

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Departament d'Enginyeria Electrònica

**ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD DEL
RITMO CARDÍACO MEDIANTE
TÉCNICAS ESTADÍSTICAS,
ESPECTRALES Y NO LINEALES**

Autor: Miguel Ángel García González
Director: Ramon Pallàs Areny

Febrero de 1998

BIBLIOGRAFÍA

*“Ordenar bibliotecas es ejercer de un modo silencioso y modesto el arte
de la crítica”*

Jorge Luis Borges

BIBLIOGRAFÍA

[Akaike, 1970] H. Akaike, "Statistical predictor identification", *Ann. Inst. Statist. Math.*, vol. 22, págs. 203-217, 1970.

[Akay, 1995] M. Akai, "Wavelets in Biomedical Engineering", *Annals of Biomedical Engineering*, vol. 23, págs. 531-542, 1995.

[Akselrod et al., 1981] S. Akselrod, D. Gordon, F.A. Ubel, D.C. Shannon, A.C. Barger and R.J. Cohen, "Power spectrum analysis of heart rate fluctuations: a quantitative probe of beat-to-beat cardiovascular control", *Science*, vol. 213, págs. 220-222, 1981.

[Akselrod et al., 1993] S. Akselrod, O. Oz, S. Eliash, "Neural and humoral factors in regulation of blood pressure in the investigation of essential hypertension" in *Blood Pressure and Heart Rate Variability*. Eds: M. Di Rienzo, G. Mancina, G. Parati, A. Pedotti and A. Zanchetti. Amsterdam: IOS Press, 1993.

[Algra et al., 1993] A. Algra, J.G.P. Tijssen, J.R.T.C. Roelandt, J. Pool and J. Lubsen, "Heart rate variability from 24-hour electrocardiography and the 2-year risk for sudden death", *Circulation*, vol. 88, págs. 180-185, 1993.

[Baldwa et al., 1977] V.S. Baldwa and D.J.Ewing, "Heart rate response to Valsalva manoeuvre. Reproducibility in normals, and relation to variation in resting heart rate in diabetics", *British Heart Journal.*, vol. 39, págs. 641-644, 1977.

[Baselli et al., 1985] G. Baselli, D. Bolis, S. Cerutti and C. Freschi, "Autoregressive modelling and power spectral estimate of R-R interval time series in arrhythmic patients", *Computers and Biomedical Research*, vol. 18, págs. 510-530, 1985.

[Baselli et al., 1986] G. Baselli, S. Cerutti, S. Civardi, D. Liberati, F. Lombardi, A. Malliani and M. Pagani, "Spectral and Cross-Spectral Analysis of Heart Rate and Arterial Blood Pressure Variability Signals", *Computers and Biomedical Research*, vol. 19, págs. 520-534, 1986.

[Baselli et al., 1987] G. Baselli, S. Cerutti, S. Civardi, F. Lombardi, A. Malliani, M. Merri, M. Pagani and G. Rizzo, "Heart rate variability signal processing: a quantitative approach as an aid to diagnosis in cardiovascular pathologies", *International Journal of Bio-Medical Computing*, vol. 20, págs. 51-70, 1987.

[Bassingthwaighte et al., 1994] J.B. Bassingthwaighte and G.M. Raymond, "Evaluating Rescaled Range Analysis for Time Series", *Annals of Biomedical Engineering*, vol. 22, nº 4, págs. 432-444, 1994.

[Bassingthwaighte et al., 1995] J.B. Bassingthwaighte and G.M. Raymond, "Evaluation of the Dispersional Analysis Method for Fractal Time Series", *Annals of Biomedical Engineering*, vol. 23, nº 4, págs. 491-505, 1995.

[Bendat and Piersol, 1986] J.S. Bendat and A.G. Piersol, *Random Data. Analysis and Measurement Procedures (2nd. Ed.)*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1986.

[Berger et al., 1986] R.D. Berger, S. Akselrod, D. Gordon and R.J. Cohen, "An efficient algorithm for spectral analysis of heart rate variability", *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 33, págs. 900-904, 1986.

[Bernardi et al., 1989] L. Bernardi, F. Keller, M. Sanders, P.S. Reddy, B. Griffith, F. Meno and M.R. Pinsky, "Respiratory sinus arrhythmia in the denervated human heart", *J. Appl. Physiol.*, vol. 67, nº 4, págs. 1447-1455, 1989.

[Bernardi et al., 1992] L. Bernardi, L. Ricordi, P. Lazzari, P. Soldá, A. Calciati, M.R. Ferrari, I. Vanda, G. Finardi and P. Fratino, "Impaired Circadian Modulation of Sympathovagal Activity in Diabetes. A Possible Explanation for Altered Temporal Onset of Cardiovascular Disease", *Circulation*, vol. 86, págs. 1443-1452, 1992.

[Bianchi et al., 1991] A. Bianchi, U. Scholz, S. Kubicki and S. Cerutti, "Heart rate variability and sleep states", *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, vol. 13, págs. 658-659, 1991.

[Birkett et al., 1991] C.L. Birkett, M.G. Kienzle and G.A. Myers, "Interpolation Over Ectopic Beats Increases Low Frequency Power in Heart Rate Variability Spectra", *Proceedings of Computers in Cardiology*, págs. 257-259, 1991.

[Boudreaux et al., 1995] G.F. Boudreaux-Bartels and R. Murray, "Time-Frequency Signal Representations for Biomedical Signals" in *The Biomedical Engineering Handbook*. Boca Raton, Florida: CRC Press Inc., 1995.

[Cerutti et al., 1989] S. Cerutti, S. Civardi, A. Bianchi, M.G. Signorini, E. Ferrazzi and G. Pardi, "Spectral analysis of antepartum heart rate variability", *Clinical Physics and Physiological Measurements*, vol. 10, supl. B, págs. 27-31, 1989.

[Cerutti et al., 1991] S. Cerutti, A. Bianchi, M.G. Signorini, M. Cavezzale, R. Cobelli, D. Lucini and M. Pagani, "Sympatho-vagal balance in humans under stressing conditions", *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, vol. 13, nº 2, págs. 662-663, 1991.

[Craelius et al., 1986] W. Craelius, M. Restivo, M.A. Assadi and N. El-Sherif, "Criteria for Optimal Averaging of Cardiac Signals", *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. BME-33, nº 10, págs. 957-966, 1986.

[Cripps et al., 1991] T.R. Cripps, M. Malik, T.G. Farrell and A.J. Camm, "Prognostic value of reduced heart rate variability after myocardial infarction: clinical evaluation of a new analysis method", *British Heart Journal*, vol. 65, págs. 14-19, 1991.

[Croxtton, 1959] F.E. Croxtton, *Elementary statistics with application in medicine and the biological sciences*. New York: Dover Publications Inc., 1959.

[Daubechies, 1988] I. Daubechies, "Orthonormal bases of compactly supported wavelets", *Communications on Pure and Applied Mathematics*, vol. XLI, págs. 909-996, 1988.

[Daubechies, 1991] I. Daubechies, "A method for time-frequency localization" in *Advances in spectrum stimation and array processing, vol.II*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1991.

[Daubechies, 1993] I. Daubechies, "Orthonormal bases of compactly supported wavelets II. Variations on a theme", *SIAM Journal of Mathematical Analysis*, vol. 24, nº 2, págs 449-519, 1993.

[DeBoer et al., 1984] R.W. DeBoer, J.M. Karemaker and J. Strackee, "Comparing Spectra of a Series of Point Events Particularly for Heart Rate Variability Data", *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. BME-31, nº 4, págs. 384-387, 1984.

[DeBoer et al., 1985] R.W. DeBoer, J.M. Karemaker and J. Strackee, "Relationships between short-term blood-pressure fluctuations and heart-rate variability in resting subjects I: a spectral analysis approach", *Med. & Biol. Eng. & Comput.*, vol. 23, págs. 352-358, 1985.

[Denton et al., 1990] T.A. Denton, G.A. Diamond, R.H. Helfant, S. Khan and H. Karagueuzian, "Fascinating rhythm: A primer on chaos theory and its application to cardiology", *American Heart Journal*, págs. 1419-1440, December 1990.

[Desai et al., 1991] T. Desai, J. Collins, I. Biaggioni, R. Shiavi, V. Haile and D. Robertson, "Heart rate spectral analysis as an indicator of autonomic function in patients with autonomic failure", *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, vol. 13, nº 2, págs. 666-667, 1991.

[Di Rienzo et al., 1993] M. Di Rienzo, G. Mancia, G. Parati, A. Pedotti and A. Zanchetti (Eds.) *Blood Pressure and Heart Rate Variability*. Amsterdam: IOS Press, 1993.

[Diedrich et al., 1994] A. Diedrich, J. Drescher, V. Nalishitij and F. Kirchner, "Accute Effects of Simulated Microgravity on Heart Rate Variability", *Journal of Gravitational Physiology*, vol. 1, págs. 35-36, 1994.

[Engel et al., 1990] D. Engel, J. Silny, G. Rau, M. Rubart and P. Hanrath, "Diagnosis of ischemia by continuous ECG-monitoring", *Proceedings of Computers in Cardiology*, págs. 275-278, 1990.

[Ewing et al., 1978] D.J. Ewing, I.W. Campbell, A. Murray, J.M.M. Neilson and B.F. Clarke, "Immediate heart-rate response to standing: simple test for autonomic neuropathy in diabetes", *British Medical Journal*, vol. 1, págs. 145-147, 1978.

[Ewing et al., 1981] D.J. Ewing, I.W. Campbell and B.F. Clarke, "Heart rate changes in diabetes mellitus", *The Lancet*, vol. 24, págs. 183-185, 1981.

[Ewing et al., 1982] D.J. Ewing and B.F. Clarke, "Diagnosis and management of diabetic autonomic neuropathy", *British Medical Journal*, vol. 285, págs. 916-918, 1982.

[Ewing et al., 1984] D.J. Ewing, J.M.M. Neilson and P. Travis, "New method for assessing cardiac parasympathetic activity using 24 hour electrocardiograms", *British Heart Journal*, vol. 52, págs. 396-402, 1984.

[Frageus et al., 1976] L. Frageus and D. Linnarsson, "Autonomic origin of heart rate fluctuations at the onset of muscular exercise", *J. Appl. Physiol.*, vol. 40, nº 5, págs. 679-682, 1976.

[Friesen et al., 1990] G.M. Friesen, T.C. Jannett, N.A. Jadallah, S.L. Yates, S.R. Quint and H.T. Nagle, "A Comparison of the Noise Sensitivity of Nine QRS Detection Algorithms", *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. BME-37, nº 1, págs. 85-98, 1990.

[Furlan et al., 1990] R. Furlan, S. Guzzetti, W. Crivellaro, S. Dassi, M. Tinelli, G. Baselli, S. Cerutti, F. Lombardi, M. Pagani and A. Malliani, "Continuous 24-hour assessment of the neural regulation of systemic arterial pressure and RR variabilities in ambulant subjects", *Circulation*, vol. 81, págs. 537-547, 1990.

[García-González et al., 1997] M.A. García-González, O. Casas, J. Rosell and R. Pallás-Areny, "Fluid shifts in simulated microgravity affect body segmental impedances and heart rate variability", *Proceedings of the World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering, Nice 97, Medical & Biological Engineering & Computing*, vol. 35, Supplement Part I, pág. 440, 1997.

[Geddes, 1984] L.A. Geddes, *Cardiovascular devices & their applications*. New York: John Wiley & Sons, 1984

[Gough, 1993] N.A.J. Gough, "Fractal analysis of foetal heart rate variability", *Physiological Measurements*, vol. 14, págs. 309-315, 1993.

[Grassberger et al., 1983] P. Grassberger and I. Procaccia, "Measuring the strangeness of strange attractors", *Physica D*, vol. 9, págs. 189-208, 1983.

[Grönlund et al., 1989] J.U. Grönlund, K.J. Antila, A.S.I. Siimes, T. Metsälä, R. Oja, J. Tuominen and I.A.T. Välimäki, "Beta-adrenergic control and inter-relationships between heart rate and blood pressure in neonatal lambs", *Medical & Biological Engineering & Computing*, vol. 27, págs. 163-170, 1989.

[Hales, 1733] S. Hales, *Statical Essays vol. II*. London: Innings and Manby, 1733

[Hardman et al., 1996] J.G. Hardman and L.E. Limbird, *The Pharmacological Basis of Therapeutics*. New York: McGraw-Hill, 1996.

[Hirsch et al., 1981] J.A. Hirsch and B. Bishop, "Respiratory sinus arrhythmia in humans: how breathing pattern modulates heart rate", *Am. J. Physiol.*, vol. 241, n° 10, págs. H620-H629, 1981.

[JACC, 1988] Sub-Committee on Percutaneous Transluminal Coronary Angioplasty "Guidelines for percutaneous transluminal coronary angioplasty. a report of the American College of Cardiology/American Heart Association Task Force on assessment of diagnostic and therapeutic cardiovascular procedures", *JACC*, vol. 12, n° 2, págs. 529-545, 1988.

[Kamath et al., 1991] M.V. Kamath, E.L. Fallen, E. Dixon, N. McCartney, G. Mishkel, J.P. Reilly and A.R.M. Upton, "Clinical applications of heart rate variability power spectra", *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, vol. 13, págs. 656-657, 1991.

[Katona et al., 1982] P.G. Katona, M. McLean, D.H. Dighton and A. Guz, "Sympathetic and parasympathetic cardiac control in athletes and nonathletes at rest", *J. Appl. Physiol.*, vol. 52, n° 6, págs. 1652-1657, 1982.

[Kitney, 1975] R.I. Kitney, "An analysis of the nonlinear behaviour of the human thermal control system", *J. Theor. Biol.*, vol. 52, págs. 231-248, 1975.

[Kleiger et al., 1987] R.E. Kleiger, J.P. Miller, J.T. Bigger, A.J. Moss and the Multicenter Post-infarction Research Group, "Decreased heart rate variability and its association with increased mortality after acute myocardial infarction", *Am.J. Cardiol.*, vol. 59, págs. 256-262, 1987.

[Kleiger et al., 1993] R.E. Kleiger, M.S. Bosner, J.N. Rottman and P.K. Stein, "Time-domain measurements of heart rate variability", *Journal of Ambulatory Monitoring*, vol. 6, págs. 1-18, 1993.

[Kollai et al., 1990] M. Kollai and G. Mizsei, "Respiratory sinus arrhythmia is a limited measure of cardiac parasympathetic control in man", *Journal of Physiology*, vol. 424, págs. 329-342, 1990.

[LeBlanc, 1986] A.-R. LeBlanc, "Quantitative analysis of cardiac arrhythmias", *CRC Critical Reviews in Biomedical Engineering*, vol. 14, n° 1, págs. 1-43, 1986.

[Linkens, 1979] D.A. Linkens (ed), *Biological systems, modelling and control*. Stevenage: Peter Peregrinus Ltd., 1979.

[Lisenby et al., 1977] M. J. Lisenby and P.C. Richardson, "The beatquency domain: an unusual application of the fast Fourier transform", *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 24, págs. 405-408, 1977.

[Lombardi et al., 1987] F. Lombardi, G. Sandrone, S. Pernpruner, R. Sala, M. Garimoldi, S. Cerutti, G. Baselli, M. Pagani and A. Malliani, "Heart Rate Variability as an Index of Sympathovagal Interaction After Acute Myocardial Infarction", *Am. J. Cardiol.*, vol. 60, págs. 1239-1245, 1987.

[Lopes et al., 1992] P. Lopes, R.H. Mitchell and J.A. White, "The relationships between respiratory sinus arrhythmia and coronary heart rate risk factors", *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, vol. 14, págs. 769-770, 1992.

[Lozano, 1994] A. Lozano Nieto, *Monitorización no invasiva de desplazamiento de fluidos corporales mediante impedancia eléctrica*, Tesis Doctoral. Barcelona: UPC, 1994.

[Macerata et al., 1992] A. Macerata, S. Pola, C. Marchesi, M. Emdin and C. Carpeggiani, "Spectral analysis: time-dependent approach", *Journal of Ambulatory Monitoring*, vol. 5, págs. 123-130, 1992.

[Mainardi et al., 1995] L.T. Mainardi, A.M. Bianchi, G. Baselli and S. Cerutti, "Pole-Tracking Algorithms for the Extraction of Time-Variant Heart Rate Variability Spectral Parameters", *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 42, págs. 250-259, 1995.

[Malik et al., 1989] M. Malik, T. Cripps, T. Farrell and A.J. Camm, "Prognostic value of heart rate variability after myocardial infarction. A comparison of different data-processing methods", *Med. & Biol. Eng. & Comput.*, vol. 27, págs. 603-611, 1989.

[Malik et al., 1989b] M. Malik, T. Cripps, T. Farrell and A.J. Camm, "Long-term spectral analysis of heart rate variability - an algorithm based on segmental frequency distributions of beat-to-beat intervals", *International Journal of Biomedical Computing*, vol. 24, págs. 89-110, 1989.

[Mallat, 1989] S.G. Mallat, "A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation", *IEEE PAMI*, vol 11, nº 7, págs. 674-693, 1989.

[Mandelbrot, 1983] B. Mandelbrot, *The Fractal Geometry of Nature*. New York: W.H. Freeman, 1983.

[Mendel, 1991] J.M. Mendel, "Tutorial on Higher-Order Statistics (Spectra) in Signal Processing and System Theory: Theoretical Results and Some Applications", *Proceedings of the IEEE*, vol. 79, nº 3, págs. 278-305, 1991.

[Montgomery, 1987] L.D. Montgomery, "Body Volume Changes During Simulated Weightlessness: An Overview", *Aviat. Space Environ. Med.*, vol. 58, págs. A80-A85.

[Morlet et al., 1993] D. Morlet, F. Peyrin, P. Desseigne, P. Touboul and P. Rubel, "Wavelet analysis of high-resolution signal averaged ECGs in postinfarction patients", *Journal of Electrocardiology*, vol. 26, nº 4, págs 311-320, 1993.

[Murray et al., 1975] A. Murray, D.J. Ewing, I.W. Campbell, J.M.M. Neilson and B.F. Clarke, "RR interval variations in young male diabetics", *British Heart Journal*, vol. 37, págs. 882-885, 1975.

[Myers et al., 1986] G.A. Myers, G.J. Martin, N.M. Magid, P.S. Barnett, J.W. Schaad, J.S. Weiss, M. Lesch and D.H. Singer, "Power spectral analysis of heart rate variability in sudden cardiac death: comparison to other methods", *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 33, págs. 1149-1156, 1986.

[Noguchi et al., 1993] Y. Noguchi, S. Sugimoto, H. Kobayashi and M. Kobayashi, "Component analysis of heart rate variability spectra and mental load", *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, vol. 15, págs. 391-392, 1993.

[Odemuyiwa et al., 1991] O. Odemuyiwa, M. Malik, T. Farrell, Y. Bashir, J. Poloniecki and J. Camm, "Comparison of the Predictive Characteristics of Heart Rate Variability Index and Left Ventricular Ejection Fraction for All-Cause Mortality, Arrhythmic Events and Sudden Death After Acute Myocardial Infarction", *Am. J. Cardiol.*, vol. 68, págs. 434-439, 1991.

[Otsuka et al., 1995] K. Otsuka, S. Nakajima, M. Shinagawa, Y. Kubo and T. Yamanaka, "Heart rate variability including 1/f fluctuations versus conventional autonomic functions", *Journal of Ambulatory Monitoring*, vol. 8, págs. 91-100, 1995.

[Pagani et al., 1986] M. Pagani, F. Lombardi, S. Guzzetti, O. Rimoldi, R. Furlan, P. Pizzinelli, G. Sandrone, G. Malfatto, S. Dell'Orto, E. Piccaluga, M. Turiel, G. Baselli, S. Cerutti and A. Malliani, "Power Spectral Analysis of Heart Rate and Arterial Pressure Variabilities as a Marker of Sympatho-Vagal Interaction in Man and Conscious Dog", *Circulation Research*, vol. 59, págs. 178-193, 1986.

[Pola et al., 1996] S. Pola, A. Macerata, M. Emdin and C. Marchesi, "Estimation of the Power Spectral Density in Nonstationary Cardiovascular Time Series: Assessing the Role of the Time-Frequency Representations (TFR)", *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 43, N° 1, págs 46-59, 1996.

[Pomeranz et al., 1985] B. Pomeranz, R.J.B. Macaulay, M.A. Caudill, I. Kutz, D. Adam, D. Gordon, K.M. Kilborn, A.C. Barger, D.C. Shannon, R.J. Cohen and H. Benson, "Assessment of autonomic function in humans by heart rate spectral analysis", *The American Journal of Physiology*, vol. 248, págs. H151-H153, 1985.

[Raimondi et al., 1996] G. Raimondi, F. Castrucci, J.M. Legramante, F. Iellamo, S. Cassarino and G. Peruzzi, "Cortisol and renin-angiotensin-aldosterone system (RAAS) responses to 4 hours simulated microgravity", *Proceedings Sixth European Symposium on Life Sciences Research in Space*, págs. 405-407, 1996.

[Reisman et al., 1991] S. Reisman, W. Tapp, T. Findley and P. Zhang, "Fatigue in multiple sclerosis using heart rate variability", *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, vol. 13, n° 2, págs. 664-665, 1991.

[Restivo et al., 1985] M. Restivo, N. El-Sherif, G.J. Kelen, R. Henkin, W. Craelius and W.B. Gough, "Correlation of late potentials on the body surface and ventricular activation maps of reentrant circuits in the post-infarction dog heart", *Circulation*, vol. 72, supl. III, págs 11, 1985.

[Robinson et al., 1966] B.F. Robinson, S.E. Epstein, G.D. Beister and E. Braunwald, "Control of heart rate by the autonomic nervous system", *Circ. Res.*, vol. 19, págs. 400-411, 1966.

[Roche, 1993] *Diccionario médico Roche*. Barcelona: Doyma, S.A., 1993.

[Ryder et al., 1990] R.E.J. Ryder and C.A. Hardisty, "Which battery of cardiovascular autonomic function tests?", *Diabetologia*, vol. 33, págs. 177-179, 1990.

[Sapoznikov et al., 1988] D. Sapoznikov, E. M. Berry, Y. Mahler and M.S. Gotsman, "Spectrum analysis of heart rate fluctuations following autonomic nervous system changes", *Proceedings of Computers in Cardiology*, págs. 401-404, 1988.

[Sapoznikov et al., 1990] D. Sapoznikov, M.H. Luria, Y. Mahler and M.S. Gotsman, "Analysis of heart rate variations during sleep: presence of a newly observed non-periodic trapezoidal waveform", *Proceedings of Computers in Cardiology*, págs. 71-74, 1990.

[Sapoznikov et al., 1991] D. Sapoznikov, M. H. Luria, Y. Mahler and M.S. Gotsman, "Methods of arrhythmia and artifact removal in heart rate variability analysis", *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, vol. 13, págs. 668-669, 1991.

[Saul et al., 1989] J.P. Saul, R.D. Berger, M.H. Chen and R.J. Cohen, "Transfer function analysis of autonomic regulation II. Respiratory sinus arrhythmia", *Am. J. Physiol.*, vol. 256, págs. H153-H161, 1989.

[Savin et al., 1982] W.M. Savin, D.M. Davidson and W.L. Haskell, "Autonomic contribution to heart rate recovery from exercise in humans", *J. Appl. Physiol.*, vol. 53, nº 6, págs. 1572-1575, 1982.

[Schechtman et al., 1988] V.L. Schechtman, K.A. Kluge and R.M. Harper, "Time-domain system for assessing variation in heart rate", *Med. & Biol. Eng. & Comput.*, vol. 26, págs. 367-373, 1988.

[Scherer et al., 1994] P. Scherer, J.P. Ohler, H.-W. Höpp and H. Hirche, "Decomposition of the time domain parameter SDNN of heart rate variability", *Journal of Ambulatory Monitoring*, vol. 7, nº 1, págs. 7-18, 1994.

[Shin et al., 1989] S.J. Shin, W.N. Tapp, S.S. Reisman & B.H. Natelson, "Assessment of autonomic regulation of heart rate variability by the method of complex demodulation", *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. BME-36, págs. 274-283, 1989.

[Shin et al., 1993] K.S. Shin, H. Minamitani, S. Onishi, H. Yamazaki and M.H. Lee, "The power spectral analysis of heart rate variability during exercise", *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, vol. 15, págs. 786-787, 1993.

[Smith et al., 1981] S.E. Smith and S.A. Smith, "Heart rate variability in healthy subjects measured with a bedside computer-based technique", *Clinical Science*, vol. 61, págs. 379-383, 1981.

[Somers et al., 1993] V. Somers, M.E. Dyken, A.L. Mark and F. M. Abboud, "Sympathetic-nerve activity during sleep in normal subjects", *N Engl J Med*, vol. 328, nº 5, págs. 303-307, 1993.

[Soubiran et al., 1996] C. Soubiran, I. Harant, I. De Glisezinski, M. Beauville, F. Crampes, D. Riviere and M. Garrigues, "Carido-respiratory changes during the onset of head-down tilt", *Aviat. Space Environ. Med.*, vol. 67, págs. 648-653, 1996.

[Southall et al., 1983] D.P. Southall, J.M. Richards and M. Swiet, "First report of the combined study of SIDS", *British Medical Journal*, vol. 286, págs. 1092-1096, 1983.

[Sundkvist et al., 1979] G. Sundkvist, L-O Almér and B. Lilja, "Respiratory influence on heart rate in diabetes mellitus", *British Medical Journal*, vol. 1, págs. 924-925, 1979.

[Ten Harkel et al., 1990] A.D.J. Ten Harkel, J.J. Van Lieshout, E.J. Van Lieshout and W. Wieling, "Assessment of cardiovascular reflexes: influence of posture and period of preceding rest", *J. Appl. Physiol.*, vol. 68, nº 1, págs. 147-153, 1990.

[Tkacz et al., 1993] E. Tkacz and D. Komorowski, "An examination of some heart rate variability analysis indicators in the case of children", *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, vol. 15, págs. 794-795, 1993.

[Unser et al., 1992] M. Unser, A. Aldroubi and M. Eden, "On the asymptotic convergence of B-spline wavelets to Gabor functions", *IEEE IT*, vol. 38, nº 2, págs 864-871, 1992.

[Wada et al., 1993] T. Wada, H. Mizuno, F. Ohba and H. Kawashima, "Nonlinear analysis of heart rate variability using bispectrum", *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, vol. 15, págs. 918-919, 1993.

[Webster, 1992] J.G. Webster, *Medical instrumentation. Application and design*. Boston: Houghton Mifflin Company, 1992.

[Wolf et al., 1985] A. Wolf, B.J. Swift, H.L. Swinney and J.A. Vastano, "Determining Lyapunov exponents from time series". *Physica D*, vol. 16, págs. 285-317, 1985.

[Womack, 1971] B.F. Womack, "The analysis of respiratory sinus arrhythmia using spectral analysis and digital filtering". *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 18, págs. 399-409; 1971.

[Zhang et al., 1992] P.Z. Zhang, S.S. Reisman and W.N. Tapp, "Heart rate variability study using phase response curve", *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, vol. 14, págs. 571-572, 1992.

[Zimmerman et al., 1984] B.G. Zimmerman, E.J. Sybertz and P.C. Wong, "Interaction between sympathetic and renin-angiotensin system", *J. Hypertens.*, vol. 2, págs. 581-587, 1984.

“La puerta mejor cerrada es aquella que puede dejarse abierta”
Proverbio chino

ACLARACIONES SOBRE CIERTOS PUNTOS DE LA TESIS

Página 1.5: El eje de abcisas de la señal electrocardiográfica representada corresponde a la salida del amplificador sin calibrar expresada en mV.

Página 2.19: La expresión 2.19 se obtiene sustituyendo las expresiones 2.15 y 2.18 en la ecuación (se debe tener en cuenta, también la expresión 2.17)

$$\varepsilon_{FP} = \frac{|SD_v - SD_{FP}|}{SD_v}$$

Página 2.12: El empleo de métodos robustos a artefactos puede ser preferible al empleo de métodos clásicos (que incluyan corrección de artefactos) siempre y cuando la complejidad del método no sea excesivamente elevada (como es el caso de los que se muestran). El filtrado de artefactos, por otro lado, suele afectar al contenido de alta frecuencia de la señal y suele depender de algún parámetro que no es universal para los diferentes pacientes o situaciones fisiológicas.

Comparación MIRR – HRV_{index}: La correlación entre ambos índices no es elevada, por lo tanto, puede considerarse que la información que proporcionan ambos índices, aunque semejante, no es la misma. En [Kleiger et al., 1993] se comenta que el índice SD es un predictor muy potente de muerte cardíaca súbita. El HRV_{index} también lo es aunque en menor grado (puede mejorar la predicción si se combina con otros índices). Por otro lado, el índice SD es utilizado más generalmente por la comunidad médica. Como MIRR y SD correlan bien, se ha prestado en el desarrollo de la tesis más interés por el MIRR que por el HRV_{index} normalizado. Además es de computación muy sencilla.

Página 3.3: La señal del espectro de cuentas ya está muestreada uniformemente pues consiste en una señal impulsional donde cada impulso se sitúa en la posición de cada QRS.

Sobre el empleo de métodos autorregresivos: En

[Christini et al., 1995] D.J. Christini, A. Kulkarni, S. Rao, E.R. Stutman, F.M. Bennet, J.M. Hausdorff, N. Oriol and K.R. Lutchén, “Influence of Autorregressive Model Parameter Uncertainty on Spectral Estimates of Heart Rate Dynamics”, *Annals of Biomedical Engineering*, vol. 23, págs. 127-134, 1995

se discute la fiabilidad de los métodos autorregresivos. Se llega a la conclusión que estos métodos son poco fiables para frecuencias inferiores a 0,05 Hz y en la cuantificación de la potencia de los picos espectrales. Como a lo largo de esta tesis se analizan fundamentalmente la banda comprendida entre 0,04 Hz y 0,5 Hz y se cuantifica fundamentalmente por la energía en bandas y no en picos, se prefiere el análisis mediante métodos autorregresivos que mediante la FFT que produce un espectro ruidoso.

Respecto a las señales empleadas para la simulación: Se ha decidido emplear como señal estándar de simulación la senoide por su clara relación con los resultados que presumiblemente se deben emplear en la estimación espectral. El hecho que la

excitación de un sistema sea senoidal no implica que su efecto sobre la señal RR sea una contribución senoidal (efectivamente, el sistema es no lineal). No obstante, como con respiración periódica a frecuencias próximas a 0,1 Hz se obtienen respuestas quasi-senoidales, se ha decidido simular fundamentalmente con senoides por simplicidad.

Respecto a las fuentes endógenas: Existen diversos modelos comprobados experimentalmente que relacionan variaciones en la presión con variaciones en el ritmo cardíaco. La relación temporal entre ambas señales se realiza en el dominio del latido. Véanse, por ejemplo, los trabajos de modelización de Cerutti y Bianchi.

Página 3.15. La tabla 3.4 muestra los errores absolutos en la estimación de diversos índices espectrales asociados a la presencia de artefactos. Los valores reales se incluyen en el último párrafo de la página 3.14.

Sobre el comportamiento $1/f$: El hecho que la dinámica de la serie RR sea no lineal y que esté afectada por muchas fuentes no estacionarias provoca que en el espectro de potencia aparezca, superpuesta los picos espectrales de las bandas LF y HF, una tendencia $1/f^a$ que es más patente en registros ambulatorios o realizados bajo condiciones no controladas. Dicho comportamiento sirve de base para uno de los métodos de estimación de la dimensión fractal de la señal RR.

Sobre la señal DRR: Las diferencias entre los índices LF obtenidos mediante el análisis de la señal RR o de la DRR son achacables sobre todo a la eliminación de las modulaciones de amplitud por parte de la función signo. Dicha modulación hace aumentar la banda LF tal y como se explica en el apartado 3.4.4.

Sobre la cuantificación de bandas o de picos espectrales: Se ha realizado la cuantificación de picos espectrales únicamente cuando se pretendía poner de manifiesto la inexactitud de los métodos autorregresivos en la cuantificación de la potencia de dichos picos y las señales de entradas eran periódicas. Para la mayoría de experimentos, no obstante, se ha empleado la cuantificación por bandas.

Sobre el empleo de técnicas tiempo-frecuencia: aunque el uso de estas técnicas no es empleado aún en el análisis clínico, son potencialmente de interés para el análisis en situaciones no estacionarias como son las baterías de pruebas donde el empleo del análisis espectral clásico no puede llevarse a cabo.

Sobre el empleo de técnicas de caos y complejidad: Es un campo completamente abierto. El autor de la tesis no puede realizar una comparación objetiva sobre la efectividad de estos métodos respecto a los métodos clásicos. Su trabajo ha consistido, en cambio, en observar qué índices son los más comúnmente empleados y cómo se pueden estimar de forma rápida para una futura aplicación si se demuestra su interés clínico.

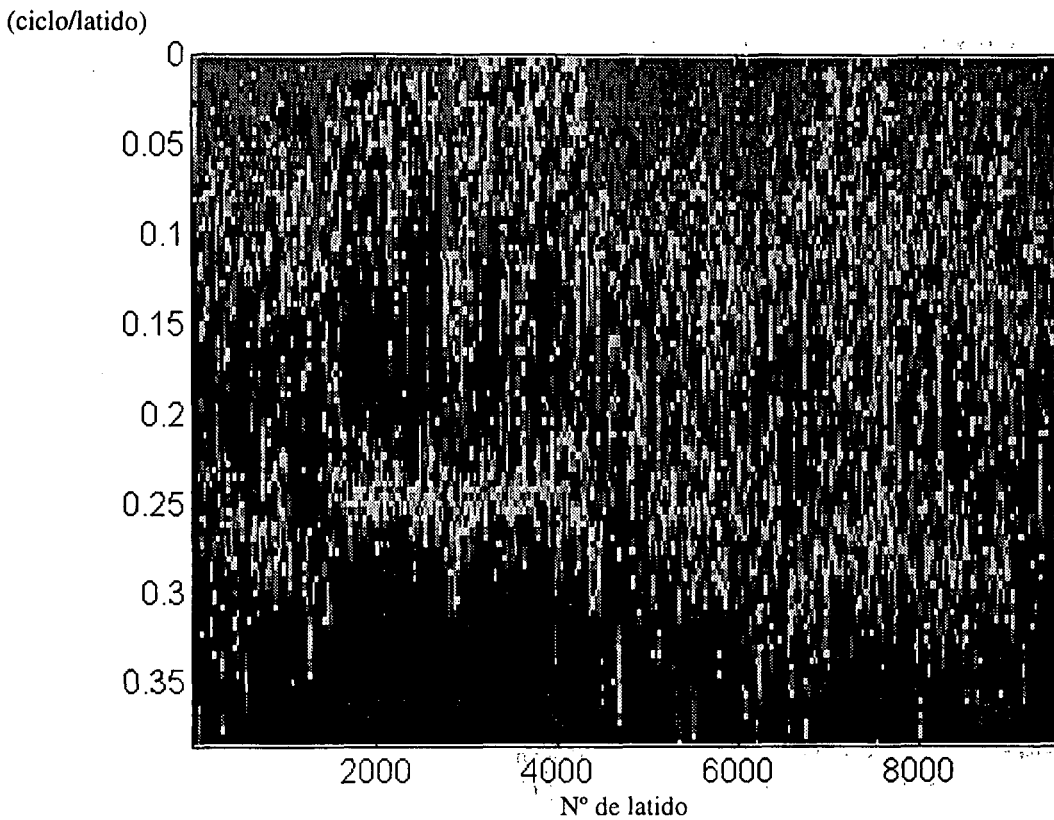


Figura 4.41 Representación espectro-temporal durante el sueño.

4.2.4 Conclusiones

Las representaciones tiempo-frecuencia se emplean para detectar la variación de las componentes espectrales de una señal en función del tiempo. Tienen unas prestaciones muy superiores a los métodos espectrales variantes con el tiempo, sobre todo en la cuantificación de potencia.

Tras un protocolo de simulación se ha decidido escoger como representación espectro-temporal la SPWVD con una ventana espectral grande (128 muestras). La simulación indica que esta representación ofrece buenos compromisos entre detección de frecuencia y estimación de la potencia, y además permite seguir cambios de frecuencia tanto lentos como bruscos.

Mediante el análisis de señales reales se ha llegado a las mismas conclusiones que con los métodos espectrales variantes con el tiempo pero teniendo mejores prestaciones en la estimación de la potencia. Por lo tanto, estos métodos serán preferidos a los métodos espectrales variantes con el tiempo.

Estos métodos permiten la mejora en la caracterización de la variabilidad del ritmo cardíaco ya que permiten analizar señales no estacionarias (ejercicio, registros de 24 horas, etc.) aportando información sobre las diferentes fases que se dan en la secuencia analizada (ejercicio máximo, recuperación, sueño profundo, fases REM, etc.). Además, permite detectar cuándo hay variaciones de diversos osciladores que pueden sobrestimar el índice LF/HF.