

# Índice General

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. Introducción</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1. Motivación . . . . .  | 2         |
| 1.2. Objetivos Generales . . . . .   | 3         |
| 1.3. Organización del Documento. . . . .   | 4         |
| <b>2. El corazón. Funcionamiento y patologías</b>  | <b>7</b>  |
| 2.1. Anatomía del corazón . . . . .  | 8         |
| 2.2. El latido cardíaco . . . . .  | 8         |
| 2.3. Sistema de conducción . . . . .   | 9         |
| 2.4. El Electrocardiograma (ECG) . . . . .   | 12        |
| 2.4.1. Derivaciones de extremidades . . . . .  | 16        |
| 2.4.2. Derivaciones de extremidades aumentadas . . . . .                                   | 16        |
| 2.4.3. Derivaciones precordiales . . . . .   | 16        |
| 2.5. Arritmias cardíacas . . . . .   | 17        |
| 2.5.1. Arritmias ventriculares . . . . .   | 18        |
| 2.5.2. Arritmias supraventriculares . . . . .  | 19        |
| 2.6. Fibrilación auricular . . . . .   | 19        |
| 2.6.1. Clasificación . . . . .   | 20        |
| 2.6.2. Epidemiología e impacto clínico . . . . .   | 22        |
| 2.6.3. Tratamiento . . . . .   | 23        |
| <b>3. Estado del Arte</b>  | <b>25</b> |
| 3.1. Problemática del Ruido en Registros Biomédicos . . . . .                              | 27        |
| 3.2. Técnicas para la Reducción de Ruido Muscular . . . . .                                | 28        |
| 3.2.1. Métodos basados en técnicas clásicas de filtrado . . . . .                          | 28        |
| 3.2.2. Métodos basados en el promedio de latidos . . . . .                                 | 29        |
| 3.2.3. Métodos basados en filtros adaptativos . . . . .                                    | 29        |
| 3.2.4. Métodos basados en la transformada Wavelet . . . . .                                | 31        |
| 3.2.5. Métodos basados en análisis de componentes independientes . . . . .                 | 33        |
| 3.2.6. Métodos basados en filtros Kalman . . . . .   | 34        |
| 3.2.7. Métodos basados en filtros Wiener . . . . .   | 35        |
| 3.3. Técnicas para la Reducción de las Variaciones de la deriva de la Línea Base . . . . . | 36        |
| 3.3.1. Métodos basados en filtros clásicos . . . . .                                       | 37        |
| 3.3.2. Métodos basados en filtros adaptativos . . . . .                                    | 37        |
| 3.3.3. Métodos basados en aproximación mediante funciones . . . . .                        | 38        |
| 3.3.4. Métodos basados en filtros variables en el tiempo . . . . .                         | 39        |
| 3.3.5. Métodos basados en filtros wavelets . . . . .                                       | 40        |

|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| 3.4.      | Técnicas para la Reducción de la Interferencia de Red . . . . .                    | 40        |
| 3.4.1.    | Métodos basados en filtros Notch . . . . .   | 41        |
| 3.4.2.    | Métodos basados en filtros adaptativos . . . . .                                   | 42        |
| 3.4.3.    | Otros Métodos . . . . .  | 43        |
| 3.5.      | Técnicas de extracción de Actividad Auricular . . . . .                            | 43        |
| 3.5.1.    | Métodos basados en Template Matching and Subtraction . . . . .                     | 44        |
| 3.5.2.    | Métodos basados en la cancelación adaptativa de la actividad ventricular . . . . . | 44        |
| 3.5.3.    | Métodos basados en técnicas de cancelación espacio-temporales . . . . .            | 45        |
| 3.5.4.    | Métodos basados en el procesado separado de QRS y la onda T . . . . .              | 45        |
| 3.5.5.    | Métodos basados en técnicas de cancelación mediante Redes Neuronales . . . . .     | 46        |
| 3.5.6.    | Métodos basados en Análisis de Componentes Independientes . . . . .                | 47        |
| 3.5.7.    | Métodos basados en Análisis por Componentes Principales . . . . .                  | 48        |
| 3.5.8.    | Métodos basados en extracción mediante Wavelets . . . . .                          | 48        |
| <b>4.</b> | <b>Materiales</b> . . . . .  | <b>51</b> |
| 4.1.      | Introducción . . . . .   | 52        |
| 4.2.      | Base de datos electrocardiográfica de Physiobank . . . . .                         | 52        |
| 4.3.      | Señales de ECG sintetizadas . . . . .  | 54        |
| 4.3.1.    | Ruido muscular y artefactos . . . . .  | 55        |
| 4.3.2.    | Variaciones de línea Base . . . . .  | 55        |
| 4.3.3.    | Interferencia de red . . . . .   | 56        |
| 4.3.4.    | Fibrilación auricular mediante funciones sinusoidales . . . . .                    | 56        |
| 4.3.5.    | Fibrilación auricular a partir de segmentos de FA . . . . .                        | 57        |
| 4.4.      | Configuración final de la Base de Datos . . . . .                                  | 58        |
| <b>5.</b> | <b>Redes Neuronales</b> . . . . .  | <b>61</b> |
| 5.1.      | Redes Neuronales . . . . .   | 63        |
| 5.1.1.    | Introducción . . . . .   | 63        |
| 5.2.      | Historia de las redes neuronales . . . . .   | 64        |
| 5.3.      | Generalidades . . . . .  | 65        |
| 5.3.1.    | Definiciones de una red neuronal . . . . .   | 65        |
| 5.3.2.    | Ventajas que ofrecen las redes neuronales . . . . .                                | 66        |
| 5.4.      | Elementos Básicos . . . . .  | 68        |
| 5.4.1.    | Elementos básicos que componen una red neuronal. . . . .                           | 68        |
| 5.4.2.    | Función de entrada (input function) . . . . .                                      | 68        |
| 5.4.3.    | Función de activación . . . . .  | 69        |
| 5.4.4.    | Función de salida . . . . .  | 70        |
| 5.5.      | Aprendizaje, Validación y Codificación . . . . .                                   | 71        |
| 5.5.1.    | Niveles o capas de una red neuronal . . . . .                                      | 71        |
| 5.5.2.    | Tipos de neuronas artificiales . . . . .   | 71        |
| 5.5.3.    | Taxonomía de las redes Neuronales . . . . .  | 71        |
| 5.5.4.    | Técnicas de decisión . . . . .   | 72        |
| 5.5.5.    | Mecanismos de aprendizaje . . . . .  | 74        |
| 5.5.6.    | Elección del conjunto inicial de pesos . . . . .                                   | 77        |
| 5.5.7.    | Detención del proceso de aprendizaje . . . . .                                     | 77        |
| 5.5.8.    | Codificación de los datos de entrada . . . . .                                     | 78        |
| 5.5.9.    | Validación de la red neuronal . . . . .  | 79        |
| 5.5.10.   | Cuestiones a resolver al trabajar con una red neuronal . . . . .                   | 79        |
| 5.6.      | Principales Topologías de las Redes Neuronales . . . . .                           | 79        |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 5.6.1.    | Redes monocapa . . . . .   | 79         |
| 5.6.2.    | Redes multicapa . . . . .  | 80         |
| 5.6.3.    | Conexión entre neuronas . . . . .                                      | 80         |
| 5.6.4.    | Redes de propagación hacia atrás (backpropagation). . . . .            | 80         |
| 5.6.5.    | Estructura de la Red Hopfield . . . . .                                | 80         |
| 5.6.6.    | Asociaciones entre la información de entrada y salida . . . . .        | 82         |
| 5.7.      | Aproximación Funcional Mediante Funciones . . . . .                    | 83         |
| 5.7.1.    | Redes FBR . . . . .  | 84         |
| 5.7.2.    | Diseño de Redes de Funciones de Base Radial . . . . .                  | 87         |
| 5.7.3.    | Cálculo de parámetros de una FBRN mediante métodos numéricos . . . . . | 88         |
| 5.7.4.    | Algoritmos de Clustering . . . . .                                     | 91         |
| 5.7.5.    | Algoritmos para la inicialización de radios de FBRs . . . . .          | 98         |
| 5.7.6.    | Métodos evolutivos . . . . .   | 100        |
| 5.8.      | Aplicaciones de las redes neuronales . . . . .                         | 101        |
| <b>6.</b> | <b>Métodos</b> . . . . .   | <b>105</b> |
| 6.1.      | Introducción . . . . .   | 106        |
| 6.2.      | Método para la reducción de ruido . . . . .                            | 106        |
| 6.2.1.    | Sistema Basado en Perturbación Simultánea . . . . .                    | 107        |
| 6.2.2.    | Sistema Basado en Widrow-Hoff Delta . . . . .                          | 112        |
| 6.3.      | Método para la reducción del complejo QRST . . . . .                   | 117        |
| 6.4.      | Método para reducción de latidos ectópicos . . . . .                   | 122        |
| 6.5.      | Rendimiento de los algoritmos . . . . .                                | 124        |
| 6.6.      | Análisis de rendimiento de los algoritmos . . . . .                    | 126        |
| 6.6.1.    | Red Neuronal para la reducción de ruido presente en ECG . . . . .      | 126        |
| 6.6.2.    | Red Neuronal para la reducción del complejo QRST . . . . .             | 129        |
| 6.6.3.    | Red Neuronal para la disminución del latido ectópico . . . . .         | 130        |
| <b>7.</b> | <b>Resultados y discusión</b> . . . . .                                | <b>133</b> |
| 7.1.      | Presentación de resultados . . . . .                                   | 135        |
| 7.2.      | Registros de señal ECG con ruido muscular . . . . .                    | 136        |
| 7.2.1.    | Registro RM-1 . . . . .  | 136        |
| 7.2.2.    | Registro RM-2 . . . . .  | 136        |
| 7.2.3.    | Registro RM-3 . . . . .  | 137        |
| 7.3.      | Registros de señal ECG con deriva de la línea base . . . . .           | 139        |
| 7.3.1.    | Registro RB-1 . . . . .  | 139        |
| 7.3.2.    | Registro RB-2 . . . . .  | 140        |
| 7.3.3.    | Registro RB-3 . . . . .  | 140        |
| 7.4.      | Registros de señal ECG con ruido red . . . . .                         | 143        |
| 7.4.1.    | Registro RRed-1 . . . . .  | 143        |
| 7.4.2.    | Registro RRed-2 . . . . .  | 143        |
| 7.4.3.    | Registro RRed-3 . . . . .  | 144        |
| 7.5.      | Registros de cancelación del QRST . . . . .                            | 146        |
| 7.5.1.    | Registro QRST1 . . . . .   | 146        |
| 7.5.2.    | Registro QRST2 . . . . .   | 146        |
| 7.5.3.    | Registro QRST3 . . . . .   | 148        |
| 7.5.4.    | Registro QRST4 . . . . .   | 149        |
| 7.6.      | Registros de reducción del latido ectópico . . . . .                   | 150        |
| 7.6.1.    | Registro LE1 . . . . .   | 150        |

|  |            |
|--|------------|
| 7.6.2. Registro LE2 . . . . .  | 151        |
| 7.6.3. Registro LE3 . . . . .  | 151        |
| 7.7. Resumen de resultados . . . . .                                   | 153        |
| 7.8. Discusión . . . . .   | 163        |
| <b>8. Conclusiones, aportaciones y líneas futuras</b>                  | <b>167</b> |
| 8.1. Conclusiones . . . . .  | 168        |
| 8.2. Aportaciones . . . . .  | 169        |
| 8.3. Líneas futuras de investigación . . . . .                         | 171        |
| <b>9. Summary of the Doctoral Thesis</b>                               | <b>173</b> |
| 9.1. Introduction . . . . .  | 174        |
| 9.2. Materials . . . . .   | 176        |
| 9.3. Method . . . . .  | 179        |
| 9.3.1. Application of ANN for versatile preprocessing of ECG . . . . . | 179        |
| 9.3.2. RBF to Efficient QRST Cancellation . . . . .                    | 181        |
| 9.3.3. Performance assessment . . . . .                                | 187        |
| 9.4. Results . . . . .   | 190        |
| 9.4.1. Muscle noise . . . . .  | 191        |
| 9.4.2. Baseline noise . . . . .  | 193        |
| 9.4.3. Powerline interference . . . . .                                | 196        |
| 9.4.4. Twelve Lead Recordings . . . . .                                | 199        |
| 9.4.5. Single Lead Recordings . . . . .                                | 200        |
| 9.5. Discussion . . . . .  | 201        |
| 9.6. Conclusion . . . . .  | 203        |
| <b>Bibliografía</b>  | <b>228</b> |
| <b>Lista de tablas</b>   | <b>231</b> |
| <b>Lista de figuras</b>  | <b>236</b> |