

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA

**PROGRAMA DE DOCTORADO EN
INGENIERÍA BIOMÉDICA**

Tesis Doctoral

**ANÁLISIS DE COMPLEJIDAD DEL SISTEMA
RESPIRATORIO PARA LA AYUDA AL DIAGNÓSTICO DE
PATOLOGÍAS**

CARLOS GONZÁLEZ OBREGÓN

**Dept. d'Enginyeria de Sistemes, Automàtica i Informàtica
Industrial (ESAI)**

Centre de Recerca en Enginyeria Biomèdica (CREB)

Barcelona, junio 2002

**Directores: Dr. Pere Caminal Magrans
Dr. Salvador Benito Vales**

Aquesta Tesi Doctoral ha estat llegida avui dia 11 d'octubre de 2002 a la Sala d'Actes de la Facultat de Matemàtiques i Estadística de Barcelona (UPC) i ha obtingut la qualificació de: *Excel·lent Cum Laude*

Barcelona, 11 d'octubre de 2002.

El president,



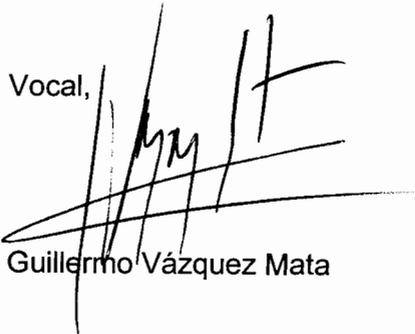
Raimon Jané Campos

El secretari del Tribunal,



Montserrat Vallverdú Ferrer

Vocal,



Guillermo Vázquez Mata

Vocal,



Pedro Gomis Román

Vocal,



Pere Joan Riu Costa

Dedicatoria

A Carla Angélica y a Miryam

Agradecimientos

El inicio de todo trabajo, en especial uno de investigación requiere del concurso de diversos entes y recursos para su consolidación y desarrollo, además de la voluntad de quienes ayudan a guiar, y no pocas veces a empujar para darle buena dirección y alcance al trabajo propuesto. El desarrollo de esta tesis no fue una excepción a esta forma, aunque además, las particularidades surgidas durante su realización me han sido especialmente provechosas y formativas, pues además de ser este trabajo una primera aproximación mía al estudio de los sistemas complejos, el aprendizaje humano y personal adquirido durante su elaboración trascendió con creces cualquier tipo de expectativa profesional.

Para lograr llegar a la actual situación, fueron de fundamental importancia varias instituciones y personas que en el camino tendieron la mano e indicaron el rumbo más conveniente en el proceso de concepción, desarrollo y culminación del trabajo, entre los cuales quiero agradecer:

Al Centre de Recerca en Enginyeria Biomèdica CREB, lugar mágico donde la bioingeniería, los estudios, la investigación y la amistad lograron mezclarse adecuada y creativamente desde finales de 1996, cuando decidí, con iguales dosis de ilusión y curiosidad continuar en otro ambiente el camino ya iniciado de la bioingeniería.

Al Hospital de la Santa Creu i Sant Pau, en especial a la Unidad de Cuidados Intensivos y a su generoso y dedicado personal.

A la Universidad Simón Bolívar y particularmente al Departamento de Tecnología Industrial, a la Dirección de Desarrollo Profesional y al Grupo de Bioingeniería y Biofísica Aplicada y todos sus integrantes de ayer y hoy.

Al FONACIT (antes CONICIT), por el apoyo financiero en los estudios de Doctorado y su fomento en pro de mejorar la calidad de la investigación en Venezuela.

A la AECI igualmente por el apoyo económico y por mantener y fortalecer los lazos iberoamericanos a través de sus programas de cooperación.

Probablemente sea poco y parco el agradecimiento que pueda manifestar por escrito para todos aquellos que desearon y confiaron en mí, cada uno a su manera, para verme llegar a esta culminante etapa del doctorado, por lo cual, y sin querer pasar por pretencioso, sientan que la mejor forma de manifestarles mi aprecio es por el contenido de este libro, del que me siento orgulloso. Este agradecimiento es especial para:

El Dr. Pere Caminal, guía, espíritu y fortaleza de la tesis; el Dr. Salvador Benito, inspirador, motivador y consecuente guía del trabajo clínico; a la doctora Beatriz Giraldo, entusiasta y colaboradora incansable; a los doctores y amigos Montse Vallverdú y Miguel Ángel Mañanas por sus largas conversaciones de lo simple y lo complejo; al Dr. Raimón Jané, contacto inicial y permanente apoyo del aspecto académico del doctorado.

A los profesores Joaquim Agulló, Daniel Kaplan, Ricard Solé, Andreas Voss y Jan Zebrowsky, ideólogos de la complejidad en la naturaleza y de la sencillez en su aprendizaje, demostrado en las clases y seminarios impartidos en la UPC.

Especialísimas ayudas para soportar las horas de estudio y un equilibrado horario de no estudio (dos atractores igualmente necesarios) fueron las compartidas con los amigos, y cuya lista resumo a continuación:

Abel y Amaya, Ana , Bernardo, Eric y Bety, Erik y Mariangels, Ernesto, Hernán y Noemí, David, Jordi S. y Maricarmen, Sergio, Pep, Oscar, Marco, Manuel, Pablo G., Pablo M., Raúl, Sandra, Toni H., Toni S.

A mis amigos y colegas que los siento hermanados por su ejemplo constante y amistad creciente, Pedro Gomis, Fernando Mora, Gianfranco Pasariello, Antonio Martínez y Luis Lara

Por último quiero agradecer a toda mi familia, mi hija, madre, padre, hermanas y hermano, sobrinos y sobrinas por su constante interés y preocupación por ver culminado este capítulo en mi vida.

Resumen de la tesis doctoral

“ANÁLISIS DE COMPLEJIDAD DEL SISTEMA RESPIRATORIO PARA LA AYUDA AL DIAGNÓSTICO DE PATOLOGÍAS”

Realizada por: Carlos H. González Obregón

Dirigida por: Dr. Pere Caminal Magrans

Dr. Salvador Benito Vales

Este trabajo se inspira en la importancia que en el sostenimiento de la vida posee el sistema respiratorio humano, unido a la necesidad de aumentar la información sobre su funcionamiento dinámico y de elemento integrador de diversos subsistemas como los de anatomía, fisiología, regulación, control y características físico-químicas apropiadas para su actividad. Son de interés especial en esta pretensión el estudio de la variabilidad del patrón respiratorio mediante métodos de análisis de complejidad de sistemas no lineales.

El trabajo desarrollado comienza con la definición del patrón respiratorio humano, el cual permitirá definir las tres series temporales de fundamental importancia: Tiempo Inspiratorio, T_I , Tiempo Total T_{TOT} y volumen circulante V_T , obtenidas a partir de los registros continuos de volumen de aire en cada ciclo respiratorio. En el capítulo 1 se realiza también la descripción del estado del arte en variabilidad respiratoria. Se prosigue con una introducción al estudio de los sistemas dinámicos complejos, y finaliza con la formulación del objetivo fundamental de la tesis, y sus seis objetivos secundarios.

El procesado de la señal de volumen pulmonar se presenta en el capítulo 2, desarrollándose las etapas de filtrado y detección automatizada de ciclos respiratorios, y de esta manera tener identificados los componentes que definen el patrón ventilatorio. Se describen allí las dos bases de datos utilizadas en el estudio del análisis de complejidad, la de registros pletismográficos del Hospital de la Santa Creu i Sant Pau (PRI-HSCSP) y la de registros polisomnográficos del MIT. Se han propuesto diversos algoritmos que realicen la determinación ciclo a ciclo de los instantes de inicio y fin inspiratorio, considerando distintos umbrales de tiempo y de flujo del patrón ventilatorio, que en conjunto representan diversos criterios de valorar el volumen de aire desplazado en las vías aéreas durante cada ciclo respiratorio. Los algoritmos desarrollados fueron validados sobre un conjunto de señales de volumen respiratorio, al contrastarse sus resultados con los indicados por un grupo de médicos neumólogos, logrando una muy elevada reproducibilidad.

Es comúnmente aceptado que existen dos condiciones necesarias para realizar el análisis de complejidad en sistemas no lineales, una referida a garantizar la condición estacionaria de los registros. La segunda condición está referida a garantizar la no linealidad del sistema, comprobando que los registros no cumplen con el principio de superposición. El capítulo 3 de la tesis se ocupa de establecer cuales de los registros analizados cumplen con estas dos condiciones.

El estudio de los sistemas no lineales y sus índices de complejidad se inicia con el capítulo 4, primero analizando como características cualitativas de las series temporales

los mapas de fase y los diagramas de Poincaré. Los mapas de fase obtenidos permitieron clasificar en cinco diferentes topologías las estructuras generales que presentan los pacientes analizados: ciclos límite, órbitas cuasiperiódicas, trayectorias homoclínicas, trayectorias heteroclínicas y órbitas no estables. Este análisis permitió concluir que una particularidad del patrón respiratorio está dada por las diferencias cualitativas entre los registros de presión de soporte baja y alta, tanto para los mapas de fase como para los diagramas de Poincaré.

El análisis cuantitativo mediante los índices de complejidad se inicia en el capítulo 5, con la estimación del retardo adecuado necesario para la reconstrucción fiable del atractor del sistema, para posteriormente calcular la dimensión de las series temporales de dos formas diferentes y complementarias: mediante la dimensión fractal (D_f) de los Diagramas de Poincaré y mediante la dimensión de correlación (D_2). Ambos métodos permiten identificar en un 81,3% los resultados de la valoración clínica de los pacientes. El capítulo 5 termina con la estimación de las entropías aproximadas de las series temporales, que definen el grado de regularidad de los registros.

En el capítulo 6 se calculan los exponentes de Lyapunov mediante la técnica de la reconstrucción del atractor, con la finalidad de estudiar dos de sus principales implicaciones en la dinámica compleja como son la sensibilidad a las condiciones iniciales de las series y la estabilidad del sistema. Se han obtenido diferencias estadísticamente significativas ($p=0,001$) al comparar los pacientes con presión de soporte alta y baja. Se termina el capítulo proponiendo un nuevo índice combinado de complejidad para el análisis no lineal del patrón respiratorio, denominado Índice Combinado de Complejidad Ventilatoria (ICCV).

El séptimo y último capítulo analiza globalmente los resultados cualitativos y cuantitativos obtenidos en la tesis, con la doble finalidad de verificar la analogía con la valoración clínica de los pacientes que presentan patologías que requieren de asistencia con presión de soporte ventilatorio, lográndose un nivel de identificación del 94% con el ICCV propuesto. Adicionalmente los resultados del análisis de complejidad predicen la subyacencia de ciclos ventilatorios intermedios de entre 8 y 32 ciclos respiratorios resultado de las interacciones dinámicas complejas propias del sistema pulmonar.

La identificación de estructuras temporales y espaciales que engloben la variabilidad y complejidad del comportamiento de un sistema físico es parte clave en su definición y comprensión. El estudio del análisis de complejidad cualitativo y cuantitativo es una herramienta útil en la búsqueda de esta identificación, y en el caso particular del patrón ventilatorio, los resultados del análisis realizado permiten ver con optimismo una dirección a seguir para encontrar tales estructuras espacio-temporales en el sistema respiratorio. Como línea de investigación futura cabe destacar la aplicación de estos resultados a la ayuda en la toma de decisión del momento óptimo para la desconexión de los pacientes sometidos a ventilación mecánica, al considerarse que el sistema respiratorio con una complejidad más elevada ya es capaz de actuar de forma autónoma.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1 Patrón Respiratorio Humano	2
1.1.1 Principios Fisiológicos de la Respiración	2
1.1.2 Sistema de Control Ventilatorio.	4
1.1.3 Ventilación Mecánica en las Unidades de Cuidados Intensivos	6
1.2 Estado del Arte en Variabilidad Pulmonar	7
1.3 Análisis de Complejidad de los Sistemas Dinámicos.....	10
1.3.1 Termodinámica de los Procesos Biológicos	10
1.3.2 Análisis de Complejidad de Sistemas Biológicos.....	12
1.4 Descripción de los Objetivos de la Tesis	14
Capítulo 2. Procesado de la Señal de Volumen Pulmonar.....	17
2.1 Introducción	17
2.2 Adquisición de la Base de Datos de Señales de Volumen Pulmonar PRI-HSCSP	18
2.2.1 Pletismografía Respiratoria por Inductancia (PRI).....	18
2.2.2 Definición de las Condiciones de Registro.....	20
2.2.3 Información Clínica de los Pacientes.....	20
2.3 Base de Datos de Polisomnografía del MIT	22
2.4 Algoritmos de Detección de los Ciclos Respiratorios.....	24
2.4.1 Obtención de la Señal de Flujo Aéreo	25
2.4.2 Consideraciones sobre los Umbrales de Flujo.....	27
2.4.3 Algoritmos Propuestos	29
2.5 Validación de los Algoritmos de Detección.....	30
2.5.1 Características de los Registros Utilizados en la Validación.....	31
2.5.2 Reproducibilidad de las Series Temporales de T_I y T_{TOT}	33
2.5.3 Análisis de la validación del algoritmo seleccionado respecto al tipo de señal.....	36
2.5.4 Resultados de la Validación	37

ÍNDICE DE CONTENIDO

2.6	Las Series Temporales de T_i , T_{TOT} y V_T	37
2.7	Conclusiones	40
Capítulo 3.	Análisis de Estacionaridad y Detección del Determinismo No Lineal.....	45
3.1	Introducción	45
3.2	Análisis de Estacionaridad	46
3.2.1	Test de Estacionaridad a las Series Temporales Completas.....	46
3.2.2	Registros Aproximadamente Estacionarios	54
3.3	Detección del Determinismo No Lineal	57
3.4	Resultados.....	63
3.5	Conclusiones	64
Capítulo 4.	Estudio de los Mapas de Fase y Diagramas de Poincaré.....	67
4.1	Introducción	67
4.2	Mapas de Fase: Definición.....	70
4.3	Mapas de Fase de Osciladores no lineales.....	70
4.4	Mapas de Fase de los Registros de Volumen Circulante	73
4.4.1	Mapas de Fase en la base de datos del MIT.....	74
4.4.2	Mapas de Fase en la base de datos PRI-HSCSP	75
4.5	Dependencia del tamaño de la muestra y los mapas de Fase	78
4.6	Diagramas de Poincaré del Patrón Ventilatorio.....	82
4.7	Resultados del Análisis Cualitativo.....	86
4.8	Conclusiones	88
Capítulo 5.	Dimensión Compleja del Patrón Respiratorio.....	91
5.1	Introducción	91
5.2	Retardo τ adecuado para la reconstrucción de las señales	93
5.2.1	Retardo $\tau = 1$	94
5.2.2	Primer mínimo función de autocovarianza.....	95

ÍNDICE DE CONTENIDO

5.2.3	Autocovarianza con valor $1/e$	96
5.2.4	Autocovarianza con valor nulo.....	97
5.2.5	Retardo adecuado para las serie temporales	99
5.3	Estimación de la Dimensionalidad de Sistemas Complejos.....	101
5.3.1	Dimensión Fractal (D_f) de un objeto.....	101
5.3.2	Dimensión de Correlación y Reconstrucción del Atractor.....	102
5.4	Dimensionalidad del Patrón Ventilatorio.....	103
5.4.1	Dimensionalidad en las Etapas de Vigilia y Sueño	105
5.4.2	Dimensionalidad con Condiciones de Presión de Soporte Variable.....	107
5.4.3	Dimensionalidad de los diagramas de Poincaré (DP) del patrón ventilatorio	112
5.5	Cálculo de las Entropías de Sistemas Complejos	115
5.5.1	Entropías en los Registros de Vigilia y Sueño	116
5.5.2	Entropías Aproximadas de las Series Temporales	117
5.5.3	Entropías Aproximadas de los Diagramas de Poincaré.....	121
5.6	Conclusiones	123
5.6.1	Retardo Adecuado para la Reconstrucción de la Señal.....	123
5.6.2	Dimensionalidad del Patrón Ventilatorio	124
5.6.3	Entropías del Patrón Ventilatorio	126
Capítulo 6.	Dinámica Compleja del Sistema Respiratorio: Exponentes de Lyapunov.....	129
6.1	Introducción	129
6.2	Características de los Exponentes de Lyapunov (λ).....	131
6.3	Cálculo del Exponente Máximo de Lyapunov.....	132
6.4	Medidas del Exponente de Lyapunov en el Sistema Respiratorio	135
6.4.1	Medidas en la base de Datos MIT.....	136
6.4.2	Medidas en la base de datos PRI-HSCSP.....	137
6.4.3	Ajuste de la Dimensión de Inmersión (D_E) para el cálculo de los λ_M	141
6.4.4	Ajuste del número de Puntos de Vecindad (p_v) para el cálculo de los λ_M	143
6.5	Resultados del Análisis del Exponente de Lyapunov	143

ÍNDICE DE CONTENIDO

6.6	Índice Combinado de Complejidad Ventilatoria (ICCV)	148
6.7	Conclusiones	150
Capítulo 7.	Conclusiones	153
7.1	Introducción	153
7.2	Aportaciones de la Tesis.....	155
7.2.1	Análisis de Complejidad del Sistema Respiratorio en las etapas de Vigilia y Sueño.....	155
7.2.2	Análisis de Complejidad del Sistema Respiratorio con Presión de Soporte Variable	156
7.2.3	Índice Combinado ICCV.....	159
7.3	Extensiones Futuras	159
Bibliografía	161

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Componentes principales del Patrón Ventilatorio V_T , T_I , T_E y T_{TOT}	4
Figura 1.2	Anatomía pulmonar. a. Traquea y bronquios. b. Corte longitudinal. c. Músculos externos. d. Integración corazón- pulmón. e. Caja torácica.	5
Figura 2.1	Segmento de registro de la base de datos polisomnográficos del M.I.T.....	23
Figura 2.2	Procesamiento de la señal de volumen ventilatorio y series temporales generadas.	24
Figura 2.3	a. Registro pletismográfico de Volumen Circulante del paciente Sat (base de datos PRI-HSCSP), b. Señal de flujo en las vías aéreas, correspondiente al segmento de volumen mostrado en a.	26
Figura 2.4	Detecciones de T_I y T_{TOT} , con variaciones del parámetro F_{UU} . a. Nulo, ($F_{UU} = 0$ ml/s). b. Medio ($F_{UU} = 150$ ml/s), c. Máximo ($F_{UU} = 250$ ml/s). Registro del paciente RppSB de la Base de datos PRI-HSCSP.....	28
Figura 2.5	a. Ciclo respiratorio con inicio inspiratorio normal, señal de validación VH05. b. Ciclo respiratorio con inicio inspiratorio de ubicación ambigua, señal de validación VH03.	29
Figura 2.6	Segmento de la señal temporal de Volumen circulante, proveniente del registro de validación VH01, con las marcas de inicio y fin inspiratorio realizadas por el sistema automático.	33
Figura 2.7	Gráfico de las series temporales obtenidas para el registro SatSB. a. T_I (inferior) y T_{TOT} (superior) b. Volumen V_T	38
Figura 2.8	Gráfico de las series temporales obtenidas para el registro SatSA. a. T_I (inferior) y T_{TOT} (superior), b. Volumen V_T	39
Figura 2.9	a. Serie temporal de T_{TOT} del registro SatSB, y valores \bar{x} , $\bar{x} + SD$, $\bar{x} - SD$. b. Serie temporal de T_{TOT} para el registro SatSA, \bar{x} , $\bar{x} + SD$, $\bar{x} - SD$	42
Figura 3.1	Test estacionario para la desviación estándar de volumen del registro SatSB.....	49

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.2	Test estacionario de la desviación estándar de volumen del registro FcsSB.....	50
Figura 3.3	Test estacionario del valor medio de T_{TOT} del registro JgcSA.	50
Figura 3.4	Registro Estacionario SatSB. a. Señal del volumen circulante $V(t)$, b. Desviación estándar del volumen circulante, c. Serie temporal de T_{TOT} , d. Serie temporal de V_T	51
Figura 3.5	Registro No Estacionario JbmSA. a. Señal del volumen circulante $V(t)$, b. Desviación estándar del volumen circulante, c. Serie temporal de T_{TOT} , c. Serie temporal de V_T	52
Figura 3.6	a. Serie Temporal de T_I del registro SatSB, b. Espectro de Potencia de la serie T_I	60
Figura 3.7	a. Serie Temporal de valores surrogate data de T_I^* del registro SatSB, b. Espectro de Potencia de la serie temporal T_I^*	61
Figura 4.1	Series temporales de modelos oscilatorios: a. Ecuación de van der Pol, b. Modelo de Rossler.....	72
Figura 4.2	Mapas de Fase (adimensionales): a. Ecuación de van der Pol, b. Modelo de Rossler.....	73
Figura 4.3	Mapas de fase de un segmento de la señal del MIT para el mismo paciente: a. Registro en etapa de Sueño, b. Registro en etapa de Vigilia.....	74
Figura 4.4	Mapa de Fases del Registro SatSB, señal de flujo aéreo, señal de volumen y diagrama tridimensional de volumen, flujo y tiempo.	76
Figura 4.5	Diversas estructuras que presentan los Mapas de Fase de los registros de volumen: a. Trayectoria tipo ciclo límite, b. Trayectoria cuasiperiódica, c. Trayectoria homoclínica, d. Trayectoria no estable.....	77
Figura 4.6	Mapas de Fase a. Registro completo y b. Segmento de 2 minutos del registro SatSB.	78
Figura 4.7	Mapas de Fase a. Registro completo y b. Segmento de 2 minutos del registro JgcSA.	79
Figura 4.8	Mapa de fases del registro JgcSA segmentado.....	80
Figura 4.9	Mapas de Fase a. Registro completo y b. Segmento de 2 minutos del registro MglSB.....	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.10	Mapa de fases del registro MglSB, segmentado	81
Figura 4.11	Sección de Poincaré (SP) del mapa de fases Volumen-Flujo de los registros cíclicos del patrón ventilatorio, normalizado respecto al tiempo T_{TOT}	83
Figura 4.12	Diagrama de Poincaré del registro Sat: a. con PSB y b. con PSA, obtenidos de las series temporales V_T vs. T_i/T_{TOT}	84
Figura 5.1	Función de autocovarianza y valor de τ para las series temporales de la señal SatSB.....	95
Figura 5.2	Función de autocovarianza normalizada y valor de τ para la serie temporal T_i de la señal SatSB.....	97
Figura 5.3	Retardo τ para las ocho series temporales de V_T , con los tres métodos de estimación aplicados.....	100
Figura 5.4	Dimensión de Correlación en función de la dimensión de inmersión (D_E) en la serie de T_i del registro RfeSB, y $\tau = 2$	107
Figura 5.5	Dimensión de correlación D_2 para los registros de las tres series temporales obtenidas de la base de datos PRI-HSCSP, para condición de presión de soporte alta.....	109
Figura 5.6	Valor de la entropía aproximada en función del porcentaje de la desviación estándar, para la serie temporal de volumen V_T , del registro SatSB.....	119
Figura 6.1	Progresión de la divergencia logarítmica de la Ecuación de Rossler. La pendiente de la regresión lineal es el λ_m	134
Figura 6.2	Ecuación de Mackey-Glass del modelo Respiratorio a. Serie temporal de la concentración de CO_2 , b. Mapa de fases de la concentración de CO_2	135
Figura 6.3	Logaritmo de la divergencia en función de los puntos de vecindad de la serie T_i del registro SatSB.....	138

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1	Respuesta clínica referida a la condición de los pacientes en los registros de la base de datos PRI-HSCSP (explicación en el texto).....	21
Tabla 2.2	Valores de los umbrales de flujo y tiempo utilizados en los algoritmos de detección de ciclos respiratorios.....	30
Tabla 2.3	Codificación de las señales utilizadas en la validación y su correspondiente identificación con el código del paciente.	31
Tabla 2.4	Valoración de la fiabilidad en la reproducibilidad de los datos. Tabla de Landis	34
Tabla 2.5	Valores del Índice de Fiabilidad R calculado entre el experto 1 (E1) y los algoritmos AA, AB, AC y AD para las series temporales de T_i y T_{TOT}	35
Tabla 2.6	Valores del Índice de Fiabilidad R calculados entre el experto 2 (E2) y los algoritmos AA, AB, AC y AD. para las series temporales de T_i y T_{TOT}	35
Tabla 2.7	Valores del Índice de Fiabilidad R calculados entre el experto 1 (E1) y el experto 2 (E2).....	36
Tabla 2.8	Valores del ICC para el algoritmo escogido, relativos al tipo de señal y registro ventilatorio comparando los valores del algoritmo AD y los expertos E1 y E2. Cálculo para la serie temporal de T_i	36
Tabla 2.9	Valores promedios de las series temporales de T_i , T_{TOT} y V_t para los registros SatSB y SatSA, y medida del coeficiente de variación (CV) calculado como $(SD / X) \times 100$	40
Tabla 3.1	Resultados del test estacionario aplicado a los registros de la base de datos PRI-HSCSP.....	53
Tabla 3.2	Resultados del test estacionario aplicado a los registros con PSB segmentados que presentaban condición de no estacionaridad.	55
Tabla 3.3	Resultados del test estacionario aplicado a los registros con PSA segmentados que presentaban condición de no estacionaridad.	56
Tabla 3.4	Resultados de las Entropías Aproximadas ($EnAp$) de las señales originales, $EnAp$ de los <i>surrogate data</i> , y significación estadística p calculada por la prueba t	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.5	Resultados del test estacionario aplicado a los registros de la base de datos PRI-HSCSP.....	64
Tabla 4.1	Clasificación cualitativa de los DP de los registros de la base de datos PRI-HSCSP. PSB: Presión de soporte Baja. PSA: Presión de soporte Alta.....	85
Tabla 4.2	Determinación de la condición con PSB y PSA mediante el análisis cualitativo de los diagramas de Poincaré	87
Tabla 5.1	Valores del retardo τ obtenidos por el primer mínimo relativo de la función de autocovarianza de las series temporales.....	96
Tabla 5.2	Valor del retardo τ para el cual la función de autocovarianza (normalizada), es igual a $1/e$	98
Tabla 5.3	Valor del retardo τ para el cual la función de autocovarianza (normalizada) es igual a 0.....	98
Tabla 5.4	Valores de la dimensión de correlación de modelos teóricos del sistema respiratorio.....	104
Tabla 5.5	Valores de la dimensión de correlación del volumen circulante en animales de laboratorio, reportada por diferentes autores.	104
Tabla 5.6	Valores de la dimensión de correlación de señales respiratorias en humanos.....	105
Tabla 5.7	Dimensiones fractal (D_F) y de correlación (D_2) para la serie temporal de T_I de los registros de la base de datos MIT.....	106
Tabla 5.8	Dimensiones fractal (D_F) y de correlación (D_2) para la serie temporal de T_{TOT} de los registros de la base de datos MIT.....	106
Tabla 5.9	Dimensión de correlación de las series temporales de T_I , T_{TOT} y V_T . Condición de presión de soporte baja (PSB).....	108
Tabla 5.10	Dimensión de correlación de las series temporales de T_I , T_{TOT} y V_T . Condición de presión de soporte alta (PSA).....	109
Tabla 5.11	Valor medio, desviación estándar y significación estadística de la dimensión de correlación, para registros de pacientes con PSB y PSA.	110
Tabla 5.12	Criterios de analogía de dimensión de correlación para la serie temporal de T_{TOT} en PSB y PSA.....	111

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 5.13	Dimensión fractal medida por el método de Box Counting de los diagramas de Poincaré obtenidos en la sección 4.6 (NE: Registro no Estacionario).....	113
Tabla 5.14	Valor medio, desviación estándar y significación estadística de la dimensión fractal de los DP, para registros de pacientes con PSB y PSA.....	114
Tabla 5.15	Criterios de analogía de dimensión fractal (o de Box Counting) para los diagramas de Poincaré, para los registros en PSB y PSA, junto con la valoración clínica (VC) y Dz.....	115
Tabla 5.16	Valores de la entropía calculados para los registros de la base de datos MIT.....	117
Tabla 5.17	Entropías aproximadas de las series temporales del patrón ventilatorio para señales de pacientes con PSB.....	120
Tabla 5.18	Entropías aproximadas de las series temporales del patrón ventilatorio para señales de pacientes con PSA.....	121
Tabla 5.19	Valor medio, desviación estándar y significación estadística de la EnAp de los registros con PSB y PSA.....	121
Tabla 5.20	Valores de la entropía aproximada de los diagramas de Poincaré. NE: Señal no estacionaria.....	122
Tabla 5.21	Valor medio, desviación estándar y significación estadística de la Entropía Aproximada para los DP de los registros de pacientes con PSB y PSA.....	123
Tabla 6.1	Valores de λ_{μ} para los estados de Vigilia y sueño de las series T_i y T_{TOT} de la base de datos MIT.....	137
Tabla 6.2	Exponentes máximos de Lyapunov de las series temporales T_i , T_{TOT} y V_T para señales de pacientes con PSB.....	139
Tabla 6.3	Exponente de Lyapunov máximos de las series temporales T_i , T_{TOT} y V_T para señales de pacientes con PSA.....	140
Tabla 6.4	Valor medio, desviación estándar y significación estadística (p) de los exponentes máximos de Lyapunov, para los registros de PSB y PSA.....	141
Tabla 6.5	Exponentes máximos de Lyapunov de las series T_{TOT} , para registros con PSB en función de la DE.....	141

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 6.6	Exponentes máximos de Lyapunov de las series T_{TOT}, para registros con PSA en función de la DE.....	142
Tabla 6.7	Valores medios, desviación estándar y significación estadística p, de los de exponentes de Lyapunov, de las series T_{TOT} en función de la DE	143
Tabla 6.8	Exponentes máximos de Lyapunov de las series T_{TOT}, para registros con PSB en función de los puntos de vecindad p_v, con $DE = 14$...	144
Tabla 6.9	Exponentes máximos de Lyapunov de las series T_{TOT}, para registros con PSA en función de los puntos de vecindad p_v, con $DE = 14$...	145
Tabla 6.10	Valor medio, desviación estándar y significación estadística de los exponentes de Lyapunov, de las series T_{TOT} en función de p_v, con $DE = 14$.....	146
Tabla 6.11	Criterios de analogía del λ_M para la serie temporal de T_{TOT} en PSB y PSA, para $DE = 14$ y $p_v = 8$.....	147
Tabla 6.12	Formación del Índice Combinado Complejidad Ventilatoria en función de la Dimensión de Correlación, la Dimensión Fractal y los Exponentes de Lyapunov.....	149