término de perturbación:

$$A(q^{-1})y_k = B(q^{-1})u_{k-T_d} + C(q^{-1})e_k \quad (4.36)$$

Donde $C(q^{-1})$ es el polinomio que presenta los componentes exógenos, cuyo orden es n_c :

$$C(q^{-1}) = 1 + c_1q^{-1} + c_2q^{-2} + \dots + c_{n_c}q^{-n_c}$$

Estructura ARMA mejorada

Esta estructura modela el ruido del sistema como una autoregresión:

$$A(q^{-1})y_k = B(q^{-1})u_{k-T_d} + \frac{1}{D(q^{-1})}e_k \quad (4.37)$$

Donde $D(q^{-1})$ es un polinomio de orden n_d representado de la siguiente manera:

$$D(q^{-1}) = 1 + d_1 q^{-1} + d_2 q^{-2} + \dots + d_{n_d} q^{-n_d}$$

Estructura ARMAX mejorada

Esta estructura es el resultado de introducir la descripción ARMAX del modelo anterior, presentando así una forma más generalizada del modelo:

$$A(q^{-1})y_k = B(q^{-1})u_{k-T_d} + \frac{c(q^{-1})}{D(q^{-1})} e_k \quad (4.38)$$

Estructura de error de salida

Mejor conocida como estructura OE, propone una relación entre la entrada y una salida no perturbada w_k , donde:

$$w_k = y_k + e_k$$

Con e_k siendo un ruido blanco. Dicha relación puede ser representada como una ecuación de diferencias lineal:

$$F(q^{-1})w_k = B(q^{-1})u_{k-T_d} \quad (4.39)$$

Siendo $F(q^{-1})$ un polinomio de orden n_f

$$F(q^{-1}) = 1 + f_1 q^{-1} + f_2 q^{-2} + \dots + f_{n_f} q^{-n_f}$$

Por lo tanto, la ecuación 4.7 puede reescribirse como:

$$y_k = \frac{B(q^{-1})}{F(q^{-1})} u_{k-T_d} + e_k \quad (4.40)$$

Estructura Box-Jenkins

La estructura Box-Jenkins (BJ) es el resultado de describir el modelo OE en el marco de un modelo ARMA:

$$y_k = \frac{B(q^{-1})}{F(q^{-1})} u_{k-T_d} + \frac{c(q^{-1})}{D(q^{-1})} e_k \quad (4.41)$$

4.3.3 Elección del modelo

Para la elección del modelo se optó por escoger el modelo ARIMA, ya que es a este tipo de modelo corresponde a la formula descrita en la ecuación 4.35. La formula general del modelo ARIMA es:

$$y_k = y_{k-1} + A(q^{-1})\Delta y_{k-1} + B(q^{-1})\Delta u_{k-1} \quad (4.42)$$

Se considera como salida la temperature del quirófano y como señal de entrada el producto entre el caudal del aire, el grado de apertura de agua fría y la temperature del surtidor.

Capítulo 5. Identificación del sistema

5.1. Introducción

En el presente capítulo se explica el proceso de identificación de parámetros usado para este trabajo.

Básicamente se mostrará a detalle el método usado para la estimación paramétrica del sistema en estudio, con sus respectivas fórmulas y esquemas.

5.2. Mínimos cuadrados

El algoritmo de mínimos cuadrados para la identificación de parámetros corresponde a una técnica en donde gracias a un conjunto dado de mediciones del proceso, y el resultado que estos provocan en el siguiente instante de muestreo, se encuentran los parámetros de cada una de las variables de medición del dicho conjunto.^[5]

Primero, se tiene un modelo lineal representado de la siguiente forma:

$$y_i = \sum_{j=1}^d x_{ij} \theta_j + v_i \quad \forall i = 1, \dots, m \quad (5.1)$$

Donde y_i es la i -ésima muestra de salida, x_{ij} representa un componente regresor (el cual puede ser una muestra de entrada o de salida, o bien de una perturbación medible), θ_j es el j -ésimo parámetro del sistema, v_i es una señal de ruido, m es el total de mediciones obtenidas y d es el total de parámetros del sistema.

Matricialmente, la ecuación 5.1 puede reescribirse como:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1d} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{md} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \vdots \\ \theta_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_m \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

La ecuación 4.2 puede compactarse de la siguiente manera:

$$Y = \Phi \theta + V \quad (5.3)$$

El objetivo de los mínimos cuadrados es encontrar el vector de parámetros estimados θ_n que cumpla con la siguiente condición:

$$\theta_n = \arg \min_{\theta \in \mathbb{R}^d} V_n(\theta) = \frac{1}{2} (\Phi \theta - Y)^T (\Phi \theta - Y) \quad (5.4)$$

Dado que el producto $(\Phi \theta - Y)^T (\Phi \theta - Y)$ se considera el equivalente matricial del cuadrado de $\Phi \theta - Y$, entonces el valor de θ_n se da cuando:

$$\frac{dV_n(\theta)}{d\theta} = -(\Phi^T Y) + (\Phi^T \Phi) \theta = 0 \quad (5.5)$$

Por lo tanto, el método de mínimos cuadrados se resume a esta ecuación ^[6]:

$$\Phi^T Y = (\Phi^T \Phi) \theta_n \quad (5.6)$$

$$\hat{\theta}_n = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T Y \quad (5.7)$$

Para el caso de la estructura que se usará en este trabajo y que se describe en la ecuación 4.42, se asume que el orden de los polinomios $A(q^{-1})$ y $B(q^{-1})$ es:

TABLA 5.1: Ordenes de los polinomios autoregresivo y de media móvil

Orden	Valor
n_a (Orden autoregresivo)	1
n_b (Orden de media móvil)	1

Por lo tanto, la matriz de regresores Φ considerando el retardo T_d en la entrada es:

$$\Phi = \begin{bmatrix} y_{2+T_d} & y_{2+T_d} - y_{1+T_d} & u_2 - u_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{m+1+T_d} & y_{m+1+T_d} - y_{m+T_d} & u_{m+1} - u_m \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

Donde m representa el tamaño de la ventana, de tal forma que la matriz Φ tenga m filas.

5.3. Estimación de los parámetros

Cabe destacar que el valor de los parámetros obtenidos varía de acuerdo a la ventana de datos seleccionada. Es por eso que para obtener una estimación más confiable, se busca desplazar la ventana a lo largo del largo total de los datos (son 1621 muestras por cada 5 segundos de la variable extraída).

También hay que tener en cuenta que el valor del determinante de $\Phi^T \Phi$ es bastante importante a la hora de calcular los parámetros, pues el método de mínimos cuadrados es inútil si la matriz $\Phi^T \Phi$ es una matriz no invertible (determinante nulo). Es por eso que se busca forzar a que se realice el cálculo sólo si el valor absoluto de dicho determinante es mayor a un valor específico, el cual debe ser lo bastante alto como para obtener un resultado factible, pero tampoco debe ser exageradamente grande.

Una vez obtenidos todos los valores posibles de los parámetros, se evalúa cuáles cumplen con las condiciones requeridas, es decir, si se ubican dentro del rango permitido. Para este caso en particular, se tienen 3 parámetros: además de α y β , se tiene el coeficiente unitario que acompaña a y_{k-1} . El rango permitido para cada parámetro ya fue mostrado en la tabla 4.1.

Finalmente se procede a realizar una media de todos los parámetros calculados, los cuales serán los parámetros finales del sistema.

La siguiente figura muestra el esquema que describe el algoritmo general usado en este trabajo para la identificación de parámetros. Este algoritmo se encuentra presente en la función “modelo_arx_dif.m”, una función creada en MATLAB cuya función se describirá posteriormente y con detalle en el anexo de este informe.

El algoritmo general se divide en 3 esquemas generales que se mostrarán a continuación.

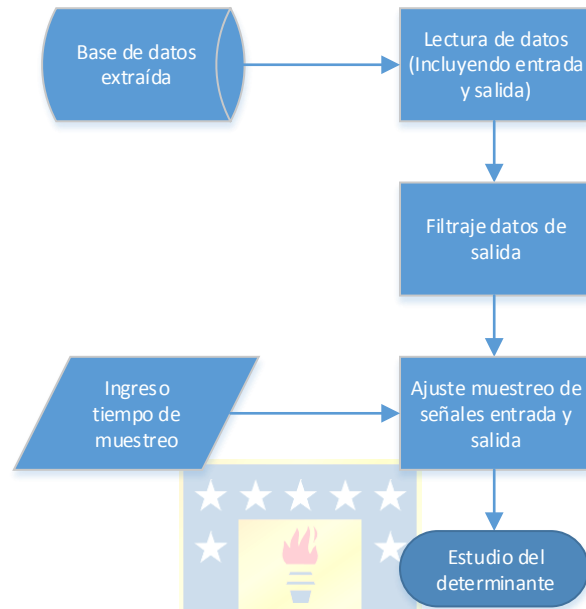


Figura 5.1: Esquema general de la preparación de los datos antes de la estimación del modelo

Durante la preparación de los datos, primero se leen los datos extraídos, los cuales ya fueron expuestos en el capítulo 4. Antes de proceder con el estudio del determinante y posteriormente con la estimación paramétrica, se le aplica a la salida un filtraje para que la estimación no termine afectada de forma negativa. Luego de dicho filtraje se procede a ajustar el tiempo de muestreo de las señales de entrada y de salida del sistema. El valor de dicho tiempo de muestreo lo ingresa el usuario mismo.

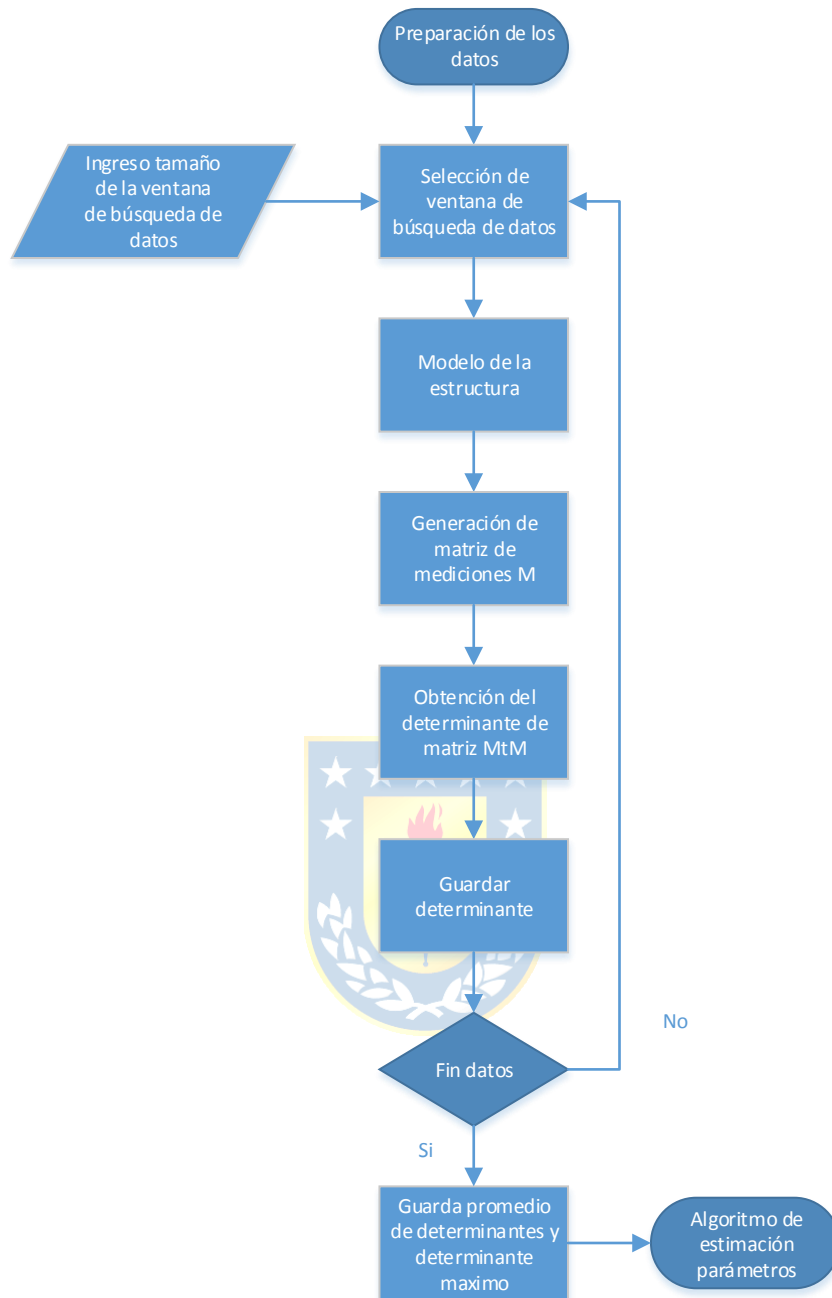


Figura 5.2: Esquema general del estudio de la evolución del determinante de la matriz $\Phi^T \Phi$

En esta parte se procede a seleccionar los datos por medio de una ventana cuyo largo lo elige el usuario, después se procede a construir la matriz de información $\Phi^T \Phi$ en función de lo seleccionado por la ventana de datos. Luego se calcula su determinante. Una vez realizado todo lo anterior, se procede a revisar si se han evaluado todos los datos. Si no se ha hecho esto se procede a desplazar la ventana para seleccionar un nuevo conjunto de datos y realizar el procedimiento de nuevo hasta que la ventana recorra todos los datos. En caso contrario se procede a guardar el

promedio de todos los determinantes obtenidos, así como el determinante máximo calculado. Finalmente se pasa al siguiente paso que es la estimación en sí.

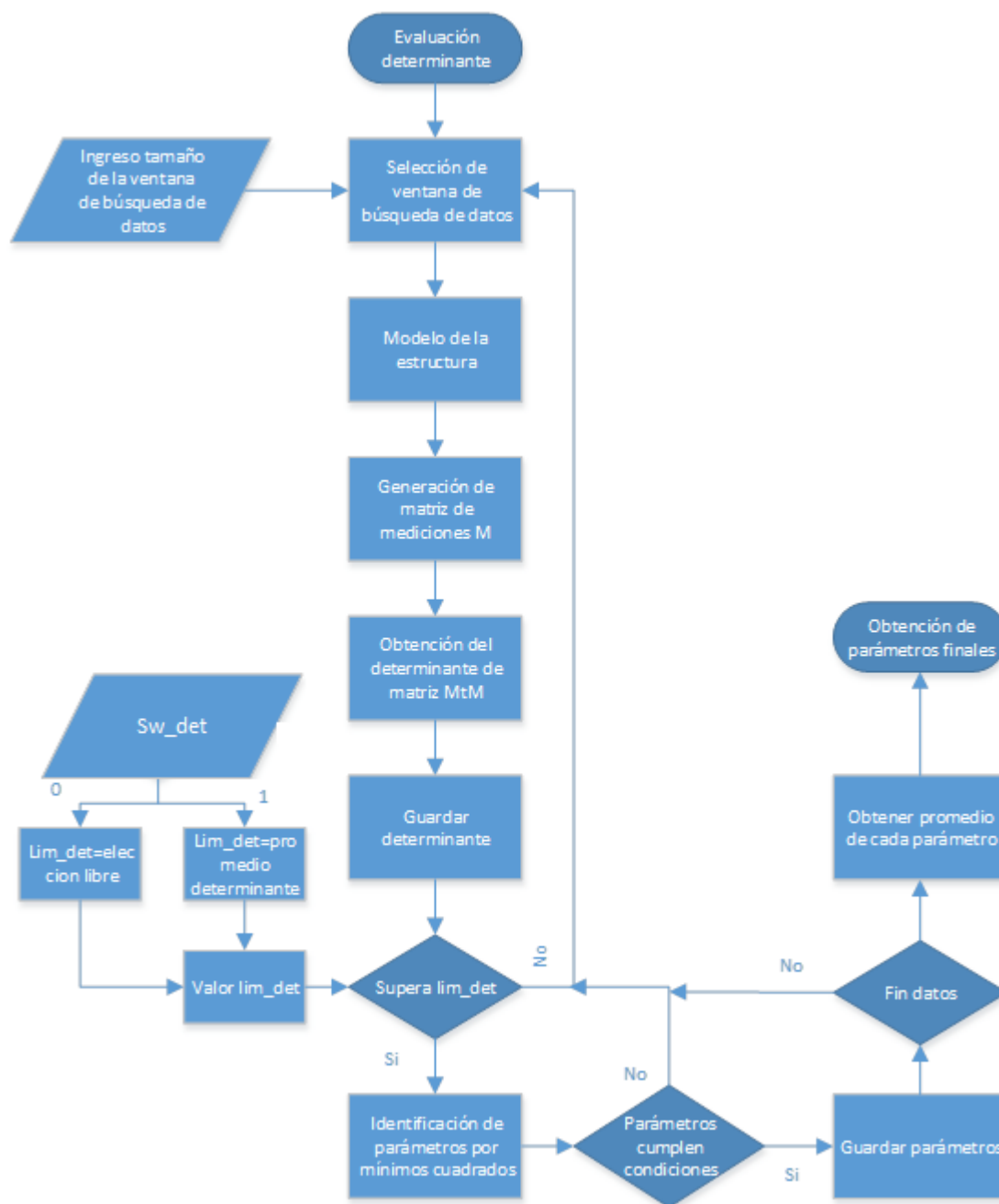


Figura 5.3: Esquema general del algoritmo general de identificación de parámetros

Como puede verse, el procedimiento de identificación comienza realizando el mismo procedimiento mostrado en la figura 5.2. Luego se revisa si el determinante obtenido supera el límite mínimo permitido para realizar la identificación de parámetros por mínimos cuadrados.

El valor del límite mínimo del determinante que debe presentar la matriz de información viene condicionado por el valor del argumento “sw_det”. Si “sw_det” es 1, entonces el límite del

determinante toma el valor del promedio entre todos los determinantes obtenidos por cada paquete de datos seleccionados. De lo contrario el usuario elige el valor que debe tomar dicho límite.

Una vez realizada la identificación paramétrica, se guardan solamente aquellos que cumplan con la condición requerida para cada parámetro (véase tabla 4.1). Una vez que la ventana haya recorrido todos los datos, se obtiene el promedio de todos los valores calculados para cada parámetro del modelo. El resultado de esos promedios es el valor final obtenido para cada parámetro. Recordar que el promedio de un conjunto x de datos viene dado por la siguiente expresión:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (5.9)$$

Donde N es el número total de datos del conjunto x (el cual también puede ser un vector), y x_i es el i -ésimo elemento del conjunto x .

5.4. Programación paralela

Se han mencionado en el capítulo 4 varios modelos de entrada y salida que pueden representar el sistema UTA/Quirófano. Sin embargo no sería muy práctico probar uno por uno cada modelo, especialmente cuando se trabaja con un set de datos de gran tamaño. Es por eso que se propone que cada procesador se encargue de identificar el sistema en función del modelo escogido.

Para resumir, cada CPU se encargaría de realizar la estimación paramétrica para un modelo específico. Por ejemplo, una CPU se encargaría de realizar un modelo de orden 1 para un determinado sistema, mientras que otra CPU se encargaría de realizar un modelo de orden 2 para el mismo. También puede ser que una CPU modele n modelos de orden 1 para un mismo sistema pero con un retardo determinado, mientras que otra CPU haría lo mismo pero con otro retardo. Incluso ambos CPU pueden realizar la identificación paramétrica de un mismo sistema a partir de un mismo modelo, pero que cada uno lo haga a través de un tiempo de muestreo diferente.

La siguiente figura muestra la forma general de la descomposición y asignación de recursos del trabajo realizado.

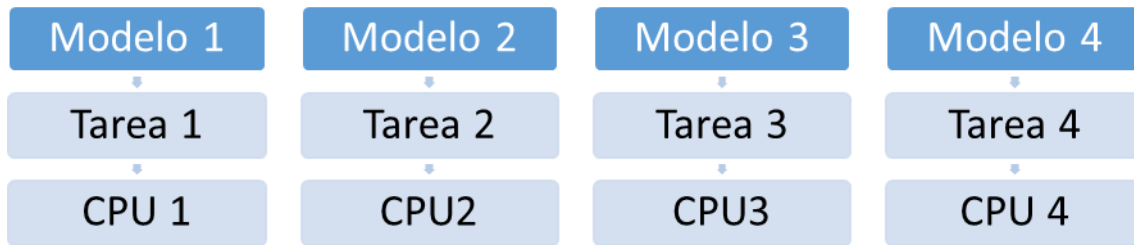


Figura 5.4: Descomposición y asignación de recursos del trabajo de identificación de parámetros (Descripción general)

Para realizar la distribución de recursos, “*MATLAB Parallel Computing Toolbox*” ofrece diversas funciones como “parfor”, el cual consiste básicamente en un ciclo “for” donde cada ciclo es asignado a cada “worker” disponible; o el comando “spmd”, que permite asignar una tarea diferente para cada “worker”

```
parfor i=1:n
    A(i)=i+1;
    b=2*i;
    c=sqrt(b);
end
```

Figura 5.5: Ejemplo de uso del comando “parfor”

En la figura 5.3 se muestra un ejemplo de uso del comando “parfor”, el cual es básicamente un ciclo “for” donde la tarea que se ejecuta en un ciclo i la realiza el “worker” i . Si n es mayor al número de “workers” disponibles, entonces, luego de ejecutado los m ciclos (m es el n° de “workers”) se procede a ejecutar los ciclos restantes.^[11]

```
spmd
    tareas
end
```

Figura 5.6: Ejemplo simple de uso del comando “spmd”

Por su parte, el comando “spmd” (acrónimo de Single Program Multiple Data) simplemente se encarga de que su contenido (las tareas) sean ejecutadas por todos los procesadores disponibles en forma paralela.^[12]

Si lo que se desea es que cada “worker” haga una tarea diferente y en forma paralela, entonces se debe ejecutar el código mostrado en la figura 5.5, donde “labindex” indica el “numero” del procesador.

```

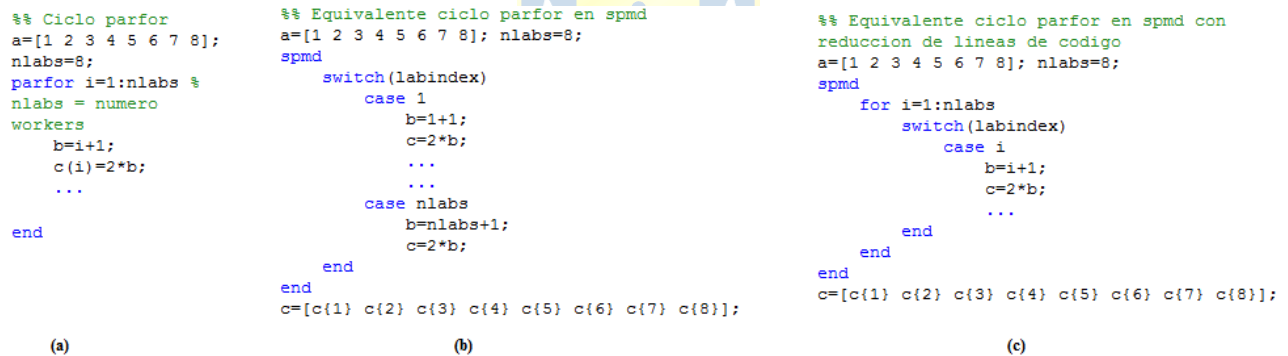
spmd
    switch (labindex)
        case 1
            tarea_1
        case 2
            tarea_2
    end
end

```

Figura 5.7: Ejemplo básico de ejecución paralela de diferentes tareas para cada procesador

Una de las ventajas que presenta “spmd” sobre “parfor” es que permite la asignación de varias tareas a cada procesador, sin embargo tiene la desventaja de no permitir la comunicación entre ellas [7]. Por su parte, “parfor” es más sencillo de trabajar, ya que es prácticamente igual a trabajar con un “for”, pero su principal desventaja radica en las limitaciones que presenta en la indexación de las variables, limitaciones que no presenta “for” en general.

Es por esa razón que para este trabajo se optó por el uso del comando “spmd” por sobre el “parfor” para la paralelización. En la siguiente figura se muestra dos formas de cómo hacer que el comando “spmd” funcione como un “parfor”, lo cual es básicamente la manera en la que funciona el programa a trabajar:



```

%% Ciclo parfor
a=[1 2 3 4 5 6 7 8];
nlabs=8;
parfor i=1:nlabs %
nlabs = numero
workers
    b=i+1;
    c(i)=2*b;
    ...
end

%% Equivalente ciclo parfor en spmd
a=[1 2 3 4 5 6 7 8]; nlabs=8;
spmd
    switch (labindex)
        case 1
            b=1+1;
            c=2*b;
            ...
        case nlabs
            b=nlabs+1;
            c=2*b;
    end
end
c=[c{1} c{2} c{3} c{4} c{5} c{6} c{7} c{8}];

%% Equivalente ciclo parfor en spmd con
reduccion de lineas de codigo
a=[1 2 3 4 5 6 7 8]; nlabs=8;
spmd
    for i=1:nlabs
        switch (labindex)
            case i
                b=i+1;
                c=2*b;
                ...
            end
        end
    end
end
c=[c{1} c{2} c{3} c{4} c{5} c{6} c{7} c{8}];

```

Figura 5.8: Usos de spmd como parfor: (a) Parfor simple (b) Uso de spmd como parfor (c) Ídem. Con menos líneas de código

En particular, para la metodología de identificación se utilizará el código mostrado en la figura 5.8c, con tal de ahorrar líneas de código de sobra.

5.5. Metodología de identificación

5.5.1 Criterios

Con el fin de encontrar el modelo que mejor represente al sistema descrito en el presente informe se utilizaron 3 criterios posibles:

- Menor error cuadrático medio (ECM).
- Menor promedio general entre las varianzas de los parámetros.
- Mejor equilibrio ECM/varianzas (que tenga tanto un ECM menor como menor varianza entre las variables).

Para cada uno de ellos existe un índice de calidad asociado, los cuales se describirán más adelante en la sección 5.5.3 de este capítulo.

5.5.2 Valores usados para la identificación

Con todo eso en mente se usaron los siguientes valores para T_d (numero de retardos), T_0 (numero de muestreos de x segundos, 5 en este caso), el tamaño de la ventana m y el límite permitido para el determinante de la matriz $\Phi^T \Phi$. Esas son las variables que se quieren manejar, y se describen cada una en las siguientes tablas:

TABLA 5.2: Número de retardos usados

Retardo	Valor
T_{d1}	0
T_{d2}	1
T_{d3}	2
T_{d4}	3
T_{d5}	4
T_{d6}	5
T_{d7}	6
T_{d8}	7

TABLA 5.3: Número de muestreos de 5 seg. usados

Tiempo de muestreo	Valor	Tiempo de muestreo (seg.)
T_{01}	1	5 seg
T_{02}	3	15 seg
T_{03}	5	25 seg
T_{04}	7	35 seg

TABLA 5.4: Tamaño ventanas usadas

Ventana	tamaño
m_1	25
m_2	50
m_3	100

TABLA 5.5: Límites mínimos requeridos para el determinante

Determinante mínimo de $\Phi^T \Phi$	Valor	Switch Determinante
lim_{det1}	10	0
lim_{det2}	100	0
lim_{det3}	100000	0
lim_{det4}	$\det(\Phi^T \Phi)$	1

También se asumieron valores fijos usados en la identificación, aparte de los órdenes de los polinomios mostrados en la tabla 5.1 y los rangos permitidos para cada parámetro (mostrados en la tabla 5.2), también se tienen los siguientes valores:

TABLA 5.6: Variables fijas

Variable	Valor
α (parámetro de filtraje de salida)	0.40
g_r (Ganancia del ruido)	0.01
α_{par} (filtro parámetros)	1

Para el proceso de identificación se usaron las siguientes herramientas:

- Computador multiprocesador Intel® Core™ i7 3.07 GHz de 8 núcleos (4 reales y 4 virtuales)
- MATLAB Versión 8.3 (R2014a), junto con la herramienta *Parallel Computing Toolbox*.

Como se tienen 8 valores de número de retardos, y se tienen disponibles 8 procesadores, entonces se programa el código de tal forma que cada “worker” de MATLAB realice la tarea de identificación para cada T_d .

```

% variables a manipular
nr=0:7; % numero de retardos
t0=1:2:7; % numero de muestreos de 5 segundos (tiempo de muestreo)
ven=[25 50 100]; % ventana de datos
limit_det=[1E1 1E2 1E5 1E5]; % limite minimo del determinante permitido
sw_lim_det=[0 0 0 1];

%% Algoritmo de estimacion parametrica
tic
spmd
    for i=1:length(nr)
        switch(labindex)
            case i
                for j=1:length(t0)
                    for ii=1:length(ven)
                        for jj=1:length(limit_det)
                            s_ldet=sw_lim_det(jj);ldet=limit_det(jj);
                            m=ven(ii)+nmax+nr;nt0=t0(j);ntd=nr(i);
                            [detMtM,m_det,theta,th_est,var_par,std_par,ye,e,ecm,pp]=...
                                modelo_arx_dif(y1,u2,s_ldet,ldet,nt0,na,nb,ntd,m,limits,alpha_par);
                            end
                        end
                    end
                end
            end
        end
    end
end

```

Figura 5.9: Distribución de recursos en función de T_0

En la figura 5.9, se muestra cómo se programa de tal forma que cada procesador se encarga de hacer la combinación T_0 - m - lim_{det} para un específico T_d . Si se hiciera todo el proceso en un solo “worker”, se tendría $8 \times 4 \times 3 \times 4 = 288$ combinaciones posibles, lo cual indica un largo tiempo de ejecución de la rutina. Empleando “spmd” cada “worker” realiza $4 \times 3 \times 4 = 48$ combinaciones posibles realizadas paralelamente, reduciendo así el tiempo de modelación.

5.5.3 Obtención y distribución del ECM, la media de varianza y la mejor relación ECM/varianza

Ahora se procede a explicar cómo se elige el modelo considerando los criterios enunciados anteriormente.

Para la elección del modelo adecuado se usaron 3 índices de calidad del modelo, uno para cada uno de los criterios enunciados en el punto 5.5.1.

Índice de calidad 1: Error cuadrático medio (ECM)

Éste es el índice de calidad que más se usa. De hecho, está estrechamente relacionado con la técnica de mínimos cuadrados. El ECM se calcula de la siguiente manera:

$$ECM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (5.10)$$

Donde N es el número total de muestras de salida, mientras que y_i y \hat{y}_i representan el i -ésimo elemento de la señal de salida real y estimada respectivamente.

Índice de calidad 2: Varianza general de los parámetros

Aquí se considera la varianza de cada parámetro estimado del modelo. Se sabe que la fórmula de la varianza de un vector \mathbf{x} es la siguiente:

$$var(\mathbf{x}) = \sigma_x^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \quad (5.11)$$

Donde N corresponde al número total de elementos del vector \mathbf{x} , x_i corresponde al i -ésimo elemento de \mathbf{x} y \bar{x} corresponde al promedio de \mathbf{x} . En este caso \mathbf{x} sería el vector de parámetros estimados $\boldsymbol{\theta}$. Para poder cuantificar la varianza general de $\boldsymbol{\theta}$ se procede a calcular el promedio de todas las varianzas obtenidas para cada parámetro.

$$\overline{\sigma^2} = \frac{1}{d} \sum_{i=1}^d \sigma_{\theta_i}^2 \quad (5.12)$$

Donde d es el número de parámetros del modelo, y $\sigma_{\theta_i}^2$ corresponde a la varianza del parámetro θ_i .

Índice de calidad 3: Relación ECM/Varianza

Generalmente se desea que el modelo estimado del sistema presente una mejor relación de equilibrio entre el ECM y la varianza, es decir, que no solamente se busque un menor error cuadrático medio para el modelo sino que también se desea que cada uno de sus parámetros presenten la menor varianza posible. Para poder cuantificar esa relación se construye un vector de 2 elementos denominado \mathbf{v} , el cual contiene 2 elementos: el error cuadrático medio y la varianza general de los parámetros.

$$\mathbf{v} = [ECM \ \overline{\sigma^2}] \quad (5.13)$$

Una vez construido ese vector se procede a calcular su norma.

$$\|\mathbf{v}\| = \sqrt{ECM^2 + (\overline{\sigma^2})^2} \quad (5.14)$$

Así, el modelo que presenta en ECM y una varianza general menores será aquel que presente la menor norma de \mathbf{v} .

Elección del modelo con el mejor índice de calidad.

Dentro del ciclo “for” más interno del código se toman el error cuadrático medio y el vector de varianzas obtenidas por la función “modelo_arx_dif”, el cual se encarga de realizar la estimación paramétrica. Con ellas se calculan todos los índices de calidad descritos en las ecuaciones 5.10, 5.12 y 5.14.

Luego de realizado eso, se procede a construir 3 matrices de celdas (variables tipo “cell” en MATLAB, donde cada celda toma un valor escalar, un vector, o bien una matriz u otra variable “cell”, dependiendo de lo que se piense hacer) de orden $n_{ven} \times n_{det}$, donde n_{ven} y n_{det} indican el número de valores usados para la ventana y el límite del determinante respectivamente. Cada uno contiene los ECM, la media de varianzas y la norma de \mathbf{v} tomadas para un valor específico de T_0 y T_d . La función está programada para que en caso de que ocurra el caso de que el límite del determinante escogido supere el determinante máximo, se entreguen los parámetros, varianza, desviación estándar, salida estimada, error de estimación y ECM entreguen valor vacío. En el caso, ECM, la media de varianzas y la norma de \mathbf{v} toman el valor de 100 para cada combinación que entregue dicho error.

Una vez obtenidas estas matrices, se crean 3 matrices de celdas de orden $1 \times n_{t0}$, (una para cada uno de los casos enunciados en el punto 5.5.1) donde n_{t0} corresponde al número de valores usados para el tiempo de muestreo T_0 . En cada una de esas celdas se guarda la matriz de celdas descritas anteriormente pero convertidas en matrices normales, obtenidas para una determinada combinación T_0-T_d . La conversión de matriz de celdas a matriz normal se realiza mediante la función “cell2mat” de MATLAB. Específicamente la matriz de celdas para el caso de menor ECM sirve para alojar en cada una de ellas la matriz de ECM obtenida para cada T_0 . De forma similar se usan las matrices de celdas creadas para los otros 5 casos.

La figura 5.10 explica la forma en que se crean las matrices mencionadas, así como las matrices de celdas.

```

spmd
  for i=1:length(nr)
    switch(labindex)
      case i
        for j=1:length(t0)
          for ii=1:length(ven)
            for jj=1:length(limit_det)

              ... % resto del código
              if isempty(ecm) || isempty(var_par)
                ECM=100;
                meanvarpar=100;
                normECMvarpar=100;
              else
                ECM=ecm; % error cuadratico medio
                meanvarpar=mean(var_par); % promedio varianzas
                normECMvarpar=norm([ECM meanvarpar],2); % norma ECM/varianzas
              end
              C1_ECM{ii,jj}=ECM;
              C1_meanvarpar{ii,jj}=meanvarpar;
              C1_normECMvarpar{ii,jj}=normECMvarpar;
            end
          end
          C2_ECM{j}=cell2mat(C1_ECM);
          C2_meanvarpar{j}=cell2mat(C1_meanvarpar);
          C2_normECMvarpar{j}=cell2mat(C1_normECMvarpar);
        end
      end
    end
  end
end

```

Figura 5.10: Creacion de matrices y matrices de celdas de ECM, promedio de varianzas y norma ECM/varianza.

Cabe destacar que dicha ejecución se realiza en cada uno de los procesadores disponibles, por lo que se debe juntar todos los resultados creados en una gran supermatriz de orden $(n_{id} * n_{ven}) \times (n_{t0} * n_{det})$, donde n_{id} y n_{t0} son el total de valores usados para T_d y T_0 respectivamente. La siguiente figura ilustra la supermatriz que se quiere crear, ilustrada en forma de tabla

		1			...			n_{t0}		
		1	...	n_{det}	1	...	n_{det}	1	...	n_{det}
1	1	$M_{1,1}$	...	$M_{1,n_{det}}$	...			...		$M_{1,n_{t0}*n_{det}}$

	n_{ven}	$M_{n_{ven},1}$		$M_{n_{ven},n_{det}}$						
...	1	...			...	
	...									
	n_{ven}									
n_{td}	1									

	n_{ven}	$M_{n_{td}*n_{ven},1}$	...					...		$M_{n_{td}*n_{ven},n_{t0}*n_{det}}$

Figura 5.11: Ilustración de la supermatriz de orden $(n_{td}*n_{ven}) \times (n_{t0}*n_{det})$

Para realizar eso primero se crea una supermatriz de celdas de orden $n_{td} \times n_{t0}$. Son 3 para cada criterio. Para ello se llama a la siguiente línea mostrada en la siguiente figura:

```
CM_ECM=[C2_ECM{1};C2_ECM{2};C2_ECM{3};C2_ECM{4};C2_ECM{5};C2_ECM{6};C2_ECM{7};C2_ECM{8}];
CM_meanvarpar=[C2_meanvarpar{1};C2_meanvarpar{2};C2_meanvarpar{3};C2_meanvarpar{4};...
C2_meanvarpar{5};C2_meanvarpar{6};C2_meanvarpar{7};C2_meanvarpar{8}];
CM_normECMvarpar=[C2_normECMvarpar{1};C2_normECMvarpar{2};C2_normECMvarpar{3};C2_normECMvarpar{4};...
C2_normECMvarpar{5};C2_normECMvarpar{6};C2_normECMvarpar{7};C2_normECMvarpar{8}];
```

Figura 5.12: Creación de la supermatriz de celdas

Cabe señalar que las variables “C2_ECM{1}” entre otras mostradas en la figura no son variables tipo “cell”, sino que son del tipo “composite”. La variable “C2_ECM{1}” en particular corresponde a la matriz de celdas de ECM de orden $1 \times n_{t0}$ (llamado “C2_ECM”) obtenido en el “worker” n°1, de acuerdo al argumento mostrado dentro de los corchetes.

Para montar la supermatriz mostrada en la figura 5.8 se juntan todas las variables “composite” C2_ECM{i} en una matriz tipo columna, tal y como se muestra en la figura 5.12. Se han de crear 3 supermatrices tipo “cell” para cada uno de los criterios ya enunciados.

Luego, para convertir esas supermatrices de celdas en supermatrices numéricas se recurre a la función “cell2mat” de MATLAB, cuya función ya se describió anteriormente. Cabe destacar que

la función “cell2mat” sólo funciona si el contenido de cada celda de la variable “cell” a transformar no es también del tipo “cell”.

Realizada ya dicha tarea se procede a encontrar el menor valor de ECM, promedio de varianzas y norma ECM/varianza con el fin de encontrar el mejor modelo de acuerdo a cada uno de los criterios señalados anteriormente. Como se trabaja con una matriz se debe recurrir 2 veces a la función “min” de MATLAB.

Una vez encontrado el menor valor, se procede a recorrer la matriz correspondiente. Una vez encontrado el elemento que entrega el menor valor el código entrega el valor de la fila y la columna en donde se encuentra dicho valor. Eso se hace montando 2 ciclos “for”, uno dentro de otro.

```

% % encontrar el menor error cuadratico medio
M_ECM=cell2mat(CM_ECM); % matriz de (na*t0max)x(nb*tdmax)
min_ECM=min(min(M_ECM));

% % analizar cual es la fila y la columna de M_ECM que genera tal error
% % cuadratico
for ii=1:size(M_ECM,1)
    for jj=1:size(M_ECM,2)
        if M_ECM(ii,jj)==min_ECM
            ik=ii;jk=jj;
        end
    end
end
end

```

Figura 5.13: Creación de la supermatriz de ECM y búsqueda de la fila y la columna del menor valor de la misma

Ahora se procede a obtener la combinación $T_d-T_0-m-lim_{det}$ que entrega dicho valor. Primero de inicializan los valores de i_{nr} , i_{ven} , j_{t0} y j_{det} , los cuales son 1, 0, 1 y 0 respectivamente. Luego se montan 2 ciclos “for” separados, cada uno con i_k y j_k ciclos respectivamente, donde i_k y j_k son el valor de la fila y la columna de la supermatriz donde se encuentra el menor valor para cada criterio. Dentro de cada ciclo “for” se le suma una unidad a i_{ven} y j_{det} respectivamente y si dichas sumas sobrepasan a n_{ven} y n_{det} respectivamente, entonces i_{ven} y j_{det} vuelven a 1 y se le suma una unidad a i_{nr} y a j_{t0} respectivamente.

Cabe destacar que i_{nr} y i_{ven} corresponden respectivamente al i -ésimo elemento del vector de números de retardos y de valores de la ventana, y j_{t0} y j_{det} corresponden respectivamente al j -ésimo elemento del vector de números de muestreos y de valores del limite mínimo del determinante de $\Phi^T \Phi$.


```

%% encontrar la combinacion nr-t0-ven-lim_det que genera tal ECM
i_nr=1; j_t0=1; % Inicializacion fila y columna exterior
i_ven=0; j_det=0; % inicializacion fila y columna interior
for i=1:ik
    i_ven=i_ven+1;
    if i_ven>length(ven)
        i_ven=1;
        i_nr=i_nr+1;
    end
end
end

for j=1:jk
    j_det=j_det+1;
    if j_det>length(limit_det)
        j_det=1;
        j_t0=j_t0+1;
    end
end
end

%% Resultados
v12=[nr(i_nr) t0(j_t0) ven(i_ven) limit_det(j_det)];

```

Figura 5.14: Búsqueda de la combinación de número de muestreos, n° de retardos, tamaño de la ventana y límite mínimo del determinante que genera el menor ECM

Una vez encontradas dichas combinaciones que cumplen con cada uno de los criterios señalados previamente, se guardan en 3 vectores diferentes, uno para cada criterio.

Cabe destacar que también para cada criterio se guarda el valor que debe tener la variable sw_det . Si $j_{det}=4$, entonces sw_det vale 1 (pues $j_{det}=4$ indica que el criterio correspondiente se cumple para cuando el límite mínimo que requiere el determinante para realizar la identificación por mínimos cuadrados es igual al promedio de los determinantes obtenidos). De lo contrario vale 0.

Capítulo 6. Resultados

A continuación se mostrarán los resultados obtenidos de la simulación. Sólo se mostrarán los casos en donde se cumple cada uno de los criterios señalados anteriormente en el capítulo 5.

6.1. Modelo con menor error cuadrático medio

El menor ECM obtenido es de $2.347 \cdot 10^{-4}$, y la combinación $T_d-T_0-m-lim_{det}$ que lo entrega es la siguiente:

TABLA 6.1: Combinación $T_d-T_0-m-lim_{det}$ para menor ECM

Parámetro	Valor	Valor en segundos
T_0	1	5 Seg
T_d	6	30 Seg
m	100	- -
lim_{det}	100000	- -

Con ello se obtienen los siguientes parámetros, con sus respectivas varianzas y desviaciones estándar

TABLA 6.2: Parámetros estimados, varianzas y desviaciones estándar para menor ECM

Parámetro	Valor estimado	Varianza	Desviación estándar
θ_1	0,999908	$3,10 \cdot 10^{-09}$	$5,57 \cdot 10^{-05}$
θ_2	0,085342	0,00298	0,054589
θ_3	$-2,81 \cdot 10^{-06}$	$2,62 \cdot 10^{-12}$	$1,62 \cdot 10^{-06}$

Los gráficos obtenidos son los siguientes:

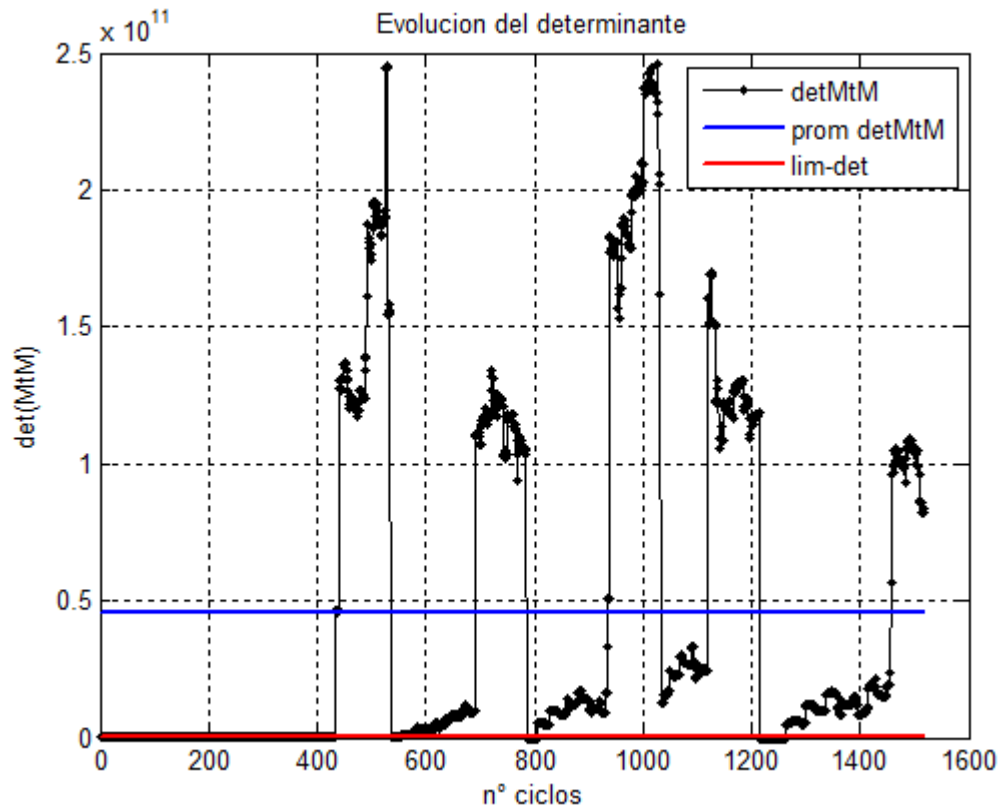


Figura 6.1: Evolución del determinante de $\Phi^T \Phi$ para modelo de menor ECM

Como puede observarse en este gráfico, a medida que se desplaza la ventana de datos el determinante de la matriz de información alcanza valores bastante altos conforme aumenta el valor de la entrada del sistema (véase Figura 4.1b). Esto significa que los valores de los parámetros del modelo más fiables son aquellos en donde la entrada del sistema adquiera un valor significativo. Sin embargo, cuando se buscó cuál modelo tenía el menor ECM, el mínimo determinante permitido usado para obtener tal modelo es de apenas 100000, un número bastante insignificante si se lo compara con el promedio general de los determinantes obtenidos.

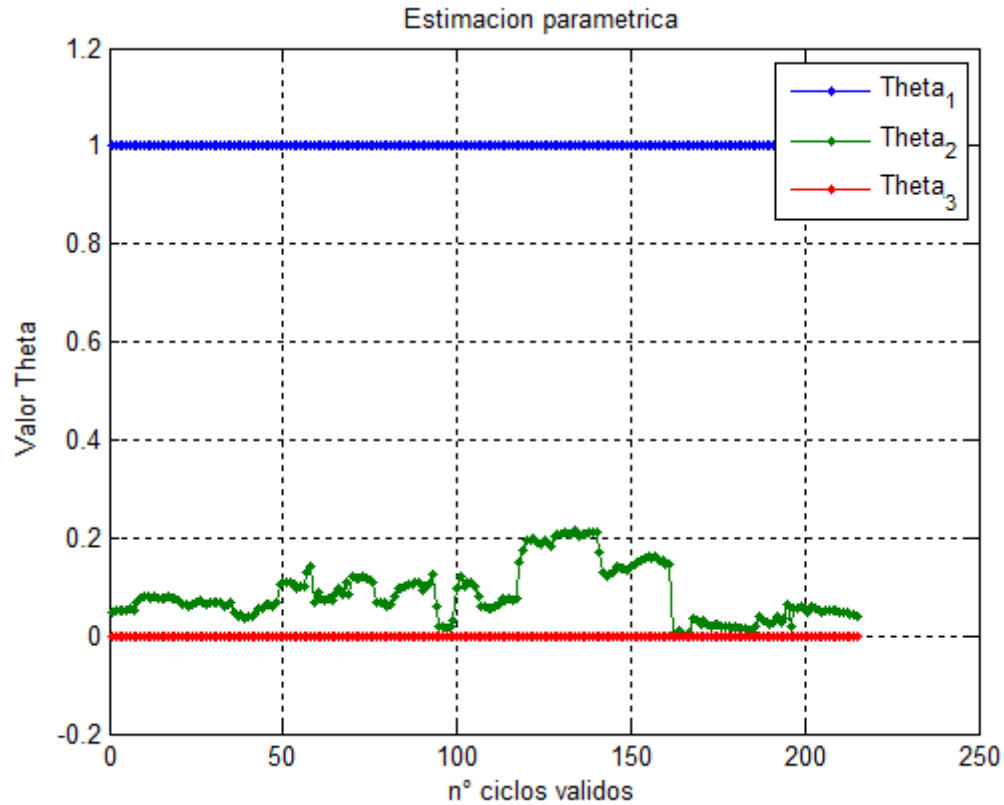


Figura 6.2: Evolución de la estimación paramétrica para modelo de menor ECM

Aquí puede verse que han sido varios los valores obtenidos para el primer parámetro, así como los obtenidos para el segundo y tercer parámetros, que cumplen con las condiciones expuestas en la tabla 4.1, aunque en el caso de θ_3 no es tan evidente debido a que es demasiado pequeño. Sin embargo, puede evidenciarse en el gráfico de θ_2 que existe una gran varianza en dicho parámetro, pues una oscilación entre 0.1 y 0.2 puede considerarse como una varianza muy grande si se considera que el valor real de θ_2 se encuentra entre 0 y 1.

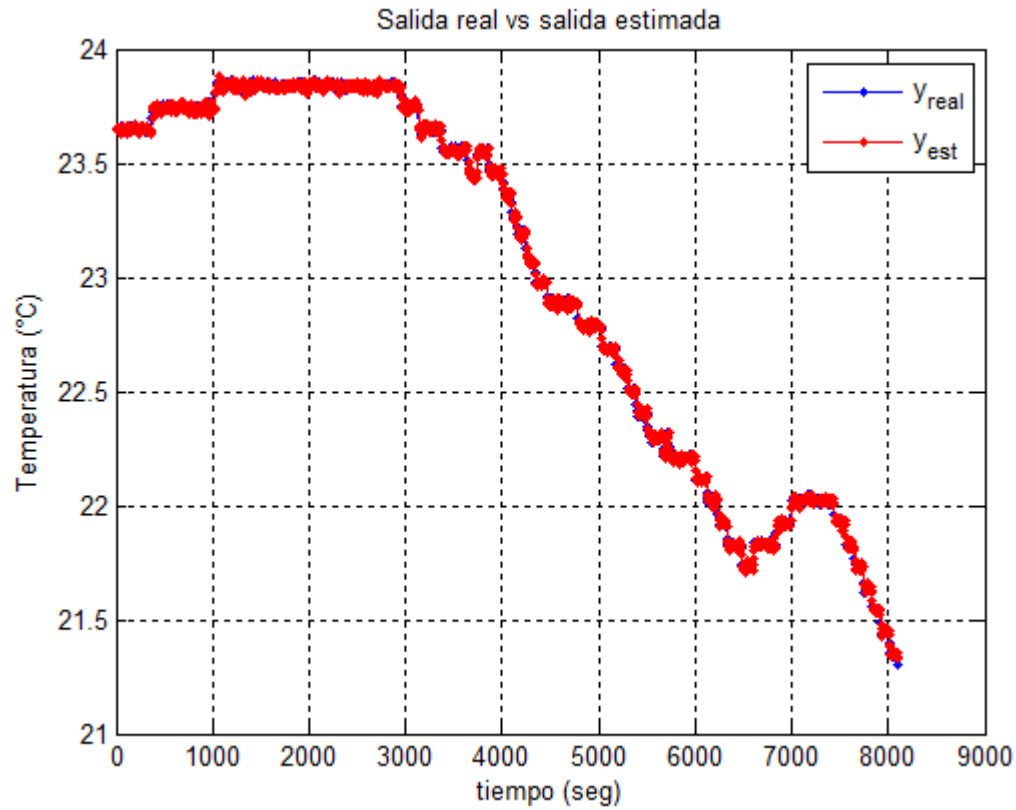


Figura 6.3: Comparación entre la salida real y la estimada para modelo de menor ECM

Aquí puede observarse que con los valores estimados de los parámetros (los cuales se muestran en la tabla 6.2), se obtiene una muy buena estimación en la salida del modelo obtenido para el sistema, pues este modelo es el que menor error cuadrático medio presenta.

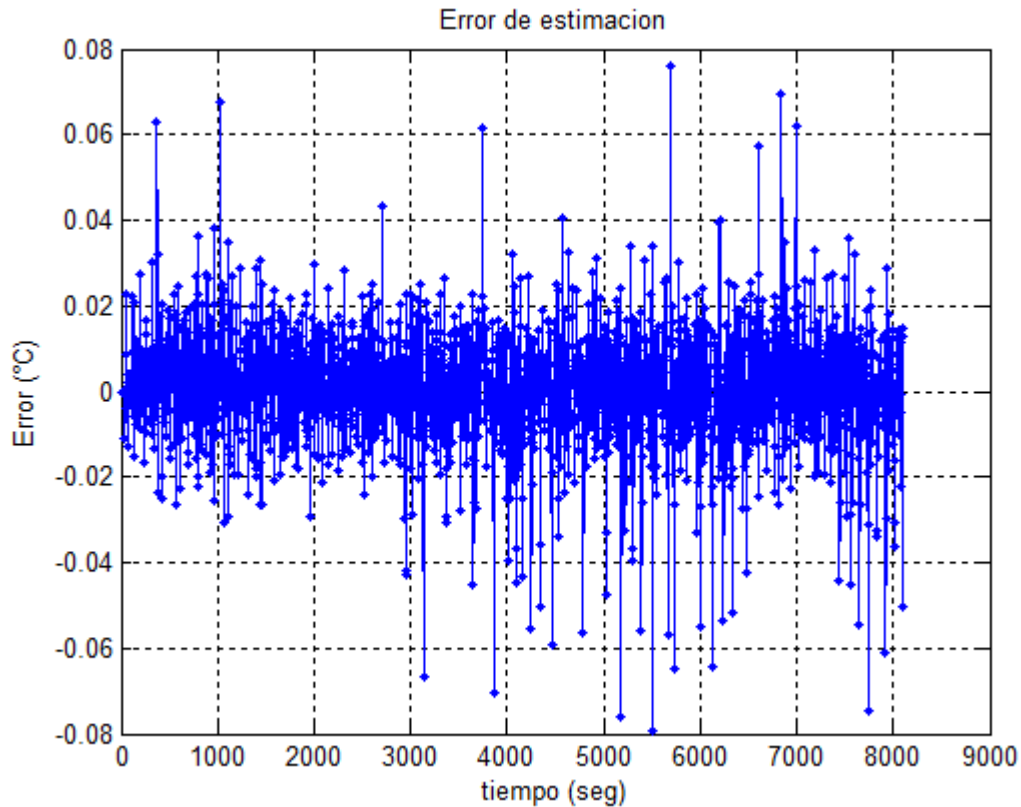


Figura 6.4: Error de estimación para modelo de menor ECM

Analizando el error de estimación, se puede apreciar que su amplitud no sobrepasa los 0.08 °C, y además, la mayoría de las muestras de dicho error se concentran entre -0.02 y 0.02 °C. Esto indica que el modelo obtenido representa de manera fidedigna al sistema.

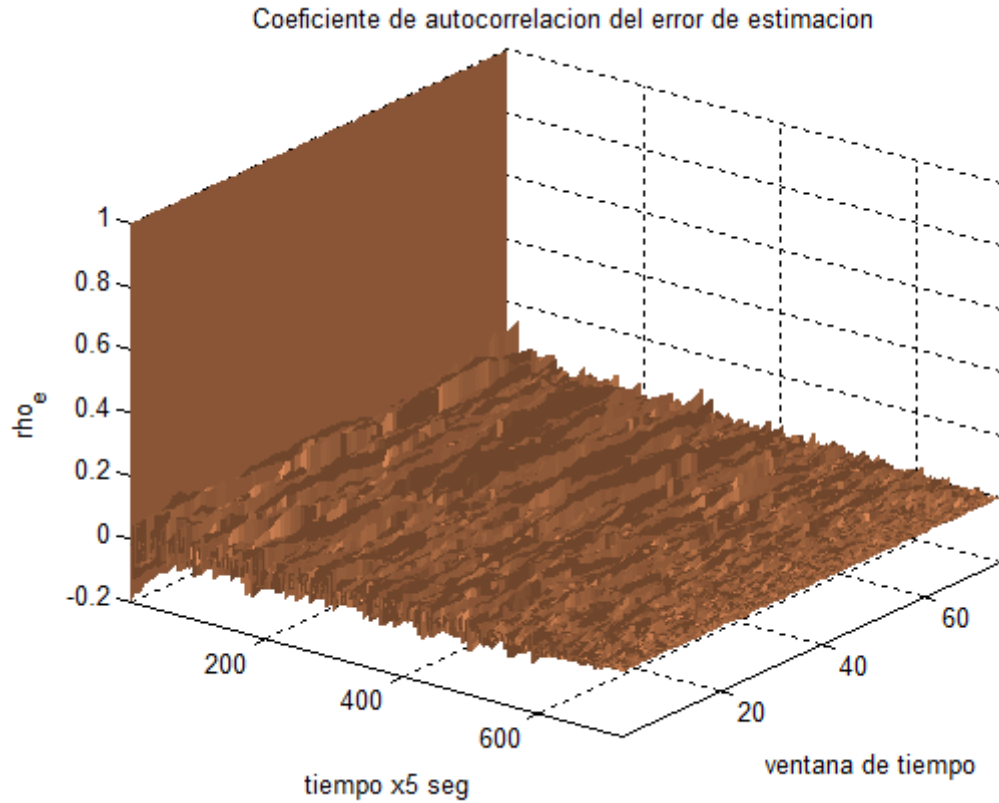


Figura 6.5: Autocorrelación del error de estimación para modelo de menor ECM

La autocorrelación del error sirve para observar cuánta información pierde el modelo estimado con respecto al sistema real. En este caso se observa muy poca pérdida de información, lo cual corrobora lo observado en las figuras 6.3 y 6.4.

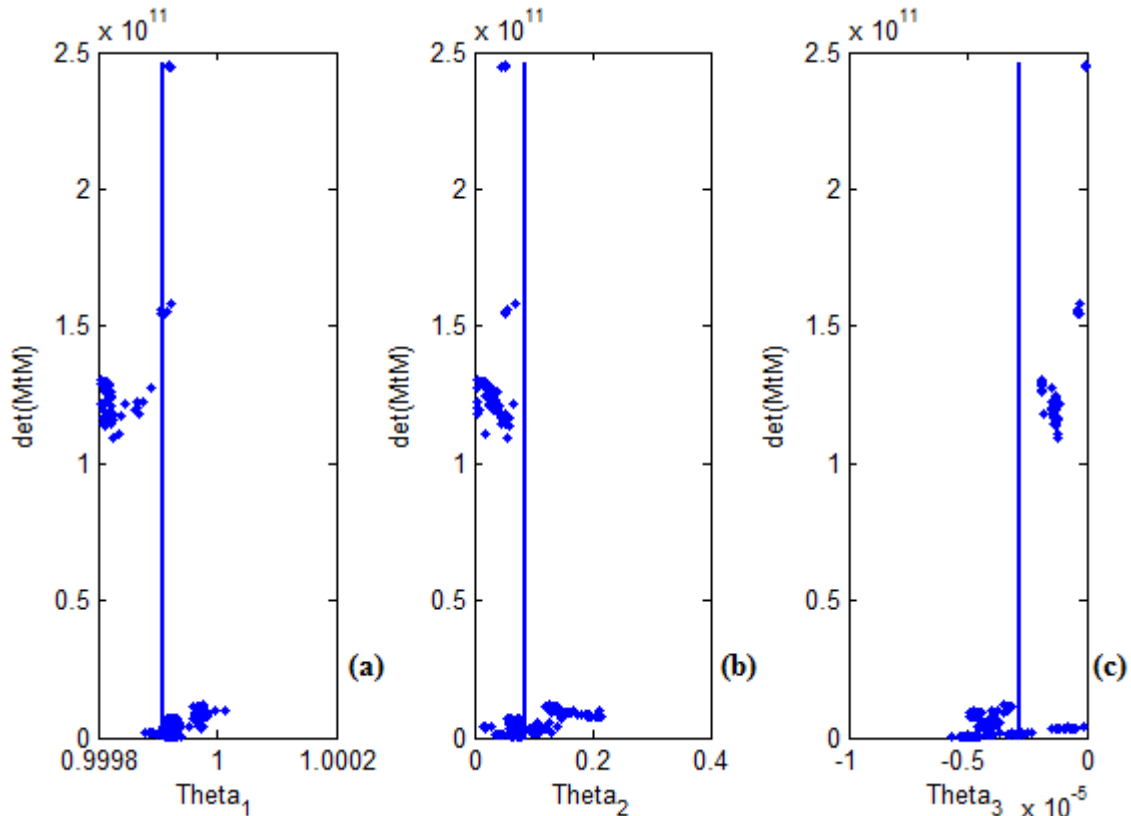


Figura 6.6: Análisis parámetro v/s determinante para modelo de menor ECM. (a) θ_1 (b) θ_2 (c) θ_3

Observando de cerca el análisis parámetro vs determinante, puede verse que una cantidad considerable de puntos se concentra casi alrededor del valor estimado aunque con una ligera dispersión, pero todo eso ocurre en la base del gráfico, donde se dan determinantes menores a $5 \cdot 10^{10}$. También se observa otro grupo concentrado de puntos donde el determinante toma valores de aproximadamente $1 \cdot 10^{11}$ y $1.5 \cdot 10^{11}$, pero no se juntan alrededor del parámetro estimado. Todo eso indica que aún existe una varianza lo suficientemente significativa como para afectar el resultado, especialmente en el segundo parámetro, cosa que se evidencia en la figura 6.2.

6.2. Modelo con menor varianza general

La menor varianza obtenida presenta un valor de casi cero, y lo da la siguiente combinación $T_d - T_0 - m - \lim_{det}$:

TABLA 6.3: Combinación T_d - T_0 - m - lim_{det} para menor varianza general

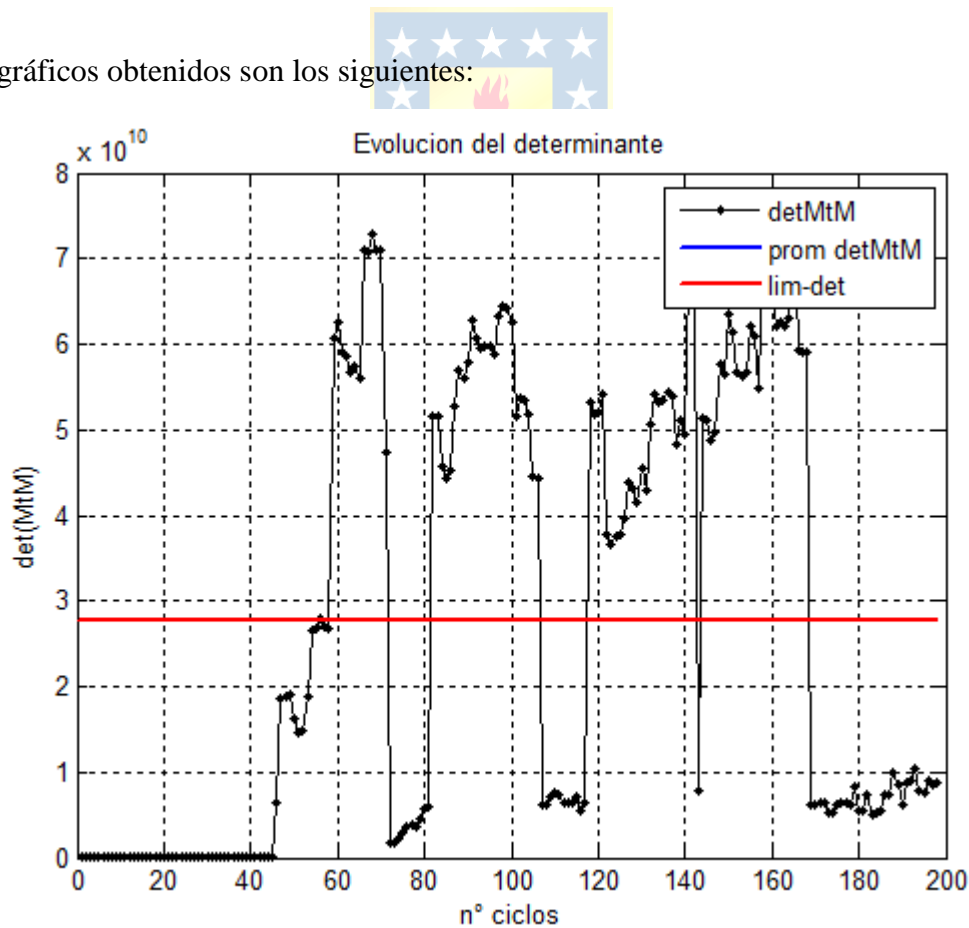
Parámetro	Valor	Valor en segundos
T_0	7	35 Seg
T_d	7	245 Seg
m	25	- -
lim_{det}	$5 \cdot 10^{10}$	- -

Con ello se obtienen los siguientes parámetros, con sus respectivas varianzas y desviaciones estándar

TABLA 6.4: Parámetros estimados, varianzas y desviaciones estándar para menor varianza general

Parámetro	Valor estimado	Varianza	Desviación estándar
θ_1	0,998984	0	0
θ_2	0,039755	$3.756 \cdot 10^{-4}$	0.0194
θ_3	$-1,37 \cdot 10^{-07}$	0	0

Los gráficos obtenidos son los siguientes:


Figura 6.7: Evolución del determinante de $\Phi^T \Phi$ para modelo de menor varianza general

Al observar el gráfico de la evolución del determinante de la matriz de información conforme se desplaza la ventana, se evidencia que sus valores máximos apenas superan los $7 \cdot 10^{10}$, aproximadamente un 40% más alto que el promedio de los determinantes obtenidos en el caso anterior. Eso se debe a que se el valor del tiempo de muestreo del modelo que entrega la menor varianza general de los parámetros es muy grande (unos 35 segundos de muestreo) si se lo compara con el obtenido para el modelo con menor ECM. Al igual que en el caso anterior, los valores altos que alcanza el determinante llegan cuando la entrada crece, pero presenta una distribución diferente, el cual es resultado del tiempo de muestreo usado.

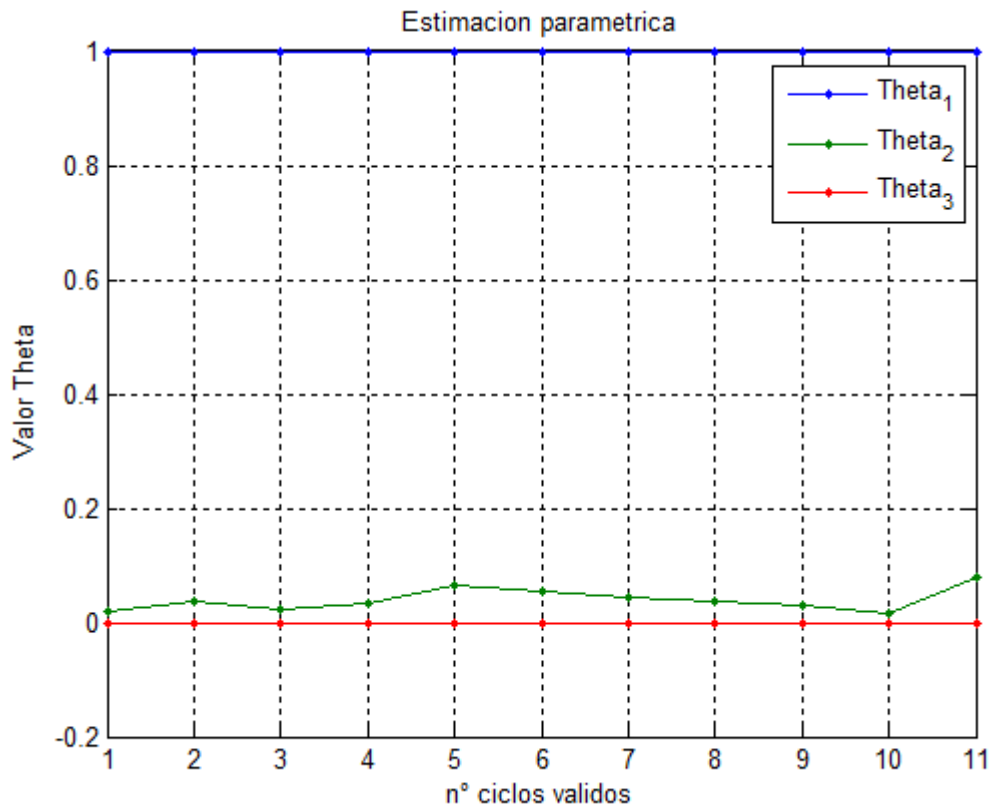


Figura 6.8: Evolución de la estimación paramétrica para modelo de menor varianza general

Al usar la combinación $T_d-T_0-m-lim_{det}$ que entrega el modelo con la menor varianza general de los parámetros, se obtienen menos puntos en donde se cumple la condición impuesta para los parámetros estimados. Sin embargo, eso también entrega unos parámetros más consistentes, como se ve en la figura 6.8. Además, se observa claramente que las varianzas del primer y tercer parámetro son nulas, lo cual explica el porqué se entregó una menor varianza paramétrica general.

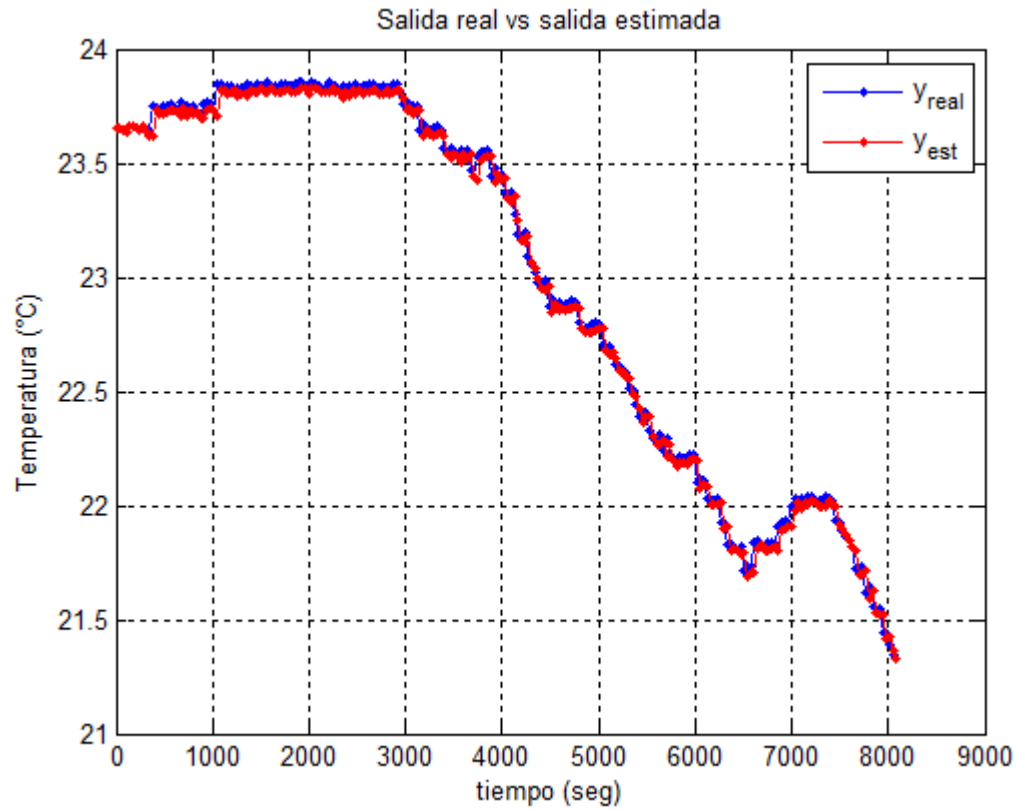


Figura 6.9: Comparación entre la salida real y la estimada para modelo de menor varianza general

La figura 6.9 muestra de forma clara que los parámetros obtenidos en la tabla 6.4 no entregan una buena estimación en la salida del modelo. Prueba de ello que la salida estimada se encuentra desfasada con respecto a la salida real, y además es ligera, pero evidentemente menor.

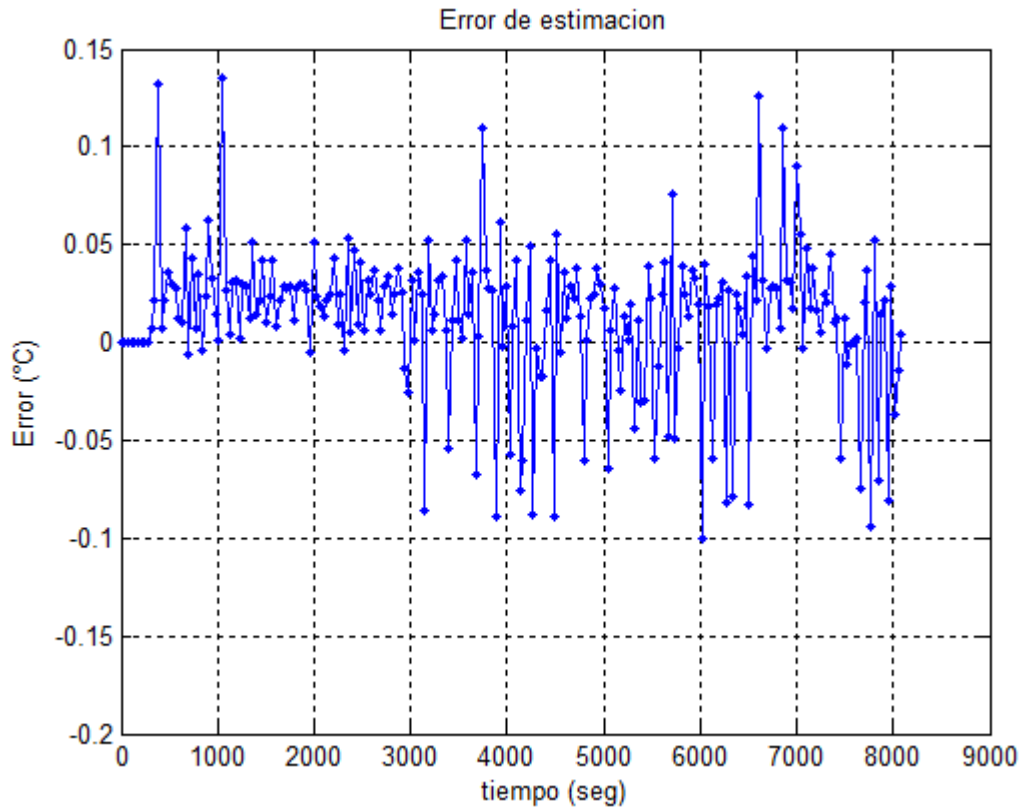


Figura 6.10: Error de estimación para modelo de menor varianza general

La mala estimación obtenida con este modelo es confirmada por el gráfico del error de estimación mostrado en la figura 6.10, la cual muestra que su amplitud general ronda los 0.1 °C, un valor mayor que los 0.08 °C que presenta el error de estimación del modelo anterior.

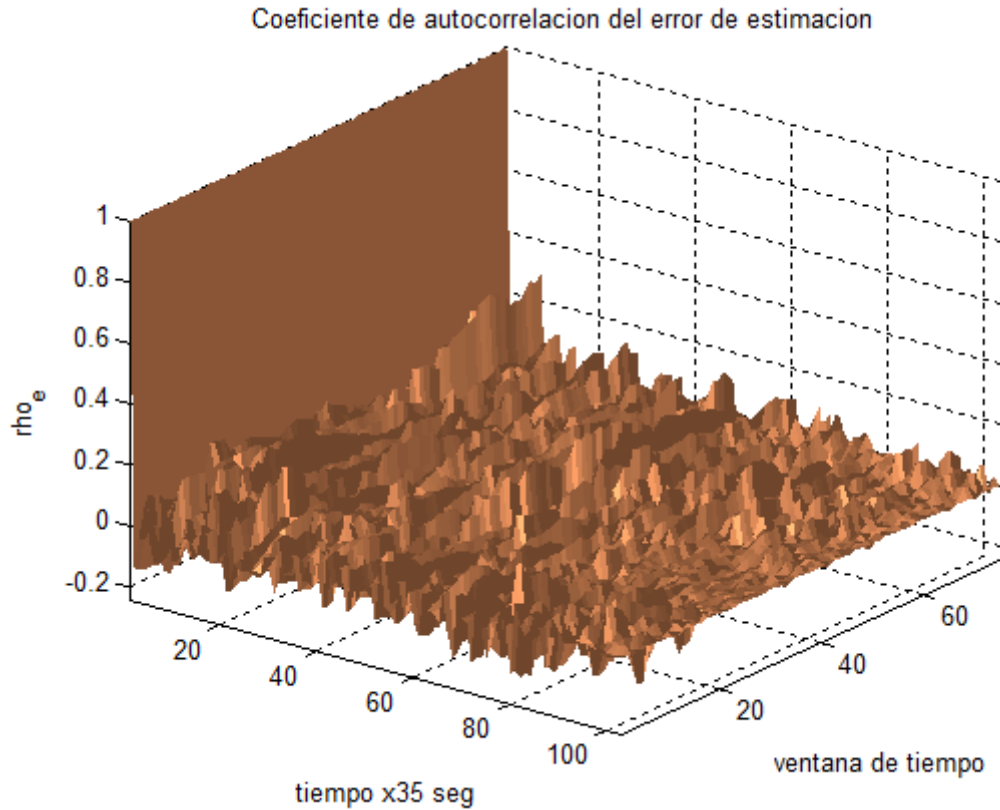


Figura 6.11: Autocorrelación del error de estimación para modelo de menor varianza general

La autocorrelación del error de estimación obtenido con este modelo muestra valores mayores que con el modelo anterior, lo cual indica una pérdida mayor de información. Con ello se evidencia no solamente que unos parámetros con una varianza pequeña no garantizan un error menor de estimación, sino que también corrobora que para obtener modelos fidedignos, se requiere de un tiempo de muestreo menor. De esa manera no se pierde información con respecto al sistema.

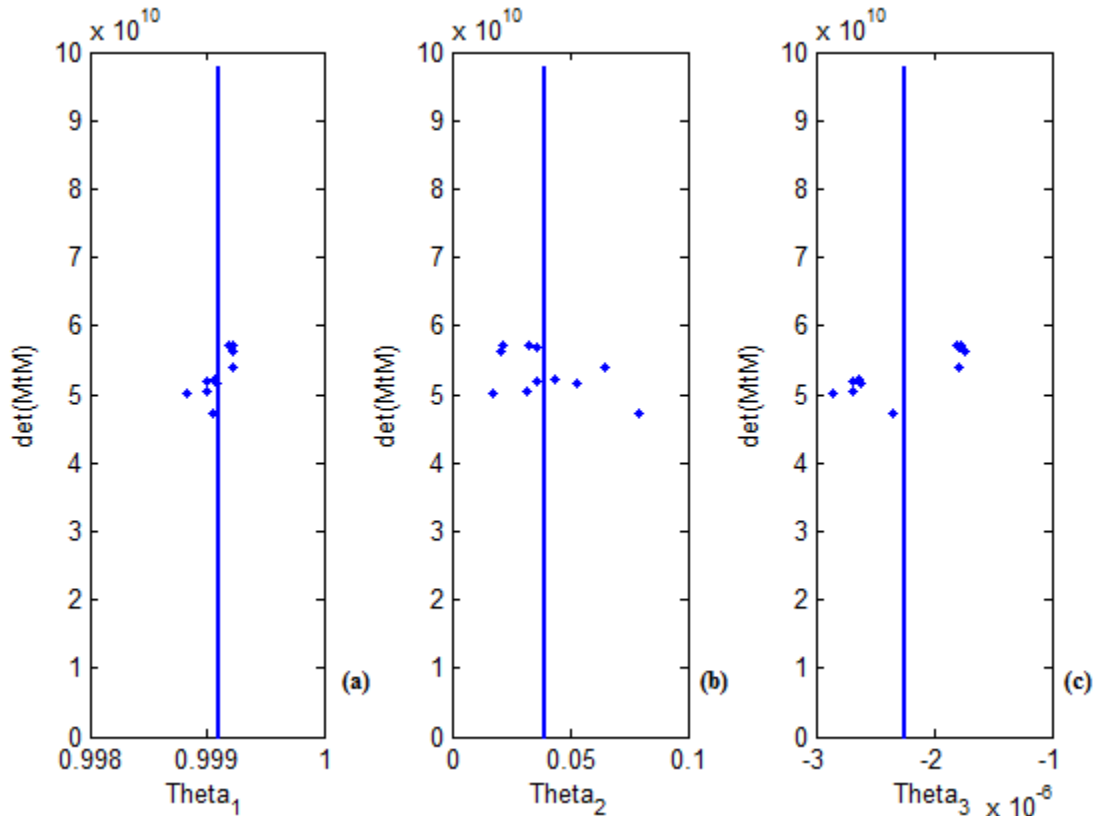


Figura 6.12: Análisis parámetro v/s determinante para modelo de menor varianza general. (a) θ_1 (b) θ_2 (c) θ_3

El gráfico 6.12 muestra cómo los valores calculados para cada parámetro se concentran alrededor del valor estimado, especialmente en los dos primeros parámetros, lo cual corrobora que este modelo presenta parámetros con la menor varianza posible.

6.3. Modelo con mejor relación ECM/varianza

La combinación $T_d-T_0-m-lim_{det}$ que entrega la mejor relación ECM/varianza, es decir, la que presenta tanto un menor error de estimación como también una menor varianza para cada parámetro es la que se muestra en la tabla 6.5. Como dato, este modelo entrega un ECM de $2.37 \cdot 10^{-4}$ y un promedio de varianzas de $1.23 \cdot 10^{-4}$:

TABLA 6.5: Combinación $T_d-T_0-m-lim_{det}$ para mejor relación ECM/varianza

Parámetro	Valor	Valor en segundos
T_0	1	5 Seg
T_d	5	25 Seg
m	100	- -
lim_{det}	$5 \cdot 10^{10}$	- -

Con ello se obtienen los siguientes parámetros, con sus respectivas varianzas y desviaciones estándar

TABLA 6.6: Parámetros estimados, varianzas y desviaciones estándar para mejor relación ECM/varianza

Parámetro	Valor estimado	Varianza	Desviación estándar
θ_1	0,999838	$1,47 \cdot 10^{-09}$	$3,83 \cdot 10^{-05}$
θ_2	0,034084	0,00037	0,019223
θ_3	$-1,33 \cdot 10^{-06}$	$3,11 \cdot 10^{-13}$	$5,57 \cdot 10^{-07}$

Los gráficos obtenidos son los siguientes:

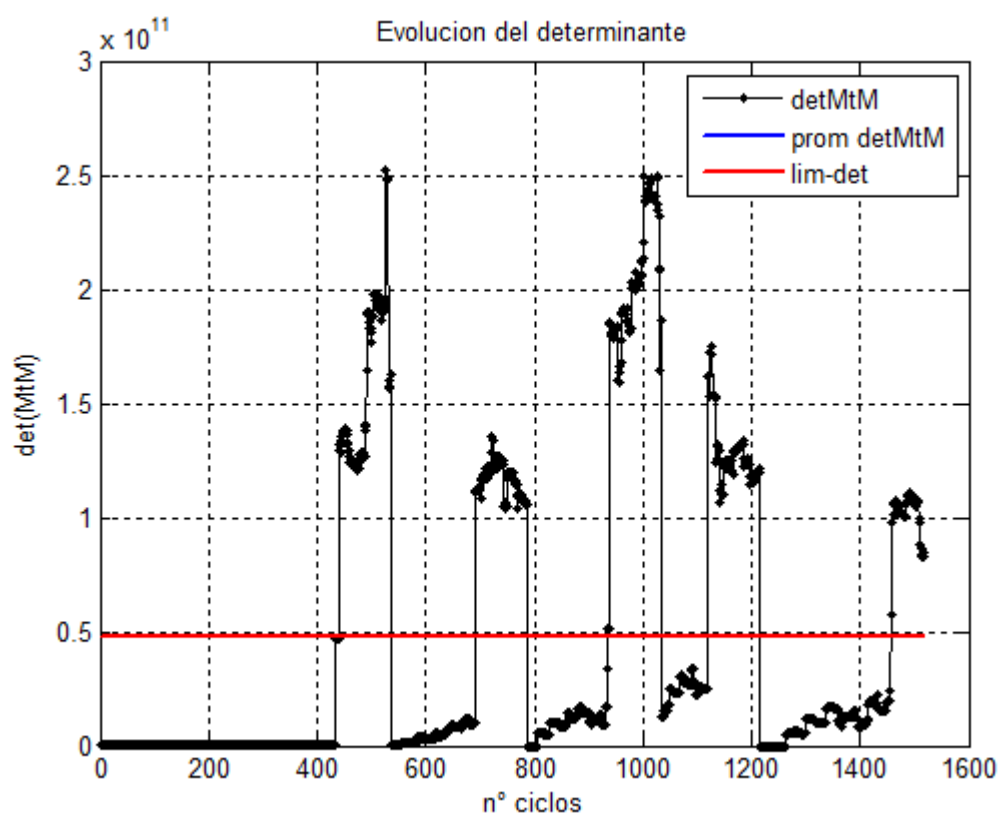


Figura 6.13: Evolución del determinante de $\Phi^T \Phi$ para modelo de mejor relación ECM/varianza

Puede verse en la figura 6.13 que el gráfico de determinantes obtenido con este modelo no difiere mucho con el que se obtuvo en el modelo con menor ECM. De hecho, se ve prácticamente similar al gráfico 6.1. Eso puede explicarse por el hecho de que en lo único que difieren ambos modelos es en el tiempo de retardo del modelo (25 segundos con este modelo y 30 en el modelo 1). Cabe destacar que en este caso, el modelo con la mejor relación ECM/varianzas usa el promedio de

los determinantes obtenidos como el límite mínimo requerido para obtener los parámetros por medio de los mínimos cuadrados.

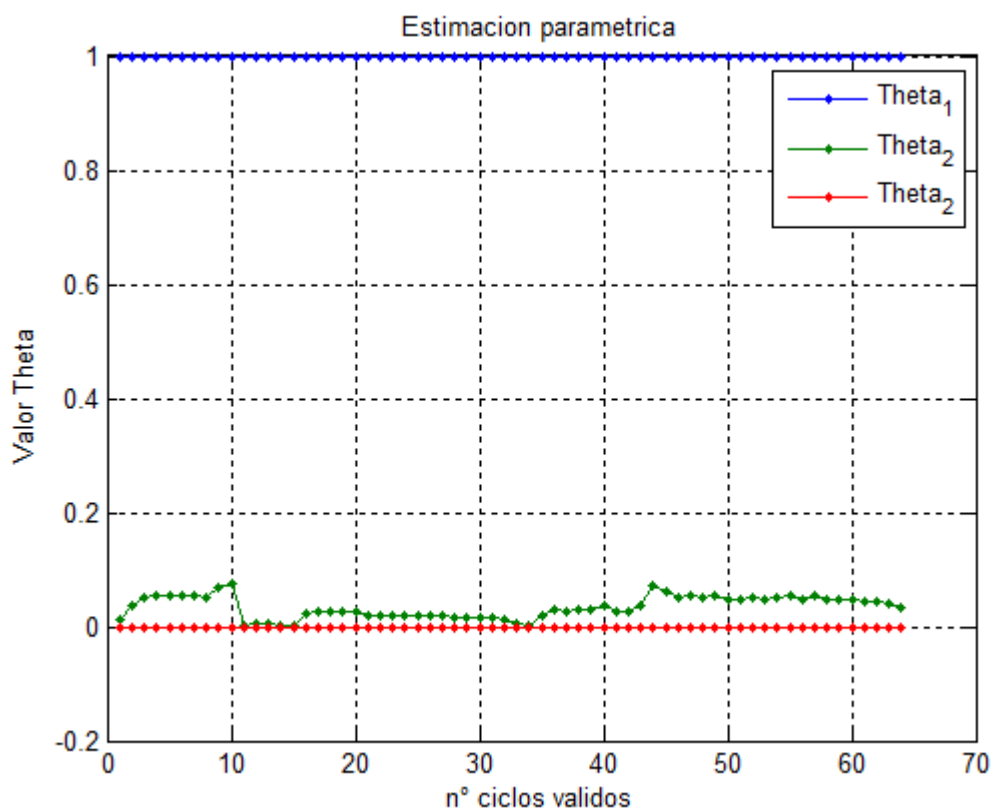


Figura 6.14: Evolución de la estimación paramétrica para modelo de mejor relacion ECM/varianza

Con este modelo puede verse que el número de valores obtenidos para cada parámetro es menor que con el modelo del criterio nº 1, y que además entrega un θ_2 menor. Sin embargo, también presenta una variabilidad menor, y por ende, una mejor varianza. Lo mismo con el primer y tercer parámetro. La razón por la cual se obtuvieron menos puntos es porque solo se tomaron los puntos donde el determinante supere el promedio de todos los determinantes obtenidos.

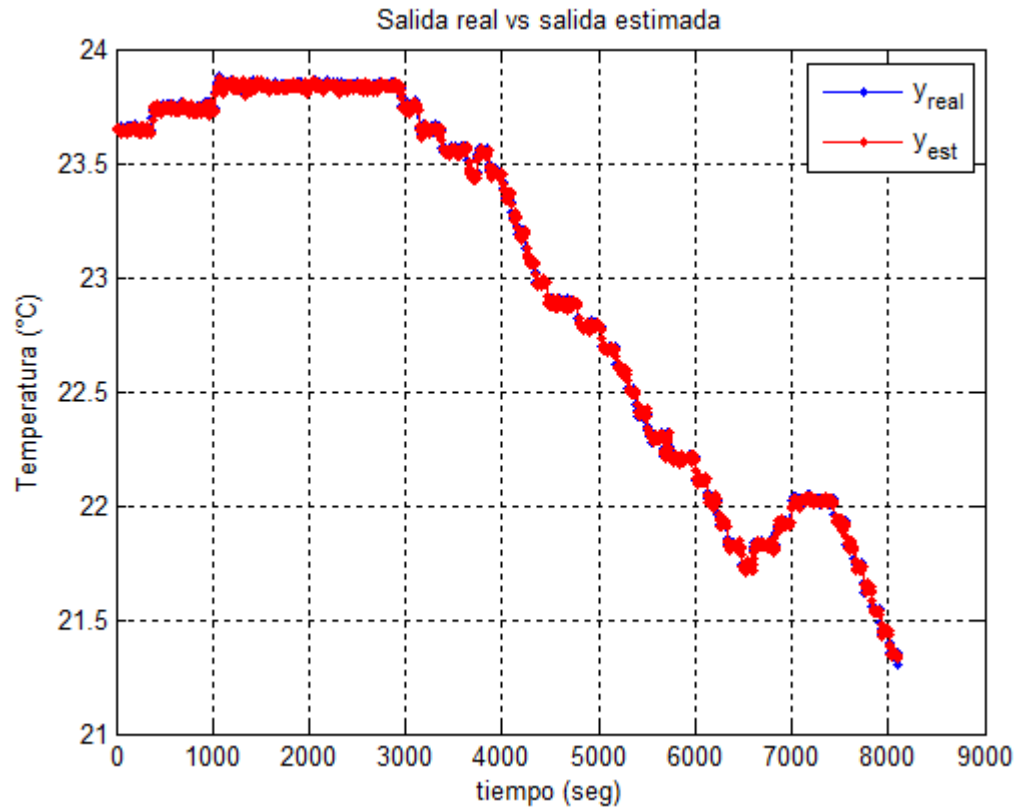


Figura 6.15: Comparación entre la salida real y la estimada para modelo de mejor relacion ECM/varianza

Como con el modelo obtenido con el menor ECM, este modelo (que también considera la menor varianza general) entrega una excelente estimación en la salida estimada, lo cual significa que este modelo es lo suficientemente ideal como para representar el sistema UTA, tanto desde el punto de vista del ECM como también desde el punto de vista de la varianza de cada parámetro.

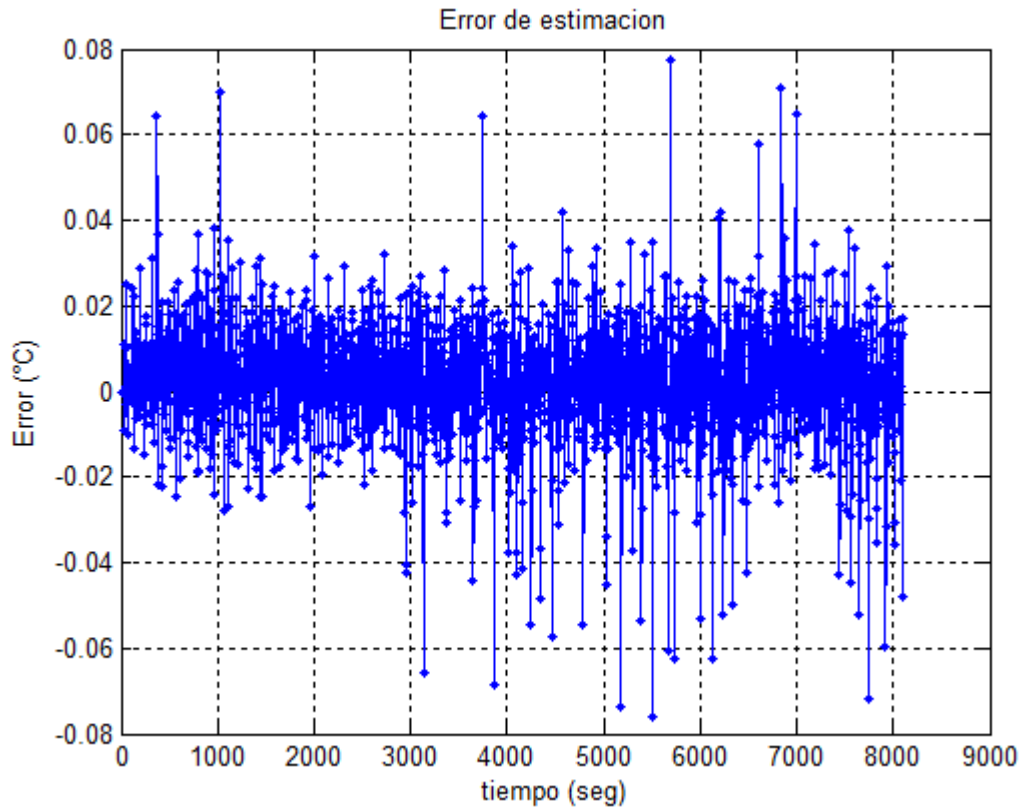


Figura 6.16: Error de estimación para modelo de mejor relacion ECM/varianza

No hay mucho que comentar con respecto al gráfico del error de estimación, pues no hay mucha diferencia con el error de estimación obtenido con el primer modelo. Este gráfico indica que el modelo obtenido en este caso representa de manera prácticamente fiel al sistema en estudio.

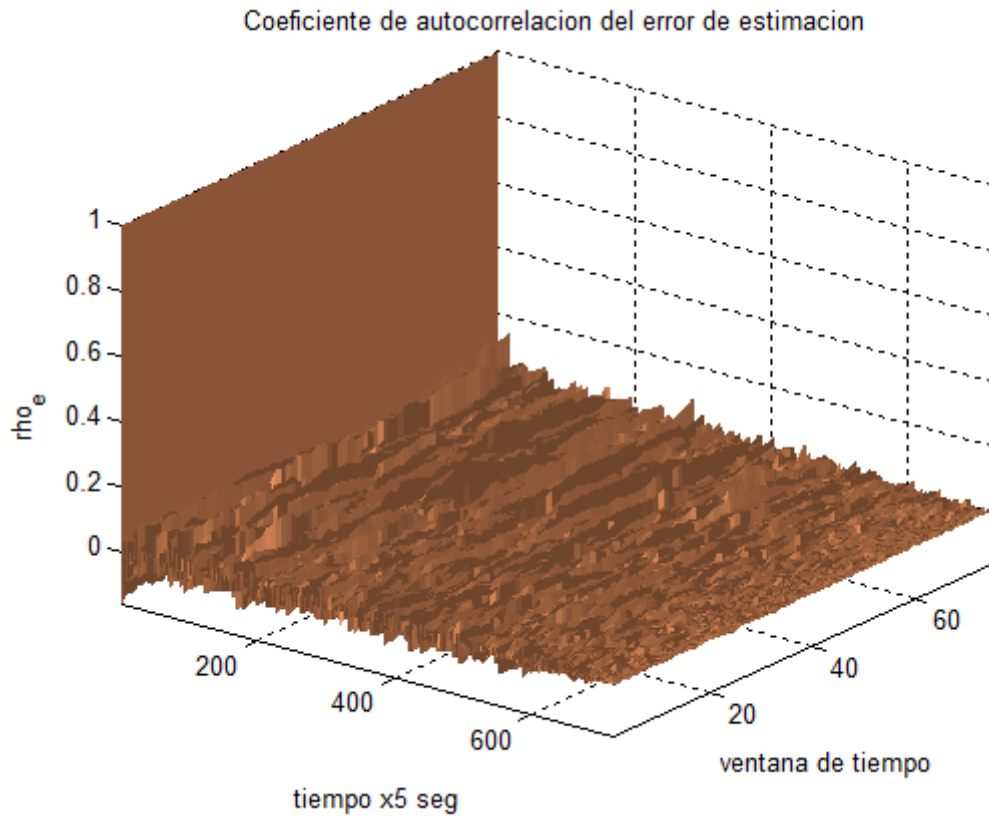


Figura 6.17: Autocorrelación del error de estimación para modelo de mejor relacion ECM/varianza

Al igual que con el modelo obtenido en el punto 6.1 de este capítulo, la autocorrelación del error estimado de este modelo indica una muy pequeña pérdida de información con respecto al sistema, indicando que es posible modelar el sistema con los parámetros y la estructura obtenidas.

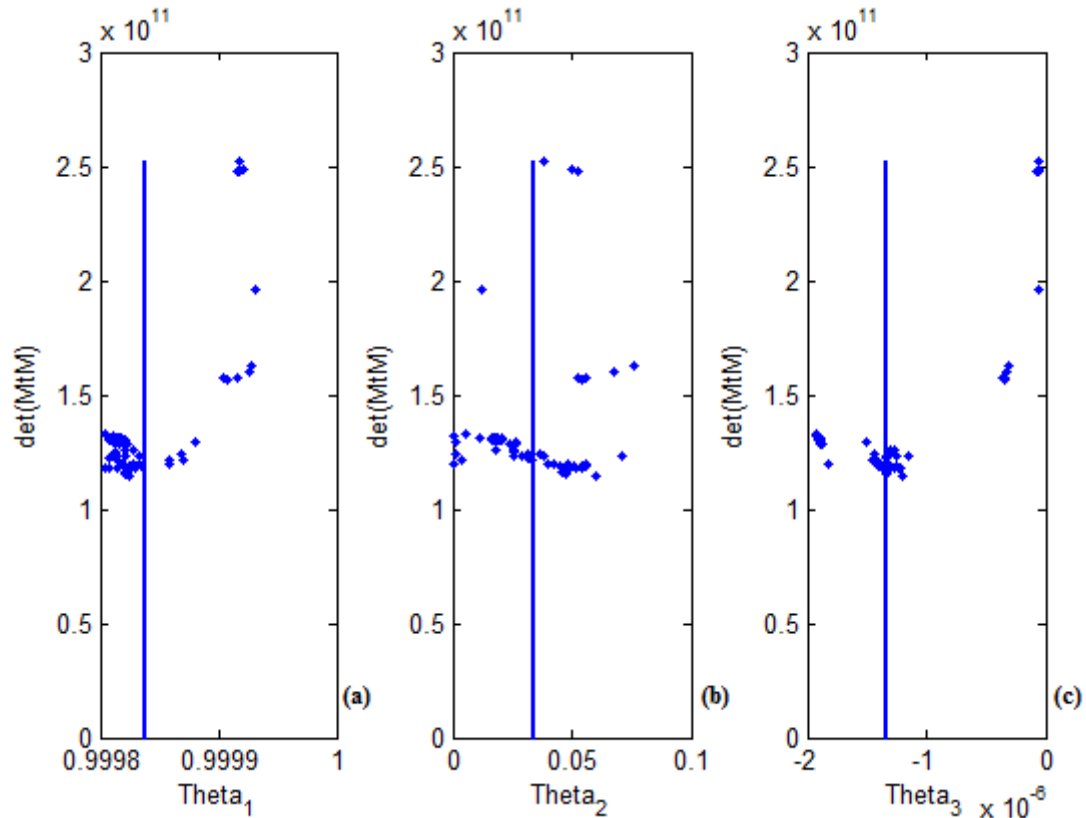


Figura 6.18: Análisis parámetro v/s determinante para modelo de mejor relacion ECM/varianza.

(a) θ_1 (b) θ_2 (c) θ_3

Analizando la relación parámetro v/s determinante de la figura 6.18 puede observarse cómo gran parte de los puntos obtenidos para los parámetros 1 y 3 se ubican cerca del valor estimado correspondiente, los cuales se dan para cuando el determinante toma valores de entre $1 \cdot 10^{-11}$ y $1.5 \cdot 10^{-11}$.

Capítulo 7. Conclusiones

7.1. Sumario

En este trabajo se empleó el uso de la herramienta *Parallel Computing Toolbox* de MATLAB para simular múltiples modelos para un mismo sistema, en este caso, un sistema HVAC usado para tratar el aire de un quirófano. Cada procesador se encargó de probar con varias combinaciones de tiempo de muestreo, tamaño de ventana de datos y límite mínimo del determinante permitido para la identificación paramétrica mediante mínimos cuadrados, todo ello para un solo valor de tiempo de retardo para cada procesador. Luego se escogió, de acuerdo al error cuadrático medio, las varianzas de cada parámetro y a ambos cuál es el modelo que mejor representa el sistema.

7.2. Conclusiones

Los resultados obtenidos permiten concluir que es posible desarrollar un conjunto de algoritmos aplicables a la identificación estructural y paramétrica mediante la paralelización de los distintos factores que participan en el modelo.

Se determina un conjunto de índices que permiten evaluar la calidad del modelo mediante algoritmos que entregan valores cuantificables y permiten discriminar la calidad del modelo. Respecto al ahorro de recursos humanos basados en el tiempo de obtención de los distintos parámetros dependerá de la estructura del modelo, orden, cantidad de retardos, n° de variables y cantidad de los datos.

Con respecto al modelo, se concluye que el mejor modelo corresponde al caso de mejor relación ECM/varianzas, pues con ello se logró un error cuadrático medio de $2.37 \cdot 10^{-4}$ y un promedio de varianzas de $1.23 \cdot 10^{-4}$, los cuales son valores más que aceptables como para que este modelo sea usado para casos de estudio posteriores.

Para un sistema ARIMA de primer orden se obtuvo una relación de ahorro de tiempo de un 66%.

7.3. Trabajo futuro

Como trabajo futuro se propone incorporar este mismo algoritmo para simulaciones en tiempo real, con el fin de emplear control adaptativo mediante comunicación por PLC, y de esa manera encontrar

cuál estrategia de control es la más efectiva y detectar cambios en la estructura de comportamiento del sistema, es decir, cambio de orden.



Bibliografía

- [1] Peter Pacheco, “*Introduction to Paralleling Programming*”, Capítulo 1, Morgan Kaufmann, University of San Fransisco, 2011.
- [2] Carlos Mancilla, “*Estudio comparativo de unidades de tratamiento de aire para quirófanos con mezcla versus intercambiador de calor sujeto a control experto*”, Memoria de Título, Ingeniero Civil Electrónico, Abril 2014, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción.
- [3] Carlos Vela, “*Metodología de diseño de un Sistema de Control Experto para Quirófanos*”, Memoria de Título, Ingeniero Civil Biomédico, Abril 2012, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción.
- [4] Juan Pablo Segovia, “*Estudio de un modelo predictivo de la calidad del arrabio en el alto horno n°2 de Huachipato y su utilización en control*”, Memoria de Título, Ingeniero Civil Electrónico, Diciembre 1988, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción.
- [5] Fransisco Mesa, “*Diseño de herramientas de software para datos*”, Memoria de Título, Ingeniero Civil Electrónico, Marzo 2011, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción.
- [6] Alejandro Rojas, “*Identificación de Sistemas (543707)*”, Capítulo 2: Mínimos Cuadrados, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Concepción, 2015.
- [7] Cristóbal Torregrosa, “*Simulación Paralela para Múltiples Modelos de Parámetros Distribuidos*”, Memoria de Título, Ingeniero Civil Elctrónico, Junio 2010, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción.
- [8] TOP 500®, Comunidad dedicada a elaborar estadísticas de desempeño de ordenadores de alto rendimiento. Publicación desde el año 1993 hasta noviembre del 2009. Sitio Web <http://www.top500.org/>
- [9] Blaise Barney and Lawrence Livermore, “*Introduction to Parallel Computing*”, Sitio Web https://computing.llnl.gov/tutorials/parallel_comp/
- [10] Matlab: Parallel Comuting Toolbox 4, “*User’s Guide*”, Sitio Web: www.mathworks.com.
- [11] MathWorks, Introduction to parfor, <http://www.mathworks.com/help/distcomp/introduction-to-parfor.html?requestedDomain=www.mathworks.com>
- [12] MathWorks, descripción del comando spmd y sus principales usos,

<http://www.mathworks.com/help/distcomp/spmd.html>



Anexo A. Códigos

A.1. Código de correlaciones

```

% Programa para leer datos desde excel
close all;
clear all;
clc;
% lee los archivos
% =====
    arch='medidas uma12_26.09-03.10_v2.xlsx ';
    sheet='FRIO';
    range='B1:I1623'; % se debe asegurar la lectura de todo el archivo
    clear N T rawdata;
    % lee archivos de acuerdo al Path
[ NUMERIC, TXT, RAW ] = XLSREAD ( FILE, SHEET, RANGE )
    [ N, T, rawdata ] = xlsread ( arch, sheet, range );
    [ nfN, ncN ] = size ( N );
    [ nfT, ncT ] = size ( T );
    % t, surtidor chiller, sp val, valv frio, sp caudal, caudal, T_quiro,
HR_quiro
    tmp=12.75:(5/(60*60)):15; % 2*3600/5+15*60/5

% total segundos
t_m=5; % tiempo muestreo de la data en segundos
t_tot=t_m*nfN; % total de segundos
temp=0:5:t_tot-5; % tiempo de segundos

tlim=[temp(1) temp(nfN)];
y1=[6 9];y2=[-10 110];y3=[900 1800];
y4=[900 max(N(:,5))];y5=[20 24];y6=[30 40];

figure
subplot(3,2,1),plot(temp,N(:,1)),grid,ylabel('T°Surtirdor [°C]'),xlabel('tiempo
[s]'),
xlim(tlim),ylim(y1)
subplot(3,2,2),plot(temp,N(:,3)),grid,ylabel('Posc.Val_frio [%]'),xlabel('tiempo
[s]'),
xlim(tlim),ylim(y2)
subplot(3,2,3),plot(temp,N(:,4)),grid,ylabel('SP Caudal Aire
[m^3/s]'),xlabel('tiempo [s]'),
xlim(tlim),ylim(y3)
subplot(3,2,4),plot(temp,N(:,5)),grid,ylabel('Caudal Aire
[m^3/s]'),xlabel('tiempo [s]'),
xlim(tlim),ylim(y4)
subplot(3,2,5),plot(temp,N(:,6)),grid,ylabel('T Quirófano [°C]'),xlabel('tiempo
[s]'),
xlim(tlim),ylim(y5)
subplot(3,2,6),plot(temp,N(:,7)),grid,ylabel('HR Quirófano [%]'),xlabel('tiempo
[s]'),
xlim(tlim),ylim(y6)

%% Correlaciones

```

```

% Variables (frio)
T_surt=N(:,1); %T° surtidor
sp_valv=N(:,3); %posc. valvula frío (entrada)
sp_caudal=N(:,4); %sp caudal
Q_aire=N(:,5); %caudal aire
T_quir=N(:,6); %T° quirofano (salida)
hr_quir=N(:,7); %Humedad relativa quirofano

% % Productos entre variables
% Producto entre la velocidad del aire y la entrada
QV=Q_aire.*sp_valv;
% Producto entre el caudal del aire y la salida
QTq=Q_aire.*T_quir;
% Producto entre el caudal de aire y la temperatura del surtidor
QTs=Q_aire.*T_surt;
% Producto entre la entrada y la salida
VTq=sp_valv.*T_quir;
% Producto entre la entrada, el caudal del aire y la salida
VQTq=sp_valv.*Q_aire.*T_quir;
% Producto entre la entrada, el caudal del aire y la temperatura del
% surtidor
VQTs=sp_valv.*Q_aire.*T_surt;

% calculo de correlaciones y autocorrelaciones usando ventana
min=60; % minutos a cubrir
dat=(60*min)/5; % numero de datos tomados
lv=dat; % largo ventana
min_cor=1; % indice de corrimiento expresado en minutos
i_c=(60*min_cor)/5; % indice de corrimiento expresado en numero de datos

nc=0;
for i=1:i_c:size(N,1)-1-lv;
    rho_ts=correl(T_surt(i:i+lv)',T_surt(i:i+lv)',0);
    rho_ts_spv=correl(T_surt(i:i+lv)',sp_valv(i:i+lv)',0);
    rho_ts_spc=correl(T_surt(i:i+lv)',sp_caudal(i:i+lv)',0);
    rho_ts_qa=correl(T_surt(i:i+lv)',Q_aire(i:i+lv)',0);
    rho_ts_tq=correl(T_surt(i:i+lv)',T_quir(i:i+lv)',0);
    rho_ts_hr=correl(T_surt(i:i+lv)',hr_quir(i:i+lv)',0);
    rho_spv_ts=correl(sp_valv(i:i+lv)',T_surt(i:i+lv)',0);
    rho_spv=correl(sp_valv(i:i+lv)',sp_valv(i:i+lv)',0);
    rho_spv_spc=correl(sp_valv(i:i+lv)',sp_caudal(i:i+lv)',0);
    rho_spv_qa=correl(sp_valv(i:i+lv)',Q_aire(i:i+lv)',0);
    rho_spv_tq=correl(sp_valv(i:i+lv)',T_quir(i:i+lv)',0);
    rho_spv_hr=correl(sp_valv(i:i+lv)',hr_quir(i:i+lv)',0);
    rho_spc_ts=correl(sp_caudal(i:i+lv)',T_surt(i:i+lv)',0);
    rho_spc_spv=correl(sp_caudal(i:i+lv)',sp_valv(i:i+lv)',0);
    rho_spc=correl(sp_caudal(i:i+lv)',sp_caudal(i:i+lv)',0);
    rho_spc_qa=correl(sp_caudal(i:i+lv)',Q_aire(i:i+lv)',0);
    rho_spc_tq=correl(sp_caudal(i:i+lv)',T_quir(i:i+lv)',0);
    rho_spc_hr=correl(sp_caudal(i:i+lv)',hr_quir(i:i+lv)',0);
    rho_qa_ts=correl(Q_aire(i:i+lv)',T_surt(i:i+lv)',0);
    rho_qa_spv=correl(Q_aire(i:i+lv)',sp_valv(i:i+lv)',0);
    rho_qa_spc=correl(Q_aire(i:i+lv)',sp_caudal(i:i+lv)',0);
    rho_qa=correl(Q_aire(i:i+lv)',Q_aire(i:i+lv)',0);
    rho_qa_tq=correl(Q_aire(i:i+lv)',T_quir(i:i+lv)',0);
    rho_qa_hr=correl(Q_aire(i:i+lv)',hr_quir(i:i+lv)',0);
    rho_tq_ts=correl(T_quir(i:i+lv)',T_surt(i:i+lv)',0);
    rho_tq_spv=correl(T_quir(i:i+lv)',sp_valv(i:i+lv)',0);

```

```

rho_tq_spc=correl(T_quir(i:i+lv)',sp_caudal(i:i+lv)',0);
rho_tq_qa=correl(T_quir(i:i+lv)',Q_aire(i:i+lv)',0);
rho_tq=correl(T_quir(i:i+lv)',T_quir(i:i+lv)',0);
rho_tq_hr=correl(T_quir(i:i+lv)',hr_quir(i:i+lv)',0);
rho_hr_ts=correl(hr_quir(i:i+lv)',T_surt(i:i+lv)',0);
rho_hr_spv=correl(hr_quir(i:i+lv)',sp_valv(i:i+lv)',0);
rho_hr_spc=correl(hr_quir(i:i+lv)',sp_caudal(i:i+lv)',0);
rho_hr_qa=correl(hr_quir(i:i+lv)',Q_aire(i:i+lv)',0);
rho_hr_tq=correl(hr_quir(i:i+lv)',T_quir(i:i+lv)',0);
rho_hr=correl(hr_quir(i:i+lv)',hr_quir(i:i+lv)',0);
rho_QV=correl(QV(i:i+lv)',QV(i:i+lv)',0);
rho_QV_tq=correl(QV(i:i+lv)',T_quir(i:i+lv)',0);
rho_tq_QV=correl(T_quir(i:i+lv)',QV(i:i+lv)',0);
rho_QTq=correl(QTq(i:i+lv)',QTq(i:i+lv)',0);
rho_QTq_tq=correl(QTq(i:i+lv)',T_quir(i:i+lv)',0);
rho_tq_QTq=correl(T_quir(i:i+lv)',QTq(i:i+lv)',0);
rho_QTs=correl(QTs(i:i+lv)',QTs(i:i+lv)',0);
rho_QTs_tq=correl(QTs(i:i+lv)',T_quir(i:i+lv)',0);
rho_tq_QTs=correl(T_quir(i:i+lv)',QTs(i:i+lv)',0);
rho_VTq=correl(VTq(i:i+lv)',VTq(i:i+lv)',0);
rho_VTq_tq=correl(VTq(i:i+lv)',T_quir(i:i+lv)',0);
rho_tq_VTq=correl(T_quir(i:i+lv)',VTq(i:i+lv)',0);
rho_VQTq=correl(VQTq(i:i+lv)',VQTq(i:i+lv)',0);
rho_VQTq_tq=correl(VQTq(i:i+lv)',T_quir(i:i+lv)',0);
rho_tq_VQTq=correl(T_quir(i:i+lv)',VQTq(i:i+lv)',0);
rho_VQTs=correl(VQTs(i:i+lv)',VQTs(i:i+lv)',0);
rho_VQTs_tq=correl(VQTs(i:i+lv)',T_quir(i:i+lv)',0);
rho_tq_VQTs=correl(T_quir(i:i+lv)',VQTs(i:i+lv)',0);
nc=nc+1;
mrho_ts(nc,:)=rho_ts;
mrho_ts_spv(nc,:)=rho_ts_spv;
mrho_ts_spc(nc,:)=rho_ts_spc;
mrho_ts_qa(nc,:)=rho_ts_qa;
mrho_ts_tq(nc,:)=rho_ts_tq;
mrho_ts_hr(nc,:)=rho_ts_hr;
mrho_spv_ts(nc,:)=rho_spv_ts;
mrho_spv(nc,:)=rho_spv;
mrho_spv_spc(nc,:)=rho_spv_spc;
mrho_spv_qa(nc,:)=rho_spv_qa;
mrho_spv_tq(nc,:)=rho_spv_tq;
mrho_spv_hr(nc,:)=rho_spv_hr;
mrho_spc_ts(nc,:)=rho_spc_ts;
mrho_spc_spv(nc,:)=rho_spc_spv;
mrho_spc(nc,:)=rho_spc;
mrho_spc_qa(nc,:)=rho_spc_qa;
mrho_spc_tq(nc,:)=rho_spc_tq;
mrho_spc_hr(nc,:)=rho_spc_hr;
mrho_qa_ts(nc,:)=rho_qa_ts;
mrho_qa_spv(nc,:)=rho_qa_spv;
mrho_qa_spc(nc,:)=rho_qa_spc;
mrho_qa(nc,:)=rho_qa;
mrho_qa_tq(nc,:)=rho_qa_tq;
mrho_qa_hr(nc,:)=rho_qa_hr;
mrho_tq_ts(nc,:)=rho_tq_ts;
mrho_tq_spv(nc,:)=rho_tq_spv;
mrho_tq_spc(nc,:)=rho_tq_spc;
mrho_tq_qa(nc,:)=rho_tq_qa;
mrho_tq(nc,:)=rho_tq;

```

```

mrho_tq_hr(nc,:) = rho_tq_hr;
mrho_hr_ts(nc,:) = rho_hr_ts;
mrho_hr_spv(nc,:) = rho_hr_spv;
mrho_hr_spc(nc,:) = rho_hr_spc;
mrho_hr_qa(nc,:) = rho_hr_qa;
mrho_hr_tq(nc,:) = rho_hr_tq;
mrho_hr(nc,:) = rho_hr;
mrho_QV(nc,:) = rho_QV;
mrho_QV_tq(nc,:) = rho_QV_tq;
mrho_tq_QV(nc,:) = rho_tq_QV;
mrho_QTq(nc,:) = rho_QTq;
mrho_QTq_tq(nc,:) = rho_QTq_tq;
mrho_tq_QTq(nc,:) = rho_tq_QTq;
mrho_QTs(nc,:) = rho_QTs;
mrho_QTs_tq(nc,:) = rho_QTs_tq;
mrho_tq_QTs(nc,:) = rho_tq_QTs;
mrho_VTq(nc,:) = rho_VTq;
mrho_VTq_tq(nc,:) = rho_VTq_tq;
mrho_tq_VTq(nc,:) = rho_tq_VTq;
mrho_VQTq(nc,:) = rho_VQTq;
mrho_VQTq_tq(nc,:) = rho_VQTq_tq;
mrho_tq_VQTq(nc,:) = rho_tq_VQTq;
mrho_VQTs(nc,:) = rho_VQTs;
mrho_VQTs_tq(nc,:) = rho_VQTs_tq;
mrho_tq_VQTs(nc,:) = rho_tq_VQTs;
nc;
end

% correlaciones especiales
figure
surf1(mrho_QV), shading interp, colormap(copper), axis tight, view([37.5 30]),
title('Coeficiente de autocorrelación del producto caudal aire x entrada (QV)'),
xlabel('n° muestras'), ylabel('n° iteraciones'), zlabel('rho_Q_V')
figure
surf1(mrho_QV_tq), shading interp, colormap(copper), axis tight, view([37.5 30]),
title('Coeficiente de correlación cruzada QV vs T_QUIROFANO'),
xlabel('n° muestras'), ylabel('n° iteraciones'), zlabel('rho_Q_V_-_t_q')
figure
surf1(mrho_tq_QV), shading interp, colormap(copper), axis tight, view([37.5 30]),
title('Coeficiente de correlación cruzada T^a QUIROFANO vs QV'),
xlabel('n° muestras'), ylabel('n° iteraciones'), zlabel('rho_t_q_-_Q_V')
figure
surf1(mrho_QTq), shading interp, colormap(copper), axis tight, view([37.5 30]),
title('Coeficiente de autocorrelación del producto caudal aire x T^a sala (QTq)'),
xlabel('n° muestras'), ylabel('n° iteraciones'), zlabel('rho_Q_T_q')
figure
surf1(mrho_QTq_tq), shading interp, colormap(copper), axis tight, view([37.5 30]),
title('Coeficiente de correlación cruzada QTq vs T_QUIROFANO'),
xlabel('n° muestras'), ylabel('n° iteraciones'), zlabel('rho_Q_T_q_-_t_q')
figure
surf1(mrho_tq_QTq), shading interp, colormap(copper), axis tight, view([37.5 30]),
title('Coeficiente de correlación cruzada T^a QUIROFANO vs QTq'),
xlabel('n° muestras'), ylabel('n° iteraciones'), zlabel('rho_t_q_-_Q_T_q')
figure
surf1(mrho_QTs), shading interp, colormap(copper), axis tight, view([37.5 30]),
title('Coeficiente de autocorrelación del producto caudal aire x T^a surtidor (QTs)'),

```

```

xlabel('n° muestras'),ylabel('n° iteraciones'),zlabel('rho_Q_T_s')
figure
surfl(mrho_QTs_tq),shading interp,colormap(copper),axis tight,view([37.5 30]),
title('Coeficiente de correlación cruzada QTs vs T_QUIROFANO'),
xlabel('n° muestras'),ylabel('n° iteraciones'),zlabel('rho_Q_T_s_-_t_q')
figure
surfl(mrho_tq_QTs),shading interp,colormap(copper),axis tight,view([37.5 30]),
title('Coeficiente de correlación cruzada T^a QUIROFANO vs QTs'),
xlabel('n° muestras'),ylabel('n° iteraciones'),zlabel('rho_t_q_-_Q_T_s')
figure
surfl(mrho_VTq),shading interp,colormap(copper),axis tight,view([37.5 30]),
title('Coeficiente de autocorrelación del producto entrada x T^a sala (VTq)'),
xlabel('n° muestras'),ylabel('n° iteraciones'),zlabel('rho_V_T_q')
figure
surfl(mrho_VTq_tq),shading interp,colormap(copper),axis tight,view([37.5 30]),
title('Coeficiente de correlación cruzada VTq vs T_QUIROFANO'),
xlabel('n° muestras'),ylabel('n° iteraciones'),zlabel('rho_V_T_q_-_t_q')
figure
surfl(mrho_tq_VTq),shading interp,colormap(copper),axis tight,view([37.5 30]),
title('Coeficiente de correlación cruzada T^a QUIROFANO vs VTq'),
xlabel('n° muestras'),ylabel('n° iteraciones'),zlabel('rho_t_q_-_V_T_q')
figure
surfl(mrho_VQTq),shading interp,colormap(copper),axis tight,view([37.5 30]),
title('Coeficiente de autocorrelación del producto entrada x caudal aire x T^a sala (VQTq)'),
xlabel('n° muestras'),ylabel('n° iteraciones'),zlabel('rho_V_Q_T_q')
figure
surfl(mrho_VQTq_tq),shading interp,colormap(copper),axis tight,view([37.5 30]),
title('Coeficiente de correlación cruzada VQTq vs T_QUIROFANO'),
xlabel('n° muestras'),ylabel('n° iteraciones'),zlabel('rho_V_Q_T_q_-_t_q')
figure
surfl(mrho_tq_VQTq),shading interp,colormap(copper),axis tight,view([37.5 30]),
title('Coeficiente de correlación cruzada T^a QUIROFANO vs VQTq'),
xlabel('n° muestras'),ylabel('n° iteraciones'),zlabel('rho_t_q_-_V_Q_T_q')
figure
surfl(mrho_VQTs),shading interp,colormap(copper),axis tight,view([37.5 30]),
title('Coeficiente de autocorrelación del producto entrada x caudal aire x T^a surt (VQTs)'),
xlabel('n° muestras'),ylabel('n° iteraciones'),zlabel('rho_V_Q_T_s')
figure
surfl(mrho_VQTs_tq),shading interp,colormap(copper),axis tight,view([37.5 30]),
title('Coeficiente de correlación cruzada VQTs vs T_QUIROFANO'),
xlabel('n° muestras'),ylabel('n° iteraciones'),zlabel('rho_V_Q_T_s_-_t_q')
figure
surfl(mrho_tq_VQTs),shading interp,colormap(copper),axis tight,view([37.5 30]),
title('Coeficiente de correlación cruzada T^a QUIROFANO vs VQTs'),
xlabel('n° muestras'),ylabel('n° iteraciones'),zlabel('rho_t_q_-_V_Q_T_s')

% correlacion cruzada T° surtidor/variables
figure
surfl(mrho_ts),shading interp,colormap(copper),axis tight,view([37.5 30]),
title('Coeficiente de autocorrelación de la temperatura del surtidor chiller'),
xlabel('n° muestras'),ylabel('n° iteraciones'),zlabel('rho_t_s')
figure
surfl(mrho_ts_spv),shading interp,colormap(copper),axis tight,view([37.5 30]),
title('Coeficiente de correlación cruzada T^a surtidor vs % apertura válvula frío'),
xlabel('n° muestras'),ylabel('n° iteraciones'),zlabel('rho_t_s_-_s_p_v')

```

```

figure
surfl(mrho_ts_spc), shading interp, colormap(copper), axis tight, view([37.5 30]),
title('Coeficiente de correlación cruzada Ta surtidor vs SP caudal de aire'),
xlabel('n° muestras'), ylabel('n° iteraciones'), zlabel('rho_t_s_-_s_p_c')
figure
surfl(mrho_ts_qa), shading interp, colormap(copper), axis tight, view([37.5 30]),
title('Coeficiente de correlación cruzada Ta surtidor vs caudal de aire'),
xlabel('n° muestras'), ylabel('n° iteraciones'), zlabel('rho_t_s_-_q_a')
figure
surfl(mrho_ts_tq), shading interp, colormap(copper), axis tight, view([37.5 30]),
title('Coeficiente de correlación cruzada Ta surtidor vs Ta quirófano'),
xlabel('n° muestras'), ylabel('n° iteraciones'), zlabel('rho_t_s_-_t_q')
figure
surfl(mrho_ts_hr), shading interp, colormap(copper), axis tight, view([37.5 30]),
title('Coeficiente de correlación cruzada Ta surtidor vs HR quirófano'),
xlabel('n° muestras'), ylabel('n° iteraciones'), zlabel('rho_t_s_-_h_r_q')

% correlacion cruzada posicion valvula/variables
figure
surfl(mrho_spv_ts), shading interp, colormap(copper), axis tight, view([37.5 30]),
title('Coeficiente de correlación cruzada % apertura válvula frío vs Ta
surtidor'),
xlabel('n° muestras'), ylabel('n° iteraciones'), zlabel('rho_s_p_v_-_t_s')
figure
surfl(mrho_spv), shading interp, colormap(copper), axis tight, view([37.5 30]),
title('Coeficiente de autocorrelación porcentaje apertura válvula frío'),
xlabel('n° muestras'), ylabel('n° iteraciones'), zlabel('rho_s_p_v')
figure
surfl(mrho_spv_spc), shading interp, colormap(copper), axis tight, view([37.5 30]),
title('Coeficiente de correlación cruzada % apertura válvula frío vs SP caudal
de aire'),
xlabel('n° muestras'), ylabel('n° iteraciones'), zlabel('rho_s_p_v_-_s_p_c')
figure
surfl(mrho_spv_qa), shading interp, colormap(copper), axis tight, view([37.5 30]),
title('Coeficiente de correlación cruzada % apertura válvula frío vs caudal de
aire'),
xlabel('n° muestras'), ylabel('n° iteraciones'), zlabel('rho_s_p_v_-_q_a')
figure
surfl(mrho_spv_tq), shading interp, colormap(copper), axis tight, view([37.5 30]),
title('Coeficiente de correlación cruzada % apertura válvula frío vs Ta
quirófano'),
xlabel('n° muestras'), ylabel('n° iteraciones'), zlabel('rho_s_p_v_-_t_q')
figure
surfl(mrho_spv_hr), shading interp, colormap(copper), axis tight, view([37.5 30]),
title('Coeficiente de correlación cruzada % apertura válvula frío vs HR
quirófano'),
xlabel('n° muestras'), ylabel('n° iteraciones'), zlabel('rho_s_p_v_-_h_r_q')

% correlacion cruzada sp caudal/variables
figure
surfl(mrho_spc_ts), shading interp, colormap(copper), axis tight, view([37.5 30]),
title('Coeficiente de correlación cruzada SP caudal aire vs Ta surtidor'),
xlabel('n° muestras'), ylabel('n° iteraciones'), zlabel('rho_s_p_c_-_t_s')
figure
surfl(mrho_spc_spv), shading interp, colormap(copper), axis tight, view([37.5 30]),
title('Coeficiente de correlación cruzada SP caudal aire vs % apertura válvula
frío'),
xlabel('n° muestras'), ylabel('n° iteraciones'), zlabel('rho_s_p_c_-_s_p_v')

```

```

figure
surfl(mrho_spc), shading interp, colormap(copper), axis tight, view([37.5 30]),
title('Coeficiente de autocorrelación set-point caudal de aire'),
xlabel('n° muestras'), ylabel('n° iteraciones'), zlabel('rho_s_p_c')
figure
surfl(mrho_spc_qa), shading interp, colormap(copper), axis tight, view([37.5 30]),
title('Coeficiente de correlación cruzada SP caudal aire vs caudal de aire'),
xlabel('n° muestras'), ylabel('n° iteraciones'), zlabel('rho_s_p_c_-_q_a')
figure
surfl(mrho_spc_tq), shading interp, colormap(copper), axis tight, view([37.5 30]),
title('Coeficiente de correlación cruzada SP caudal aire vs Tª quirófano'),
xlabel('n° muestras'), ylabel('n° iteraciones'), zlabel('rho_s_p_c_-_t_q')
figure
surfl(mrho_spc_hr), shading interp, colormap(copper), axis tight, view([37.5 30]),
title('Coeficiente de correlación cruzada SP caudal aire vs HR quirófano'),
xlabel('n° muestras'), ylabel('n° iteraciones'), zlabel('rho_s_p_c_-_h_r_q')

% correlacion cruzada caudal aire/variables
figure
surfl(mrho_qa_ts), shading interp, colormap(copper), axis tight, view([37.5 30]),
title('Coeficiente de correlación cruzada caudal aire vs Tª surtidor'),
xlabel('n° muestras'), ylabel('n° iteraciones'), zlabel('rho_q_a_-_t_s')
figure
surfl(mrho_qa_spv), shading interp, colormap(copper), axis tight, view([37.5 30]),
title('Coeficiente de correlación cruzada caudal aire vs % apertura válvula
frío'),
xlabel('n° muestras'), ylabel('n° iteraciones'), zlabel('rho_q_a_-_s_p_v')
figure
surfl(mrho_qa_spc), shading interp, colormap(copper), axis tight, view([37.5 30]),
title('Coeficiente de correlación cruzada caudal aire vs SP caudal de aire'),
xlabel('n° muestras'), ylabel('n° iteraciones'), zlabel('rho_q_a_-_s_p_c')
figure
surfl(mrho_qa), shading interp, colormap(copper), axis tight, view([37.5 30]),
title('Coeficiente de autocorrelación caudal de aire'),
xlabel('n° muestras'), ylabel('n° iteraciones'), zlabel('rho_q_a')
figure
surfl(mrho_qa_tq), shading interp, colormap(copper), axis tight, view([37.5 30]),
title('Coeficiente de correlación cruzada caudal aire vs Tª quirófano'),
xlabel('n° muestras'), ylabel('n° iteraciones'), zlabel('rho_q_a_-_t_q')
figure
surfl(mrho_qa_hr), shading interp, colormap(copper), axis tight, view([37.5 30]),
title('Coeficiente de correlación cruzada caudal aire vs HR quirófano'),
xlabel('n° muestras'), ylabel('n° iteraciones'), zlabel('rho_q_a_-_h_r_q')

% correlacion cruzada Tª quirofono/variables
figure
surfl(mrho_tq_ts), shading interp, colormap(copper), axis tight, view([37.5 30]),
title('Coeficiente de correlación cruzada Tª quirófano vs Tª surtidor'),
xlabel('n° muestras'), ylabel('n° iteraciones'), zlabel('rho_t_q_-_t_s')
figure
surfl(mrho_tq_spv), shading interp, colormap(copper), axis tight, view([37.5 30]),
title('Coeficiente de correlación cruzada Tª quirófano vs % apertura válvula
frío'),
xlabel('n° muestras'), ylabel('n° iteraciones'), zlabel('rho_t_q_-_s_p_v')
figure
surfl(mrho_tq_spc), shading interp, colormap(copper), axis tight, view([37.5 30]),
title('Coeficiente de correlación cruzada Tª quirófano vs SP caudal de aire'),
xlabel('n° muestras'), ylabel('n° iteraciones'), zlabel('rho_t_q_-_s_p_c')

```

```

figure
surfl(mrho_tq_qa), shading interp, colormap(copper), axis tight, view([37.5 30]),
title('Coeficiente de correlación cruzada Ta quirófano vs caudal de aire'),
xlabel('n° muestras'), ylabel('n° iteraciones'), zlabel('rho_t_q_-_q_a')
figure
surfl(mrho_tq), shading interp, colormap(copper), axis tight, view([37.5 30]),
title('Coeficiente de autocorrelación temperatura del quirófano'),
xlabel('n° muestras'), ylabel('n° iteraciones'), zlabel('rho_t_q')
figure
surfl(mrho_tq_hr), shading interp, colormap(copper), axis tight, view([37.5 30]),
title('Coeficiente de correlación cruzada Ta quirófano vs HR quirófano'),
xlabel('n° muestras'), ylabel('n° iteraciones'), zlabel('rho_t_q_-_h_r_q')

% correlacion cruzada humedad relativa quirofano/variables
figure
surfl(mrho_hr_ts), shading interp, colormap(copper), axis tight, view([37.5 30]),
title('Coeficiente de correlación cruzada HR quirófano vs Ta surtidor'),
xlabel('n° muestras'), ylabel('n° iteraciones'), zlabel('rho_h_r_q_-_t_s')
figure
surfl(mrho_hr_spv), shading interp, colormap(copper), axis tight, view([37.5 30]),
title('Coeficiente de correlación cruzada HR quirófano vs % apertura válvula
frío'),
xlabel('n° muestras'), ylabel('n° iteraciones'), zlabel('rho_h_r_q_-_s_p_v')
figure
surfl(mrho_hr_spc), shading interp, colormap(copper), axis tight, view([37.5 30]),
title('Coeficiente de correlación cruzada HR quirófano vs SP caudal de aire'),
xlabel('n° muestras'), ylabel('n° iteraciones'), zlabel('rho_h_r_q_-_s_p_c')
figure
surfl(mrho_hr_qa), shading interp, colormap(copper), axis tight, view([37.5 30]),
title('Coeficiente de correlación cruzada HR quirófano vs caudal de aire'),
xlabel('n° muestras'), ylabel('n° iteraciones'), zlabel('rho_h_r_q_-_q_a')
figure
surfl(mrho_hr_tq), shading interp, colormap(copper), axis tight, view([37.5 30]),
title('Coeficiente de correlación cruzada HR quirófano vs Ta quirófano'),
xlabel('n° muestras'), ylabel('n° iteraciones'), zlabel('rho_h_r_q_-_t_q')
figure
surfl(mrho_hr), shading interp, colormap(copper), axis tight, view([37.5 30]),
title('Coeficiente de autocorrelación humedad relativa del quirófano'),
xlabel('n° muestras'), ylabel('n° iteraciones'), zlabel('rho_h_r_q')

```

A.2. Código SPMD

```

%% Lectura de set de datos
% Programa para leer datos desde excel
close all;
clear all;
clc;
% lee los archivos
% =====
arch='medidas uma12_26.09-03.10_v2.xlsx ';
sheet='FRIO';
range='B1:I1623'; % se debe asegurar la lectura de todo el archivo
clear N T rawdata;
% lee archivos de acuerdo al Path
[NUMERIC, TXT, RAW]=XLSREAD(FILE, SHEET, RANGE)
[N, T, rawdata]= xlsread(arch, sheet, range);

```



```

[nfN,ncN]=size(N);
[nfT,ncT]=size(T);
% t, surtidor chiller, sp val, valv frio, sp caudal, caudal, T_quiro,
% HR_quiro
tmp=12.75:(5/(60*60)):15; % 2*3600/5+15*60/5

% total segundos
t_m=5; % tiempo muestreo de la data en segundos
t_tot=t_m*nfN; % total de segundos
temp=0:5:t_tot-5; % tiempo de segundos
nm=size( tmp,2);

% Variables (frio)
T_surt=N(:,1); % Temperatura surtidor
sp_valv=N(:,3); % posc. valvula frio (entrada) expresada en porcentajes
sp_valv_r=sp_valv/100; % posc. valvula frio expresada entre 0 y 1
sp_caudal=N(:,4); % sp caudal
Q_aire=N(:,5); % caudal aire
T_quir=N(:,6); % Temperatura quirofano (salida)
hr_quir=N(:,7); % Humedad relativa quirofano

% variables relevantes
u1=sp_valv_r.*T_surt; % posicion valvula x temp surtidor
tf= size(u1,1); % tiempo total
u2=Q_aire.*u1; % caudal de aire x E bateria frio
alpha=0.40;
gr=0.01;
y1=filtro(T_quir,alpha,gr);

%normalización
u1min=min(u1); u1max=max(u1); u1n=(u1-u1min)/(u1max-u1min);
u2min=min(u2); u2max=max(u2); u2n=(u2-u2min)/(u2max-u2min);
y1min=min(y1); y1max=max(y1); y1n=(y1-y1min)/(y1max-y1min);
figure(1)
subplot(411),plot(u1),title('Ebf=posicion valvula x temp surtidor')
subplot(412),plot(u2),title('Qiny=caudal de aire x E bateria frio(Ebf)')
subplot(413),plot(y1),title('Temp. Quirófano')
subplot(414),plot(1-y1n,'r'),hold,plot(u1n,'g'),plot(u2n,'b'),
title('Señales Normalizadas')

%% Estimacion de parametros
% se asume que el sistema tiene la forma
%  $y(k)=y(k-1)+A(q^{-1})*[y(k-1)-y(k-2)]+B(q^{-1})[u(k-1)-u(k-2)]$ 

%% Inicializacion de variables
% variables fijas
na=1; % orden autoregresivo
nb=1; % orden media movil
nmax=max([na nb]); % maximo entre los ordenes
np=1+na+nb; % n° de parametros
liml=[0.99 0 -1]; % minimo valor permitido para cada parametro
limh=[1.01 1 0]; % maximo valor permitido para cada parametro
limits=[liml;limh]; % matriz de limites
alpha_par=1; % filtro de parametros

% variables a manipular
nr=0:7; % numero de retardos

```

```

t0=1:2:7; % numero de muestreos de 5 segundos (tiempo de muestreo)
ven=[25 50 100]; % ventana de datos (ojo, no equivale necesariamente al n°
                % de filas de la matriz M)
limit_det=[1E1 1E2 1E5 1E5]; % limite minimo del determinante permitido
                % (sólo los 3 primeros cuentan, el cuarto
                % es probando como limite el promedio de
                % todos los determinantes)
sw_lim_det=[0 0 0 1]; % sw_det==0: limite determinante lo elije el usuario
                % sw_det==1: limite determinante es el promedio de
                % todos los determinantes calculados

%% Algoritmo de estimacion parametrica
tic
spmd
    for i=1:length(nr)
        switch(labindex)
            case i
                for j=1:length(t0)
                    for ii=1:length(ven)
                        for jj=1:length(limit_det)
                            s_ldet=sw_lim_det(jj); % eleccion tipo limite determinante
                            ldet=limit_det(jj); % limite determinante
                            m=ven(ii)+nmax+nr; % n° filas matriz M
                            nt0=t0(j); % tiempo muestreo
                            ntd=nr(i); % retardo
                            [detMtM,m_det,theta,th_est,var_par,std_par,ye,e,ecm,pp]=...
                                modelo_arx_dif(y1,u2,s_ldet,ldet,nt0,na,nb,ntd,m,limits,alpha_par);

                            % Solo interesan el ECM y las varianzas. Si algo falla
                            % dentro de la funcion anterior (ya sea porque no se
                            % cumplen con los requisitos que se describen dentro de la
                            % funcion "modelo_arx_dif.m", los valores de ECM,
                            % meanvarpar y normECMvarpar toman el valor de 100. Eso es
                            % porque la funcion esta programada para que de [] (vacio)
                            % cada vez que ocurre algun error
                            if isempty(ecm) || isempty(var_par)
                                ECM=100;
                                meanvarpar=100;
                                normECMvarpar=100;
                            else
                                ECM=ecm; % error cuadratico medio
                                meanvarpar=mean(var_par); % promedio varianzas
                                normECMvarpar=norm([ECM meanvarpar],2); % norma ECM/varianzas
                            end

                            % se crean matrices de celdas. Cada valor se guarda en una
                            % celda
                            C1_ECM{ii,jj}=ECM;
                            C1_meanvarpar{ii,jj}=meanvarpar;
                            C1_normECMvarpar{ii,jj}=normECMvarpar;
                        end
                    end
                end
            end
        end

    % Transforma las matrices de celdas anteriores en matrices normales
    % y luego guarda cada una de ellas en celdas mas grandes
    C2_ECM{j}=cell2mat(C1_ECM);
    C2_meanvarpar{j}=cell2mat(C1_meanvarpar);

```

```

        C2_normECMvarpar{j}=cell2mat(C1_normECMvarpar);
    end
    end
end
time=toc;

%% Rearme matrices de celdas
CM_ECM=[C2_ECM{1};C2_ECM{2};C2_ECM{3};C2_ECM{4};C2_ECM{5};C2_ECM{6};C2_ECM{7};C2_ECM{8}];
CM_meanvarpar=[C2_meanvarpar{1};C2_meanvarpar{2};C2_meanvarpar{3};C2_meanvarpar{4};...
    C2_meanvarpar{5};C2_meanvarpar{6};C2_meanvarpar{7};C2_meanvarpar{8}];
CM_normECMvarpar=[C2_normECMvarpar{1};C2_normECMvarpar{2};C2_normECMvarpar{3};C2_normECMvarpar{4};...
    C2_normECMvarpar{5};C2_normECMvarpar{6};C2_normECMvarpar{7};C2_normECMvarpar{8}];

%% Encontrar el mejor modelo de acuerdo a su ECM
%% encontrar el menor error cuadratico medio
M_ECM=cell2mat(CM_ECM); % matriz de (na*t0max)x(nb*tdmax)
min_ECM=min(min(M_ECM));

%% analizar cual es la fila y la columna de M_ECM que genera tal error
%% cuadratico
for ii=1:size(M_ECM,1)
    for jj=1:size(M_ECM,2)
        if M_ECM(ii,jj)==min_ECM
            ik=ii;jk=jj;
        end
    end
end

%% encontrar la combinacion nr-t0-ven-lim_det que genera tal ECM
i_nr=1; j_t0=1; % Inicializacion fila y columna exterior
i_ven=0; j_det=0; % inicializacion fila y columna interior
for i=1:ik
    i_ven=i_ven+1;
    if i_ven>length(ven)
        i_ven=1;
        i_nr=i_nr+1;
    end
end

for j=1:jk
    j_det=j_det+1;
    if j_det>length(limit_det)
        j_det=1;
        j_t0=j_t0+1;
    end
end

%% Resultados
v11=[ik jk]
v12=[nr(i_nr) t0(j_t0) ven(i_ven) limit_det(j_det)]
sw_ldet_1=sw_lim_det(j_det)

```



```

% % resultados para graficar
[detMtM,m_det,theta,th_est,var_par,std_par,ye,e,ecm,pp]=...

modelo_arx_dif(y1,u2,sw_ldet_1,v12(4),v12(2),na,nb,v12(1),v12(3)+nmax+v12(2),lim
its,alpha_par);
mrho_e=mcórrrel(e,e,60,5,v12(2),1,0);

% % Tablas
% tabla de datos
tabladat1=num2cell([v12';ecm]);

% tabla de celdas
tablapar1=num2cell([th_est' var_par' std_par']);

% % Graficos
% determinante
if sw_ldet_1==1
    v12(4)=m_det;
end
figure
plot(detMtM,'.-k'),grid,hold,line([0 length(detMtM)], [m_det
m_det], 'LineWidth',2),
líne([0 length(detMtM)], [v12(4) v12(4)], 'LineWidth',2, 'Color', 'r'),
title('Evolucion del determinante'),xlabel('n° ciclos'),ylabel('det (MtM)'),
legend('detMtM', 'prom detMtM', 'lim-det')

% parametros
figure
plot(theta','.-'),grid
title('Estimacion parametrica'),xlabel('n° ciclos validos'),ylabel(' Valor
Theta'),
legend('Theta_1', 'Theta_2', 'Theta_2')

% Salida real vs estimada
yr=y1(1:v12(2):length(y1));
tmpr=temp(1:v12(2):length(temp));
figure
plot(tmpr,yr,'.-'),grid,hold,plot(tmpr,ye,'.-r')
title('Salida real vs salida estimada'),xlabel('tiempo
(seg)'),ylabel('Temperatura (°C)'),
legend('y_r_e_a_l', 'y_e_s_t')

% Error de estimacion
figure
plot(tmpr,e,'.-'),grid,
title('Error de estimacion'),xlabel('tiempo (seg)'),ylabel('Error (°C)'),

% Autocorrelacion del error de estimacion
figure,surfl(mrho_e),shading interp,colormap(copper),axis tight,view([37.5 30]),
title('Coeficiente de autocorrelacion del error de estimacion'),xlabel('n°
muestras'),
ylabel('n° iteraciones'),zlabel('rho_e')

% Analisis final detMtM vs parametros
maxdet=max(detMtM);

```

```

if sw_ldet_1==1
    v12(4)=m_det;
end
if isempty(pp)
    pp=find(detMtM>v12(4));
    det_val=detMtM(pp);
else
    det_val=detMtM(pp);
end
figure
subplot(131),plot(theta(1,:),det_val,'. '),hold,
line([th_est(1) th_est(1)],[0
maxdet], 'LineWidth',2),xlabel('Theta_1'),ylabel('det (MtM)')
subplot(132),plot(theta(2,:),det_val,'. '),hold,
line([th_est(2) th_est(2)],[0
maxdet], 'LineWidth',2),xlabel('Theta_2'),ylabel('det (MtM)')
subplot(133),plot(theta(3,:),det_val,'. '),hold,
line([th_est(3) th_est(3)],[0
maxdet], 'LineWidth',2),xlabel('Theta_3'),ylabel('det (MtM)')

%% Encontrar el mejor modelo de acuerdo a sus varianzas
% % encontrar el menor promedio de varianzas
M_meanvarpar=cell2mat(CM_meanvarpar); % matriz de (na*t0max)x(nb*tdmax)
min_meanvarpar=min(min(M_meanvarpar));

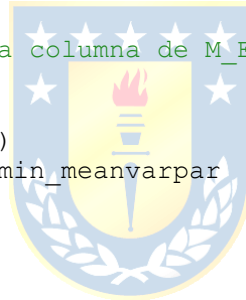
% % analizar cual es la fila y la columna de M_ECM que genera tal error
% % cuadratico
for ii=1:size(M_meanvarpar,1)
    for jj=1:size(M_meanvarpar,2)
        if M_meanvarpar(ii,jj)==min_meanvarpar
            ik=ii;jk=jj;
        end
    end
end
end

% % encontrar la combinacion nr-t0-ven-lim_det que genera tal ECM
i_nr=1; j_t0=1; % Inicializacion fila y columna exterior
i_ven=0; j_det=0; % inicializacion fila y columna interior
for i=1:ik
    i_ven=i_ven+1;
    if i_ven>length(ven)
        i_ven=1;
        i_nr=i_nr+1;
    end
end

for j=1:jk
    j_det=j_det+1;
    if j_det>length(limit_det)
        j_det=1;
        j_t0=j_t0+1;
    end
end

% % Resultados
v21=[ik jk]
v22=[nr(i_nr) t0(j_t0) ven(i_ven) limit_det(j_det)]

```



```

sw_ldet_2=sw_lim_det(j_det)

% % resultados para graficar
[detMtM,m_det,theta,th_est,var_par,std_par,ye,e,ecm,pp]=...

modelo_arx_dif(y1,u2,sw_ldet_2,v22(4),v22(2),na,nb,v22(1),v22(3)+nmax+v22(2),lim
its,alpha_par);
mrho_e=mcorrel(e,e,60,5,v22(2),1,0);

% % Tablas
% tabla de datos
tabladat2=num2cell([v22';ecm]);

% tabla de celdas
tablapar2=num2cell([th_est' var_par' std_par']);

% % Graficos
% determinante
if sw_ldet_2==1
    v22(4)=m_det;
end
figure
plot(detMtM,'.-k'),grid,hold,line([0 length(detMtM)],[m_det
m_det],'LineWidth',2),
line([0 length(detMtM)],[v22(4) v22(4)],'LineWidth',2,'Color','r'),
title('Evolucion del determinante'),xlabel('n° ciclos'),ylabel('det (MtM)'),
legend('detMtM','prom detMtM','lim-det')

% parametros
figure
plot(theta','.-'),grid
title('Estimacion parametrica'),xlabel('n° ciclos validos'),ylabel(' Valor
Theta'),
legend('Theta_1','Theta_2','Theta_3')

% Salida real vs estimada
yr=y1(1:v22(2):length(y1));
tmpr=temp(1:v22(2):length(temp));
figure
plot(tmpr,yr,'.-'),grid,hold,plot(tmpr,ye,'.-r')
title('Salida real vs salida estimada'),xlabel('tiempo
(seg)'),ylabel('Temperatura (°C)'),
legend('y_r_e_a_l','y_e_s_t')

% Error de estimacion
figure
plot(tmpr,e,'.-'),grid,
title('Error de estimacion'),xlabel('tiempo (seg)'),ylabel('Error (°C)'),

% Autocorrelacion del error de estimacion
figure,surfl(mrho_e),shading interp,colormap(copper),axis tight,view([37.5 30]),
title('Coeficiente de autocorrelacion del error de estimacion'),xlabel('n°
muestras'),
ylabel('n° iteraciones'),zlabel('rho_e')

% Analisis final detMtM vs parametros

```

```

maxdet=max(detMtM);
if sw_ldet_2==1
    v22(4)=m_det;
end
if isempty(pp)
    pp=find(detMtM>v22(4));
    det_val=detMtM(pp);
else
    det_val=detMtM(pp);
end
figure
subplot(131),plot(theta(1,:),det_val,'. '),hold,
line([th_est(1) th_est(1)],[0
maxdet], 'LineWidth',2),xlabel('Theta_1'),ylabel('det (MtM)')
subplot(132),plot(theta(2,:),det_val,'. '),hold,
line([th_est(2) th_est(2)],[0
maxdet], 'LineWidth',2),xlabel('Theta_2'),ylabel('det (MtM)')
subplot(133),plot(theta(3,:),det_val,'. '),hold,
line([th_est(3) th_est(3)],[0
maxdet], 'LineWidth',2),xlabel('Theta_3'),ylabel('det (MtM)')

%% Encontrar el mejor modelo de acuerdo al equilibrio entre ECM y varianzas
%% encontrar el menor promedio de varianzas
M_normECMvarpar=cell2mat(CM_normECMvarpar); % matriz de (na*t0max)x(nb*tdmax)
min_normECMvarpar=min(min(M_normECMvarpar));

%% analizar cual es la fila y la columna de M_ECM que genera tal error
%% cuadratico
for ii=1:size(M_normECMvarpar,1)
    for jj=1:size(M_normECMvarpar,2)
        if M_normECMvarpar(ii,jj)==min_normECMvarpar
            ik=ii;jk=jj;
        end
    end
end
end

%% encontrar la combinacion nr-t0-ven-lim_det que genera tal ECM
i_nr=1; j_t0=1; % Inicializacion fila y columna exterior
i_ven=0; j_det=0; % inicializacion fila y columna interior
for i=1:ik
    i_ven=i_ven+1;
    if i_ven>length(ven)
        i_ven=1;
        i_nr=i_nr+1;
    end
end

for j=1:jk
    j_det=j_det+1;
    if j_det>length(limit_det)
        j_det=1;
        j_t0=j_t0+1;
    end
end

%% Resultados
v31=[ik jk]

```

```

v32=[nr(i_nr) t0(j_t0) ven(i_ven) limit_det(j_det)]
sw_ldet_3=sw_lim_det(j_det)

% % resultados para graficar
[detMtM,m_det,theta,th_est,var_par,std_par,ye,e,ecm,pp]=...

modelo_arx_dif(y1,u2,sw_ldet_3,v32(4),v32(2),na,nb,v32(1),v32(3)+nmax+v32(2),lim
its,alpha_par);
mrho_e=mcorrel(e,e,60,5,v32(2),1,0);

% % Tablas
% tabla de datos
tabladat3=num2cell([v32';ecm]);

% tabla de celdas
tablapar3=num2cell([th_est' var_par' std_par']);

% % Graficos
% determinante
if sw_ldet_3==1
    v32(4)=m_det;
end
figure
plot(detMtM,'.-k'),grid,hold,line([0 length(detMtM)],[m_det
m_det], 'LineWidth',2),
line([0 length(detMtM)],[v32(4) v32(4)], 'LineWidth',2, 'Color', 'r'),
title('Evolucion del determinante'),xlabel('n° ciclos'),ylabel('det (MtM)'),
legend('detMtM', 'prom detMtM', 'lim-det')

% parametros
figure
plot(theta,'.-'),grid
title('Estimacion parametrica'),xlabel('n° ciclos validos'),ylabel(' Valor
Theta'),
legend('Theta_1', 'Theta_2', 'Theta_2')

% Salida real vs estimada
yr=y1(1:v32(2):length(y1));
tmpr=temp(1:v32(2):length(temp));
figure
plot(tmpr,yr,'.-'),grid,hold,plot(tmpr, ye, '-r')
title('Salida real vs salida estimada'),xlabel('tiempo
(seg)'),ylabel('Temperatura (°C)'),
legend('y_r_e_a_l', 'y_e_s_t')

% Error de estimacion
figure
plot(tmpr,e,'.-'),grid,
title('Error de estimacion'),xlabel('tiempo (seg)'),ylabel('Error (°C)'),

% Autocorrelacion del error de estimacion
figure,surfl(mrho_e),shading interp,colormap(copper),axis tight,view([37.5 30]),
title('Coeficiente de autocorrelacion del error de estimacion'),xlabel('n°
muestras'),
ylabel('n° iteraciones'),zlabel('rho_e')

```



```

% Analisis final detMtM vs parametros
maxdet=max(detMtM);
if sw_ldet_3==1
    v32(4)=m_det;
end
if isempty(pp)
    pp=find(detMtM>v32(4));
    det_val=detMtM(pp);
else
    det_val=detMtM(pp);
end
figure
subplot(131),plot(theta(1,:),det_val,'. '),hold,
line([th_est(1) th_est(1)],[0
maxdet], 'LineWidth',2),xlabel('Theta_1'),ylabel('det (MtM)')
subplot(132),plot(theta(2,:),det_val,'. '),hold,
line([th_est(2) th_est(2)],[0
maxdet], 'LineWidth',2),xlabel('Theta_2'),ylabel('det (MtM)')
subplot(133),plot(theta(3,:),det_val,'. '),hold,
line([th_est(3) th_est(3)],[0
maxdet], 'LineWidth',2),xlabel('Theta_3'),ylabel('det (MtM)')

```

A.3. Código mcorrel

```

% esta funcion entrega la correlacion entre x e y mediante corrimiento de
% ventana. El resultado final (mrho_x1x2) es la correlacion resultante en cada
% seccion
% de tiempo
function mrho_x1x2=mcorrel(x1,x2,ven,seg_T0,T0,min_cor,sw)
% x1 = vector 1
% x2 = vector 2
% ven = ventana de datos expresada en minutos
% seg_T0 = tiempo de muestreo original en segundos
% T0 = tiempo de muestreo expresado en muestras (ej: T0=2 => 2*seg_T0). No
% necesariamente debe ser igual a valor en muestras de seg_T0
% min_cor = indice de corrimiento de la ventana expresada en minutos
% sw = 0 (absoluta), 1 (diferencial)
if size(x1,1)>size(x1,2)
    x1=x1';
end
if size(x2,1)>size(x2,2)
    x2=x2';
end
min=ven;
dat=(60*min)/(seg_T0*T0); % ventana expresada en datos
lv=dat;
i_c=(60*min_cor)/(seg_T0*T0); % indice de corrimiento expresado en datos
nc=0; % contador
if length(x1)==length(x2)
    for i=1:i_c:length(x1)-1-lv
        rho_x1x2=correl(x1(i:i+lv),x2(i:i+lv),sw); % calcula correlacion durante
ventana
        nc=nc+1;
        mrho_x1x2(nc,:)=rho_x1x2;
    end
end
end
end

```

A.4. Código correl

```
function v=correl(x,y,sw)
% Calcula correlacion
% x e y variables
% sw=0 absoluta/ sw=1 diferencial
n_largo = size(x,2);
if sw == 1;
    n_largo= n_largo-1;
    for i=1:n_largo;
        x(i)=x(i)-x(i+1);
        y(i)=y(i)-y(i+1);
    end
end
wmy=0.0;
wmx=0.0;
for i=1:n_largo
    v(i)=0;
end
% calculo de la media
for i=1:n_largo,
    wmy=wmy+y(i)/n_largo;
    wmx=wmx+x(i)/n_largo;
end
% calculo de varianza
vmy=0.0;
vmx=0.0;
for i=1:n_largo,
    vmy=vmy+(y(i)-wmy)^2/n_largo;
    vmx=vmx+(x(i)-wmx)^2/n_largo;
end
% calculo de covarianza y coeficiente de correlación
for i=1:n_largo-1,
    if ((vmx <= 10e-12) | (vmy <= 10e-12)),
        v(i)=0;
    else
        w2(i)=0.0;
        for k=1:n_largo-i+1;,
            w2(i)=w2(i)+((y(k)-wmy)*(x(k+i-1)-wmx))/n_largo;
        end
        v(i)=w2(i)/sqrt(vmy*vmx);
    end
end
end
```



A.5. Código modelo_arx_dif

```
%% modelo arx diferencial
%=====
% formula (1er orden): y(k)=y(k-1)+a1*[y(k-1)-y(k-2)]+b1*[u(k-1)-u(k-2)]
% Variables de salida: || Variables de salida
% det=determinante || y=salida
% m_det=promedio determinantes || u=entrada
% theta=parametros calculados || lim_det=limite determinante
```

```

% th_est=parametros estimados           || sw_det=switch determinante
% var_par=varianza cada parametro       || t0=tiempo muestreo señales
% std_par=desviacion estandar c/parametro || na=orden autoregresivo
% ye=salida estimada                    || nb=orden media movil
% e=error de estimacion                  || td=tiempo retardo
% ECM=error cuadratico medio            || m=tamaño ventana
% pp=sirve para analisis final
%=====
% Notas: sw=0: lim_det=lo elige el usuario, sw=1: lim_det=m_det
%       th_est es la media de cada parametro
%       t0 y td deben ser enteros (t0>=1)
function [detMtM,m_det,theta,th_est,var_par,std_par,ye,e,ECM,punt]=...
    modelo_arx_dif(y,u,sw_det,lim_det,t0,na,nb,td,m,limit,alpha_par)

% maximo orden
nmax=max([na nb]);

% ajuste muestreo
y_t0=y(1:t0:length(y));u_t0=u(1:t0:length(u));

% verificacion largo señales
ly=length(y_t0);lu=length(u_t0);
if ly==lu
    lm=ly;
else
    minl=min([ly lu]);
    y_t0=y_t0(1:minl);u_t0=u_t0(1:minl);
    lm=minl;
end

% verificacion tamaño matriz limites
if size(limit,1)~=2 && size(limit,2)~=1+na+nb
    detMtM=[];m_det=[];theta=[];
    th_est=[];var_par=[];std_par=[];
    ye=[];e=[];ECM=[];punt=[];
end

% evaluacion determinante
for i=1:lm-m-1
    ini=i;fin=i+m;
    v1=y_t0(ini+nmax+1+td-1:fin-1)';
    for j=1:na
        v2(:,j)=y_t0(ini+nmax+1+td-j:fin-j)-y_t0(ini+nmax+1+td-j-1:fin-j-1);
    end
    for j=1:nb
        v3(:,j)=u_t0(ini+nmax+1+td-j:fin-j)-u_t0(ini+nmax+1+td-j-1:fin-j-1);
    end
    M=[v1 v2 v3];
    detMtM(i)=det(M'*M);
end
m_det=mean(detMtM);
maxdet=max(detMtM);

% limitador determinante
if sw_det==0
    l_det=lim_det;
elseif sw_det==1;

```

```

    l_det=m_det;
end

% calculo parametros
par_ini(1:1+na+nb,1)=0.0; % inicializacion parametros
for i=1:lm-m-1
    ini=i;fin=i+m;
    v1=y_t0(ini+nmax+1+td-1:fin-1)';
    for j=1:na
        v2(:,j)=y_t0(ini+nmax+1+td-j:fin-j)-y_t0(ini+nmax+1+td-j-1:fin-j-1);
    end
    for j=1:nb
        v3(:,j)=u_t0(ini+nmax+1+td-j:fin-j)-u_t0(ini+nmax+1+td-j-1:fin-j-1);
    end
    M=[v1 v2 v3];Y=y_t0(ini+nmax+1+td:fin)';
    det_i=det(M'*M);
    sw_det(i)=1*(det_i>l_det)+0.0;
    par(:,i)=M'*M\M'*Y;
    for j=1:size(par,1)
        sw_par(i,j)=par(j,i)>limit(1,j) && par(j,i)<limit(2,j);
    end
    % sw_s(i,1)=sum(sw_par(i,:))/size(par,1);
    % sw_t(i)=sw_det(i)+sw_s(i);
    sw_s(i)=sw_par(i,1)&sw_par(i,2);
    for j=3:size(par,1)
        sw_s(i)=sw_par(i,j)&sw_s(i);
    end
    sw_t(i)=sw_det(i)&sw_s(i);
    if sw_t(i)==1.0
        if i<=1
            par_ant(:,i)=par_ini;
        else
            par_ant(:,i)=theta(:,i-1);
        end
        par2(:,i)=par(:,i);
        alpha_par(i)=0;
        theta(:,i)=alpha_par(i)*par_ant(:,i)+(1-alpha_par(i))*par2(:,i);
    else
        if i<=1
            par_ant(:,i)=par_ini;
        else
            par_ant(:,i)=theta(:,i-1);
        end
        theta(:,i)=par_ant(:,i);
    end
end
end

% Estimacion de los parametros calculados
if l_det<maxdet
    punt=find(sw_t==1);
    if isempty(punt)
        subpunt=find(detMtM>l_det);
        theta=par(:,subpunt);
    else
        theta=theta(:,punt);
    end
    for i=1:size(theta,1)
        th_est(i)=mean(theta(i,:));
    end
end

```

```

        var_par(i)=var(theta(i,:));
        std_par(i)=sqrt(var_par(i));
    end
else
    theta=[];
    th_est=[];
    var_par=[];
    std_par=[];
end

% Obtencion de la salida estimada (simumacion del sistema estimado)
if isempty(th_est)
    ye=[];
else
    for i=1:lm
        yr(i)=y_t0(i);
        if i<1+nmax+1+td
            ye(i)=y_t0(i);
        else
            x1=y_t0(i-1);
            for j=1:na
                x2(1,j)=y_t0(i-j)-y_t0(i-j-1);
            end
            for j=1:nb
                x3(1,j)=u_t0(i-td-j)-u_t0(i-td-j-1);
            end
            ye(i)=[x1 x2 x3]*th_est';
        end
    end
end

% Obtencion del error y del error cuadratico medio
if isempty(ye)
    e=[];ECM=[];
else
    e=yr-ye;
    ECM=sum(e.^2)/length(e);
end

end

```

A.6. Código filtraje

```

function y1=filtraje(y,alpha,gr)
y1(1)=y(1);
tf=length(y);
for i=2:tf,y1(i)=alpha*y1(i-1)+(1-alpha)*y(i)+gr*randn;end
end

```