

**CONTRIBUCIÓN A LA OBTENCIÓN DE IMÁGENES
PARAMÉTRICAS EN TOMOGRAFÍA DE
IMPEDANCIA ELÉCTRICA PARA LA CARACTERIZACIÓN DE
TEJIDOS BIOLÓGICOS**

Tesis doctoral presentada en la
Universidad Politécnica de Catalunya
para la obtención del título de doctor

J. Oscar Casas Piedrafita
Director: Dr. Javier Rosell Ferrer

Barcelona, septiembre de 1998

6. Conclusiones

El objetivo fundamental de esta tesis ha sido la caracterización de los tejidos biológicos mediante la utilización de la medida de su impedancia eléctrica. Para realizar esto se ha empleado dos técnicas diferentes, como son la tomografía y la espectroscopia de impedancia eléctrica, realizándose contribuciones en uno y otro campo. Por último, se ha estudiado la aplicabilidad de la unión de estas dos técnicas con la obtención de las denominadas imágenes paramétricas.

6.1 Contribuciones en espectroscopia de impedancia eléctrica

La medida del espectro de impedancia de un sistema biológico nos proporciona información de sus características eléctricas pasivas. Sin embargo, para poder extraer información útil es necesario o bien correlar directamente estas medidas con algún mecanismo fisiológico o bien ajustarlas a un modelo, los parámetros del cual nos permitan establecer esta relación con su fisiología. El modelo utilizado ha sido el de Cole-Cole, desarrollándose algoritmos matemáticos que nos han permitido el ajuste de los datos a estos modelos, tanto para la representación de una única relajación como cuando se obtiene un arco doble. Se ha comprobado la convergencia de estos métodos a la solución correcta, siempre que se tenga una relación señal a ruido superior a los 30 dB en las medidas. Por último se ha ampliado este estudio calculando las relaciones existentes entre los parámetros de este modelo y los de los modelos circuitales que permiten también la caracterización de las medidas. Ha sido por tanto posible realizar la caracterización de los tejidos con los valores de impedancia medidos, con los parámetros del modelo de Cole y con los valores de los componentes de los modelos circuitales.

El sistema de medida utilizado se ha basado en el analizador de impedancias comercial HP4192a, al que se le ha adaptado una etapa frontal que permite la extensión de su uso a la caracterización de tejidos. Un problema importante que nos encontramos, son las limitaciones que nos impone la relación de rechazo al modo común (CMRR). Dado que no es posible obtener un CMRR efectivo suficiente en el margen frecuencial de medida, por el desequilibrio de las impedancias de electrodos, se ha utilizado un sistema de realimentación de la tensión de modo común. Este sistema intenta disminuir la tensión en modo común a la entrada de los canales de adquisición, sin modificar las líneas de corriente aplicadas en el cuerpo, ni afectar la impedancia de salida de la fuente de corriente.

Por otro lado, se ha analizado el sistema de medida desde el punto de vista de la estructura de electrodos, extrayéndose conclusiones acerca de los límites y errores que se pueden tener tanto en las medidas in-vivo, como en las medidas in-vitro. Para realizar este estudio ha sido necesario estudiar y desarrollar maquetas (*phantoms*) que nos ha permitido el estudio de las

limitaciones no tan sólo en las medidas de espectroscopia, sino también para las de tomografía de impedancia eléctrica.

Todos estos estudios buscaban la aplicación de la espectroscopia de impedancia eléctrica en aplicaciones clínicas, y en concreto para la caracterización del tejido miocardio. Las conclusiones extraídas de estas medidas realizadas sobre el tejido miocárdico de cerdo son:

- Es posible diferenciar con las medidas de espectroscopia el tejido miocárdico sano, del isquémico y de la cicatriz formada tras la destrucción celular. Esto hecho se fundamenta en que el tejido miocárdico sano tiene únicamente una relajación, con un máximo en la fase a unos 300 kHz, en el tejido isquémico aparece una nueva relajación a baja frecuencia, alrededor de 5-10 kHz, y en el tejido cicatricial, al estar constituido por células muertas, no aparece relajación alguna.
- Se ha comprobado que la fase es una magnitud más sensible que el módulo en la caracterización de la isquemia miocárdica.
- La aplicación de los modelos de Cole-Cole nos ha permitido comprobar que los parámetros que mejor caracterizan la evolución isquémica son R_0 y la frecuencia central.
- Un estudio de los procesos de oclusión y reperfusión nos ha permitido comprobar la limitación de las medidas de espectroscopia para diferenciar el tejido sano del reperfundido, aunque éste haya quedado dañado.

Se han realizado medidas *in-vivo* e *in-situ*, también sobre cerdos, completando la caracterización de los diferentes tejidos biológicos con medidas sobre hígado, riñón, bazo, páncreas, pulmones, sangre, músculo transversal, músculo longitudinal y el ya mencionado tejido miocárdico. Estas medidas han sido utilizadas tanto para estudiar sus características *in-vivo* como la evolución de su isquemia. Las conclusiones que se han podido extraer son:

- En las medidas *in-vivo*, se ha comprobado que, al igual que pasaba con el tejido miocárdico, los parámetros que mejor permiten esta caracterización son la frecuencia central y R_0 , siendo posible con estos dos parámetros la diferenciación de los tejidos
- Las medidas *in-vivo* nos proporcionan además información de las variaciones que podemos encontrarnos en los valores de impedancia en las imágenes multifrecuencia de tomografía de impedancia eléctrica y de las variaciones que se pueden obtener en los parámetros de los modelos de Cole-Cole que se representaran en las imágenes paramétricas.

- Se ha observado que una isquemia provoca siempre los mismos efectos sobre las medidas de impedancia eléctrica independientemente del tejido estudiado, un aumento de R_0 y una disminución de la frecuencia central, debido a los cambios constitucionales de las células que forman el tejido. Estos vuelven a ser los mejores parámetros del modelo de Cole-Cole para caracterizar la evolución isquémica. Sin embargo, si no se quiere depender de la constante de célula es mejor aprovechar la pequeña variación de R_∞ para mostrar la información de R_0 , en la variable R_0/R_∞ . Esta relación representa aproximadamente la información relativa de volumen extra e intra-celular.
- Otro factor a tener en cuenta es la mayor o menor velocidad que tiene la evolución de la isquemia en los diferentes tejidos. Esto nos permite, además de su utilización en aplicaciones clínicas, como puede ser en el análisis de la viabilidad de los tejidos en trasplantes. Se ha concluido, además, que hay que considerar las limitaciones de las medidas *in-vitro*, en las que el tejido ha sufrido una isquemia importante, para la caracterización de las propiedades de los tejidos vivos.

6.2 Contribuciones en tomografía de impedancia eléctrica

Dentro del campo de la tomografía se han realizado contribuciones en tres puntos diferentes:

- a) En el problema directo con el estudio de la estrategia de inyección óptima
- b) En el problema inverso, al haber desarrollado algoritmos matemáticos que permiten el ajuste de los cambios de impedancia con la frecuencia a modelos de Cole-Cole
- c) En el desarrollo de sistemas de tomografía, al haber diseñado un nuevo sistema multifrecuencia en tiempo real, TIE-4. Dentro del diseño del sistema se ha estudiado con más profundidad la demodulación de medidas de bioimpedancias

Todo ello nos ha permitido obtener imágenes de tomografía de impedancia eléctrica donde se han validado nuestros algoritmos de obtención de imágenes paramétricas.

Dentro de la resolución del problema directo se ha estudiado cuáles eran las definiciones existentes en la bibliografía que permiten su caracterización y sobre las que nos hemos basado para formular un nuevo criterio de distinguibilidad. A partir de esta búsqueda bibliográfica se ha visto que el problema directo es posible caracterizarlo mediante definiciones absolutas o relativas de los cambios existentes y medidos en el contorno. Sin embargo, como lo que se ha pretendido es optimizar la distinguibilidad de los cambios de conductividad en las imágenes de tomografía, se ha optado por una definición relativa del criterio de distinguibilidad, más próxima que las definiciones absolutas a los métodos de reconstrucción utilizados, como puede ser la retroproyección ponderada o el método exponencial. A partir de este nuevo criterio de distinguibilidad se ha demostrado que la estrategia de inyección adyacente es mejor que la trigonométrica o que la polar. Además esta

estrategia de inyección tiene la ventaja de tener más resolución espacial, al inyectarse más armónicos sobre el objeto a medir. Su gran limitación es el hecho de que las tensiones medidas son más pequeñas por lo que se ha de tener un sistema con un mayor margen dinámico y un mayor rechazo al ruido y a los errores no sistemáticos, como puede ser el CMRR. Una comparación, siempre con definiciones relativas, de los límites teóricos de los tres tipos de inyecciones más utilizados, nos ha corroborado las ventajas de la utilización de la estrategia de inyección adyacente.

En cuanto al problema inverso, como los algoritmos de reconstrucción son procesos no lineales, la cuantificación que se puede realizar de los diferentes pixels que conforman una imagen no es correcta, dependiendo de su tamaño, cambio de conductividad respecto a la referencia y posición relativa respecto al contorno. Estudios recogidos en la bibliografía nos han permitido caracterizar la influencia en la obtención de las imágenes paramétricas que tendrán estos algoritmos y obtener métodos que permiten en mayor o menor medida su corrección.

Estos algoritmos de reconstrucción utilizados nos permiten únicamente representar los cambios relativos que sufre la impedancia del objeto a medir respecto a una referencia. Es por ello que sólo es posible obtener información relativa de la variación frecuencial de los pixels de las diferentes imágenes multifrecuencia. Este hecho implica que el ajuste de los datos no es posible realizarlo con los mismos modelos empleados en espectroscopia, sino que se han de desarrollar nuevos métodos matemáticos de ajuste. Los algoritmos desarrollados permiten la obtención de estos parámetros, R_0/R_∞ , la frecuencia central y el coeficiente de dispersión, tanto para sistemas que puedan adquirir la parte imaginaria y la real como para sistemas que sólo permitan la obtención de la parte real. Estos parámetros, tal como se ha comprobado en las medidas espectrométricas, nos permiten caracterizar perfectamente los diferentes tejidos

En cuanto al desarrollo de sistemas de tomografía, se ha diseñado, montado y validado un sistema de tomografía en tiempo real que permite obtener, mediante la adquisición sincrónica de imágenes con una señal de electrocardiografía, los cambios en las impedancias en un ciclo cardíaco. En el desarrollo de este equipo se ha hecho especial hincapié en el estudio de las diferentes técnicas de demodulación y en sus limitaciones, estudiando en concreto la utilización de la técnica de muestreo sincrónico, presentando un nuevo demodulador, basado en capacidades flotantes, y la incorporación del procesado diferencial de la señal para aumentar el CMRR de los sistemas de adquisición de señales de bioimpedancias.

6.3 Obtención de imágenes paramétricas

Se han obtenido imágenes que representan las variaciones de un parámetro, derivado de las medidas de impedancia, tanto para una dimensión lineal como para una sección del objeto a caracterizar.

Con las primeras se han obtenido imágenes paramétricas dinámicas que nos han permitido cuantificar la evolución de la isquemia del miocardio a lo largo de la arteria coronaria descendente y el preconditionamiento que sufre este tejido después de varios procesos de oclusión-reperusión. Un parámetro óptimo para utilizar esta técnica en la caracterización dinámica de un tejido es la relación de módulos de impedancia a baja y alta frecuencia.

El estudio de la caracterización espectroscópica de los tejidos mediante tomografía de impedancia eléctrica multifrecuencia nos permite concluir que:

- Las limitaciones de los sistemas de adquisición hacen necesario el desarrollo de algoritmos que contemplen la extracción de los parámetros de los modelos de Cole-Cole a partir únicamente de la evolución de la parte real de los cambios de impedancia medidos.
- Las imágenes paramétricas que permiten caracterizar y diferenciar mejor los tejidos son las de R_0/R_∞ y frecuencia característica.
- Estas imágenes permiten diferenciar cualitativamente los diferentes tejidos, aunque los valores cuantificados de los parámetros no son correctos. En nuestras medidas se ha obtenido una subestimación de R_0/R_∞ y una sobreestimación de la frecuencia central.
- Los errores en el cálculo de los parámetros son debidos a las limitaciones del sistema de adquisición y a la influencia en la cuantificación de los valores de impedancia del algoritmo de reconstrucción. Para solucionar estas limitaciones sería necesario el desarrollo de nuevos algoritmos que permitieran una correcta cuantificación de los cambios de impedancia y el estudio de nuevas estrategias de inyección que permitieran obtener más sensibilidad en puntos deseados del tejido a estudiar.
- Una aplicación potencial para esta técnica es la distinción, mediante imágenes de tomografía multifrecuencia superficial, del tejido miocárdico sano, isquémico y cicatricial, ya que esto es posible, tal como se ha visto en las medidas de espectroscopia, a través los valores de los parámetros del modelo de Cole.

Es por tanto necesario, buscando la aplicabilidad de estas imágenes paramétricas en ambientes hospitalarios, trabajar en un futuro en la mejora de los algoritmos de reconstrucción y cuantificación. Otro factor que podría mejorar la calidad de estas imágenes es el uso de la información *a priori* que, extraída de las medidas de espectroscopia a cuatro hilos, permita

mejorar la velocidad y la convergencia de los algoritmos de extracción de parámetros. Si el estudio se quiere realizar sobre un órganos en concreto, sería también positivo, como ya se ha comentado, el estudio de nuevas estrategias de inyección que permitieran focalizar las medidas de impedancia en zonas concretas.

Referencias

Acton F.S.

Algorithms for minimization without derivatives
Englewood Cliffs, NJ. Prentice-Hall, 1970

Bao J.Z., Davis C.C, Schmukler R.E.

Impedance spectroscopy of human erythrocytes: system calibration and nonlinear modeling
IEEE transactions on Biomedical Engineering, Vol.40, N°4, pp.364-378, 1993

Barber D.C., Brown B.H.

Recent developments in applied potential tomography
Information processing in medical imaging, Ed. S.L. Bacharach, The Netherlands, pp.106-121,
1986

Barber D.C., Segar A.D.

Fast reconstruction of resistance images
Clinical Physics and Physiological Measurement, Vol.8, Suppl.A, pp.47-54, 1987

Barber D.C., Brown B.H.

Reconstruction of impedance images using filtered back-projection
Proc. CAIT meeting, Copenhagen, pp.1-8, 1990

Bates R.H.T.

Astronomical speckle imaging
Physics Rep., N°90, pp.203-297, 1982

Blad, B., Baldetorp B.,

Impedance spectra of tumor tissue in comparison with normal tissue, a possible clinical
application for electrical impedance tomography
Physiological Measurement, Vol.17, Suppl.4, pp.A105-A115, 1996

Boone K., Barber D., Brown B.

Review. Imaging with electricity: Report of the European Concerted Action on Impedance
Tomography
Journal of Medical Engineering & Technology, Vol.21, pp.201-232, 1997

Bragós R., Rosell, J., Riu P.J.

A wide-band AC-coupled current source for electrical impedance tomography
Physiological Measurement, Vol.15, supplement 2A, pp.91-99, 1994a

Bragós R., Povill R., Riu P.J.

Applicability of the three coefficient calibration technique to EIT
Proc. of CAIT Conference, Ankara, pp.43-44, 1994b

Bragós R., Yañez A., Riu P.J., Tresànceh M., Warren M., Carreño M., Cinca J.

Espectro de la impedancia del miocardio porcino in situ durante la isquemia. Parte I: Sistema
de medida
Actas del XIV Congreso anual de la Sociedad Española de Ingeniería Biomédica, Pamplona,
pp.97-99, 1996a

Bragós R., Riu P.J., Warren M., Tresànceh M., Carreño A., Cinca J.

Changes in myocardial impedance spectrum during acute ischemia in the in-situ pig heart
Proc. of 1996 IEEE EMBS Conference, Amsterdam. pp.414-415, 1996b

Bragós R., Riu P.J., Casas O., Rosell J., Warren M., Tresánchez M., Carreño A., Cinca J.
Electrical Impedance phase spectrogram of the ischemic myocardium in pigs
Medical&Biological Engineering&Computing, Vol.35 (Suppl.I), p.335, 1997

Bragós R.
Contribució a la caracterització de teixits i sistemes biològics mitjançant tècniques
d'espectroscòpia d'impedància elèctrica.
Tesis doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona. 1997

Brown B.H., Barber D.C.
Applied potential tomography- A new in vivo medical imaging technique
Proc. HPA, Am. Conf.; Sheffield, Clin.Phys.Physiol.Meas. Vol.4, 1982

Brown B.H., Seagar A. D.
The Sheffield data collection system
Clinical Physics and Physiological Measurement, Vol.8 Suppl.A pp.91-97, 1987

Cahill D.R., Orland M.J., Reading C.C.
Atlas of human cross-sectional anatomy with CT and MR images
John Wiley & Sons, segunda edició, 1990

Campbell A.M., Land D.V.
Dielectric properties of female human breast tissue measured in vitro at 3.2 GHz
Phys. Med. Biol., Vol.37 pp.193-210, 1992

Casas O., Pallás-Areny R.
Signal to noise ratio in bioelectrical impedance measurements using synchronous sampling
Proc. 16th Annual. Int. Conf. IEEE-EMBS, Baltimore, 16(2), pp.890-891, 1994

Casas O., Rosell J., Bragós R., Lozano A., Riu P.J.
A parallel broadband real-time system for electrical impedance tomography
Physiological Measurement, Vol.17, pp.A1-A6, 1996

Casas O., Pallás-Areny R.
Basics of analog differential filters
IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol.45, pp.275-279, 1996

Casas, O., Pallás-Areny R.
Optimal bias circuit for instrumentation amplifiers
Proc. of the XIV IMEKO World Congress, pp.143-148,1997

Casas O., Rosell J.
What is the optimal injection strategy in electrical impedance tomography?
Medical&Biological Engineering&Computing, Vol.35 (Suppl.I), p.319, 1997

Casas O., Riu P.J., Rosell J.
Acquisition Strategies in EIT
Proc. of 42 Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, Illmenau (Alemania), pp.314-319,
1997

Casas O., Bragós R., Riu P. J., Rosell J., Tresánchez M., Warren M., Rodríguez-Sinovas A.,
Carreño A., Cinca J.
In-vivo and in-situ ischemic tissue characterisation using electrical impedance spectroscopy.
Proc. of X International Conference on Electrical Biolmpedance, Barcelona, pp.69-72, 1998

- Chaudhary S.S., Mishra R.K., Swarup A., Thomas J.M.
Dielectric properties of normal and malignant human tissues at radiowave and microwave frequencies
Indian J.Biochem. Biophys., Vol.19 pp.76-79, 1984
- Chauveau, N. Dumont P., Aligne C., Rigaud B., Cros S., Morucci J.P.
In vivo impedance spectrometry of MCF-7 tumors in nude mice: Measurement problems and examples.
Proc. of IX International Conference on Electrical BioImpedance, Heidelberg, Alemania, pp.215-219, 1995
- Cheney M., Isaacson D.
Distinguishability in impedance imaging
IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol.39 pp.852-860, 1992
- Cinca J., Warren M., Rodríguez-Sinovas A., Tresánchez M., Carreño A., Bragós R., Casas O., Domingo A., Gómez P., Soler-Soler J.
Electrical properties of transmural myocardial infarct scar in swine
European Heart Journal, Vol.18, pp.164, 1997a
- Cinca J., Warren M., Rodríguez-Sinovas A., Tresánchez M., Carreño A., Bragós R., Casas O., Domingo A., Soler-Soler J.
Impedancia eléctrica del tejido de infarto cicatricial y su papel en la transmisión de las alteraciones del segmento ST
Revista Española de Cardiología, Vol.50 (Supl.6), p.146, 1997b
- Cinca J., Warren M., Bragós R., Casas O., Carreño A., Tresánchez M., Rodríguez-Sinovas A., Yañez A., Soler-Soler J.
Differential passive electrical properties of normal, acute ischemic, and transmural infarcted myocardium in swine.
Proc. of 9th Arrhythmia Meeting of the Spanish Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology, Madrid, 1998
- Cinca J., Warren M., Rodríguez-Sinovas A., Tresánchez M., Carreño A., Bragós R., Casas O., Domingo A., Soler-Soler, J.
Passive transmission of ischemic ST segment changes in low electrical resistance myocardial infarct scar in the pig
Cardiovascular Research (Aceptado)
- Cole K.S., Cole R. H.
Dispersion and absorption in dielectrics. I. Alternating current characteristics
Journal of Chemical Physics, Vol.9, pp.341-351, 1941
- Cook, R D
ACT3: A high-speed, High-precision electrical impedance tomograph
Phd Thesis. Rensselaer Polytechnic Institute. Troy, New York. 1992
- Craig D.Q.M., Cook G.D., G.D.Parr
Investigation into β -cyclodextrin/acetotoluide interactions using low frequency dielectric spectroscopy
Journal of Materials Science, Vol.27, pp.3325-3329, 1992
- Craig D.Q.M, Newton J.M. and Hill R.M.
An investigation into the low frequency dielectric response of polyethylene glycols
Journal of Materials Science, Vol.28, pp.405-410, 1993

- Dávila A.
Evaluación de métodos de reconstrucción en tomografía de impedancia eléctrica
Proyecto fin de carrera. E.T.S.E.T.B., Universitat Politècnica de Catalunya, 1989
- Dines, K.A., Lytle R.I.
Analysis of electrical conductivity imaging
Geophysics, Vol.46, pp.125-1036, 1981
- Dostál J.
Operational Amplifiers
Elsevier Scientific Publishing Company, 1981
- Fernández M.
Medidas de composición corporal mediante técnicas de impedancia eléctrica multifrecuencia
Proyecto fin de carrera. E.T.S.E.T.B. Universitat politècnica de Catalunya.1993.
- Fitzgerald A. J., Thomas B. J., Cornish B. H., Michael G.J., Ward L.C.
Extraction of electrical characteristics from pixels of multifrequency EIT images
Physiological Measurement, Vol.18, Nº2, pp.107-118, 1997a
- Fitzgerald A. J., Thomas B. J., Cornish B. H.
Tissue electrical characteristics from pixels of MFEIT images
Medical & Biological Engineering & Computing, Vol. 35, Suppl.I, p.321, 1997b
- Foster K.R., Schawn H.P.
Dielectric properties of tissues and biological materials: A critical review.
Critical Reviews in Biomedical Engineering, Vol.17, Nº.1, pp.25-104, 1989.
- Fallert M. A., Mirotnik M. S., Downing S. W., Savge E. B., Foster K. R., Josephson M. E., Bogen D. K.
Myocardial electrical impedance mapping of ischemic sheep hearts and healing aneurysms
Circulation, Vol.87, pp.199-207, 1993
- Frangi A.
Quantification and real time visualitation in electrical impedance tomography
Proyecto fin de carrera. E.T.S.E.T.B. Universitat Politècnica de Catalunya, 1996
- Frangi A.
Caracterització de teixits en viu
Comunicación interna. Departament d'Enginyeria Electrònica. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, 1997.
- Frangi A., Casas O., Sellart J., Rosell J., Riu P.J.
Quantification improvement in electrical impedance tomography. Experimental results
Medical & Biological Engineering & Computing, Vol. 35, Suppl.I, p.321, 1997a
- Frangi A., Casas O., Rosell J., Riu P.J.
Heuristic expressions for quantification improvement in EIT
Proc. of 42 Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, Illmenau (Alemania), pp.308-313, 1997b
- Gabriel C., Gabriel S., Corthout, E
The dielectric properties of biological tissues: I. Literature survey.
Phys. Med. Biol., Vol.41, pp:2231-2249, 1996a

- Gabriel S., Lau, R. W., Gabriel C.,
The dielectric properties of biological tissues: II. Measurements in the frequency range 10 Hz to 20 GHz .
Phys. Med. Biol., Vol.41, pp:2251-2269, 1996b
- Gabriel C., Gabriel S., Corthout, E
The dielectric properties of biological tissues: III. Parametric models for the dielectric spectrum of tissues.
Phys. Med. Biol., Vol.41, pp:2271 -2293, 1996c
- García-González M.A., Casas O., Rosell J., Pallás-Areny R.
Fluid shifts in simulated microgravity affect body segmental impedances and heart rate variability
Medical&Biological Engineering&Computing, Vol.35 (Suppl.I), p.440, 1997.
- Gasulla M., Jordana J., Pallás-Areny R., Torrents J.M.
The floating capacitor as a differential building block
IEEE transactions on Instrumentation and Measurement, (aceptado),1998
- Geddes L.A.
Electrodes and the Measurement of Bioelectrical Events
Wiley-Interscience, New York, 1972.
- Gersing E., Preusse C. J., Gebhard M.M., Bretschneider H.J.
Use of electric impedance spectroscopy for survives of the myocardial ischemic stress.
Pflügers Arch. ges. Physiol.-Europ.J.Physiol., p.381, R2, 1981
- Gersing E.
Measurement of electrical impedance in organs - measuring equipment for research and clinical applications
Biomedizinische Technik, Vol.36, N°1-2, pp. 6-11, 1991.
- Gersing E., Hoffmann B., Hehrer G., Pottel R.
Modelling based on tissue structure - The example of porcine liver.
Innovation and Technology in Biology and Medicine, Vol. 16, N° 6, pp 672-678, 1995
- Gersing E.
Monitoring temperature induced changes during hyperthermia by impedance methods
Proc. of X International Conference on Electrical Biolmpedance, Barcelona, pp.37-40, 1998
- Geselowitz D.B.
An application of electrocardiographic lead theory to impedance plethysmography
IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol.18, pp.38-41, 1971
- Gisser D.G., Isaacson D., Newell J.C.
Current topics in impedance imaging
Clinical Physics and Physiological Measurement, Vol.8 (suppl.A), pp.39-46, 1987
- Gisser D.G., Isaacson D., Newell J.C.
Theory and performance of an adaptative current tomography system
Clinical Physics and Physiological Measurement, Vol.9 (suppl.A), pp.35-41, 1988.

- Grace O.D., Pitt S.P.
Sampling and interpolation of bandlimited signals by quadrature methods
J. Acoust. Soc. Am., Vol.48, pp.1311-1318, 1970
- Griffiths H., Leung H.T.L., Williams R.J.
Imaging the complex impedance of the thorax
Clinical Physics and Physiological Measurement, Vol.13 (Suppl.A), pp.77-81, 1992
- Griffiths H., Jossinet J.
Bioelectrical spectroscopy from multi-frequency EIT
Physiological Measurement, vol.15 (suppl.2A), pp.A59-A63, 1994
- Griffiths H.
A Cole phantom for EIT
Physiological Measurement, Vol.16, Suppl.3^a, pp.A29-A38, 1995
- Hahn G., Freirichs I., Kleyer M., Hellige G.
Local mechanics of lung tissue determined by functional EIT
Proc. of IX International Conference on Electrical Bio-Impedance, Heidelberg, Germany,
pp.456-457, 1995
- Hampshire A. R., Smallwood R. H., Brown B.H., Primhak R. A.
Multifrequency and parametric EIT images of neonatal lungs
Physiological Measurement, Vol.16 (suppl.3A), pp.A175-A189, 1995
- Heintz J., Minet O.
Dielectric properties of female breast tumours
Proc. of IX International Conference on Electrical BioImpedance, Heidelberg. Alemania,
pp.356-359, 1995
- Henderson R.P., Webster J.G.
An impedance camera for spatially specific measurements of the thorax
IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol.25, pp.250-254, 1978
- Héroux P., Bourdages M.
Monitoring living tissues by electrical impedance spectroscopy
Annals of Biomedical Engineering, Vol.22, pp.328-337, 1994
- Holder D.S., Hanquan Y., Rao A.
Some practical biological phantoms for calibrating multifrequency electrical impedance tomography
Physiological Measurement, Vol.17, pp.167-178, 1996
- Isaacson D.
Distinguishability of conductivities by electrical current computed tomography
IEEE Transactions on Medical Imaging, vol.5, pp.91-95, 1986
- Isaacson D., Edic P.
An algorithm for impedance imaging
Proc. 14th Annual International Conference IEEE-EMBS, Paris, pp.1693, 1992
- Jain, H., Isaacson D., Edic P., Newell J.C.
Optimal current patterns in impedance imaging
Proc. 17th Annual International Conference. IEEE-EMBS, Montreal, pp.567-568, 1995

- Jossinet J., Lobel A., Michoulet C., Schmitt M.
Quantitative technique for bioelectrical spectroscopy
J.Biomed.Eng., Vol.7, pp.289-294, 1985
- Jürgens I., Rosell J., Riu P. J.,
Electrical impedance tomography of the eye: In vitro measurements of the cornea and the lens
Physiological Measurement, Vol.17, pp.187-196, 1996
- Kato H., Ishida T.
Development of an agar phantom adaptable for simulation of various tissues in the range 5-40 MHz
Phys. Med. Biol., Vol.32, pp.221-226, 1987
- Kim Y., Woo H.W., Luedtke A.E.
Impedance tomography and its applications in deep venous thrombosis detection
Engineering in Medicine and Biology Magazine, 1989
- Köksal A., Eyüboğlu B.M.
Determination of optimum injected current patterns in electrical impedance tomography
Physiological Measurement, Vol.16, pp.99-109, 1995
- Kubicek W.G., Karnegis J.N., Patterson R.P., Witsoe D.A., Mattson R.H.,
Development and evaluation of an impedance cardiac output system
Aerospace Med., Vol.37, pp.1208-1212, 1966
- Lopez F. X.
Demodulador coherente de banda ancha y alta velocidad
Proyecto fin de carrera. E.T.S.E.T.B. Universitat Politècnica de Catalunya, 1995
- Lozano A.
Monitorización no invasiva de desplazamiento de fluidos corporales mediante impedancia eléctrica
Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona. 1994
- Lu L., Hamzaoui L., Brown B., Rigaud B., Smallwood R.H., Barber D.C., Morucci J.P.
Parametric modelling for electrical impedance spectroscopy system.
Medical & Biological Engineering & Computing, Vol. 34, pp.122-126, 1996
- MacDonald J. R., Potter L.D.
A flexible procedure for analyzing impedance spectroscopy results: description and illustrations
Solid State Ionics, Vol.23, pp.61-79, 1987
- MacDonald J. R.
Impedance Spectroscopy
Annals of Biomedical Engineering, Vol.20, pp.289-305, 1992
- Martínez, J.L.
Contribución a la obtención de imágenes paramétricas en TIE multifrecuencia
Proyecto fin de carrera. E.T.S.E.T.B. Universitat Politècnica de Catalunya, 1997
- McAdams E. T., Jossinet J. Lacknermer, A.
Modelling the 'constant phase angle' behaviour of biological tissues: potential pitfalls.
Innovation and Technology in Biology and Medicine, Vol 16, pp.662-670, 1995

McRae D.A., Esrick M.A.
The dielectric parameters of excised EMT-6 tumours and their change during hyperthermia.
Phys. Med. Biol, Vol.37, pp.2045-2058, 1992

Morón X.
Realización de un entorno de trabajo y presentación en windows para un sistema de TIE
Proyecto fin de carrera. E.T.S.E.T.B. Universitat Politècnica de Catalunya, 1996

Murai T., Kagawa Y.
Electrical impedance computed tomography based on a finite-element model
IEEE Trans. Biomedical Engineering, Vol.32, pp.177-184, 1985

Nelder J.A., Mead R.
A simplex method for function minimization
Computer Journal, Vol.7 pp.308-313, 1965

Nyboer J., Murray P., Sedensky J.A.
Blood flow indices in amputee and control limbs by mutual electrical impedance
plethysmography
American Heart Journal, Vol.87, pp.704-710, 1974

Olivé E.
Reconstrucció de distribucions tridimensionals d'impedància elèctrica
Proyecto fin de carrera. E.T.S.E.T.B. Universitat Politècnica de Catalunya, 1993

Orellana E.
Prospección geoelectrica en corriente continua
Editorial Paraninfo, Madrid, 1982

Osterman K. S., Paulsen K. D., Hoopes P. j., Hartov A., Jones S.B.
Application of linear circuit models to impedance spectra in irradiated muscle
Proc. X International Conference on Electrical BioImpedance, Barcelona, pp.41-44, 1998

Pallás-Areny R., Webster J.G.
Common mode rejection ratio for cascaded differential amplifier stages
IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol.40, pp.677-681, 1991

Pallás-Areny, R.
Adquisición y distribución de señales
Editorial Marcombo. Boixareu Editores, 1ª Edición, Barcelona, 1993

Pallás-Areny R., Casas O.
Analog front end for bioimpedance measurement based on the floating capacitor technique
Innovation and Technology in Biology and Medicine, Vol.15, pp.109-115, 1994

Pallás-Areny R, Casas O
A novel differential synchronous demodulator for AC signals
IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol.45, pp.413-416, 1996

Patiño N.M., Valentinuzzi M.E.
Reconstruction algorithm for electrical impedance tomography based on the linear
approximation method.
Proc. 17th Annual International Conference. IEEE-EMBS, Montreal, pp.569-570, 1995

- Peloso R., Tuma D. T., Jain R.K.
Dielectric properties of solid tumours during normothermia and hyperthermia
IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol.31, pp.725-728, 1984
- Pething R.
Dielectric properties of biological materials: biophysical and medical applications
IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol.19, pp.453-474, 1984
- Pething R.
Dielectric properties of body tissues
Clinical Physics and Physiological Measurement, Vol.8, Suppl.A, pp.5-12,1987
- Pidcock M.K., Kuzuoglu M., Leblebicioglu K.
Analytical and semianalytical solutions in electrical impedance tomography. I: Two dimensional problem.
Physiological Measurement, Vol.16, pp.77-90, 1995
- Povill R., Riu P.J.
Quantification in multifrequency tomography
Physiological Measurement, Vol.16 (Suppl.3A), pp.A69-A78, 1995
- Preusse C.J., Gersing E., Gebhard M.M., Ponizy A., Schnabel A., Bretschneider H.J.
Intraoperative atraumatic monitoring of myocardial revivability by continuous or intermittent measurement of electrical impedance of the heart
Thorac. Cardiovasc. Surg., Vol.30 (special issue), p.18, 1982
- Rabbat A.
Tissue Resistivity. Cap.2 de "Electrical Impedance Tomography"
J.G. Webster ed., Adam Hilger, Bristol & New York, 1988
- Ramo S., Whinnery J. R., Van Duzer T.
Campos y Ondas
Ediciones Pirámide, Madrid, 1965
- Repo T.V.
Impedance analysis of woody plant tissue
Proc. 8th International Conference on Electrical Bio-Impedance, Kuopio, pp.73-75, 1992
- Rigaud B., Hamzaoui I., Frikha M, Chaveau N., Morucci J.P.
In vitro tissue characterization and modelling using electrical impedance measurements in the 10 Hz - 10 MHz frequency range.
Physiological Measurement, Vol.16, Suppl.3, pp.15-28, 1995
- Rigaud B., Morucci J.P., Chauveau N.
Bioelectrical impedance techniques in medicine. Part I. Bioimpedance measurements. Impedance spectrometry
John R. Bourne editor. Critical reviews in Biomedical Engineering. Vol.24, issues 4-6, 1996
- Ristic B., Kun S., Peura R.A.
Muscle tissue ischemia monitoring using impedance spectroscopy: Quantitative results of animal studies.
Proc. XIX International Conference - IEEE/EMBS, Chicago, pp.2108-2111, 1997

- Riu P. J.
Detecció d'estructures estàtiques en el cos humà usant mètodes multifreqüència en tomografia de impedància elèctrica
Tesis doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona.1991
- Riu P.J., Rosell J., Lozano A., Fernández M.
Weight-independent body composition estimators based on multifrequency electrical impedance measurements
IX International Conference on Electrical Bio-Impedance. Heidelberg, Alemanya, pp.229-232, 1995
- Riu P.J., Bragós R., Rosell J.
Broadband quasi-differential multifrequency electrical impedance imaging system
Physiological Measurement, Vol.17, Suppl.A, pp.A39-A47, 1996a
- Riu P.J., Bragós R., Warren M., Tresánchez M., Carreño A., Cinca J.
Myocardial impedance spectrum during acute ischemia in the in-situ pig heart
Proc. of the Biomedical Engineering Society. 1996 Annual fall meeting. Pennsylvania. p.256, 1996b
- Riu P.J., Lapaz C.
Practical limits of the Kramers-Kroning relationships applied to experimental bio-impedance data
Proc. of X International Conference on Electrical BioImpedance. Barcelona, pp.123-126, 1998
- Roth B.J.
The electrical properties of tissues
Biomedical Engineering Handbook. J.D.Bronzino ed., pp126-138. CRC Press-IEEE, 1995
- Rosell J.
Tomografía de impedància elèctrica para aplicaciones médicas
Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 1989
- Rosell J., Riu P.J.
Common-mode feedback in electrical impedance tomography
Clin. Phys. Physiol. Meas., Vol. 13, Suppl.A, pp.11-14, 1992
- Rosell J., Casas O., Bragós R., Riu P.J., Andersen L.J.
Estimation of intra and extra-cellular segmental volumes using electrical impedance measurements
Medical&Biological Engineerin&Computing, Vol.35 (Suppl.I), p.333, 1997
- Schwan, H.P.
Electrical properties of body tissues and impedance plethysmography
IRE Trans. Biomed.Electron.,Vol.3, pp.32-46, 1955
- Schwan H.P.
Electrical properties of tissue and cell suspensions.
Adv. Biol. Med. Phys., Vol.5, pp.147-208, 1957
- Schwan H.P.
Analysis of dielectric data: Experience gained with biological material
IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. EI-20,6 pp.913-922, 1985

- Schnabel A., Gebhard M.M., Gersing E., Preusse L.J., Ulbricht Th., Pomykaj J., Tichter J., Schwartz P., Speickermann B., Bretschneider H.J.
Evaluation of alterations in ischemically stressed myocardium by electron microscopy and electric impedance spectroscopy.
Verh. Anat. Ges., Vol.78, pp.379-382, 1984
- Seagar A.D., Barber D.C., Brown B.H.
Theoretical limits to sensitivity and resolution in impedance imaging
Clinical Physics and Physiological Measurement, Vol.9 (Suppl.A), pp.35-41, 1987
- Smith D.N.
Tissue impedivity and electro-mathematical modelling of bioimpedances
Innovation and Technology in Biology and Medicine, Vol.16, N°6, pp.694-704, 1995
- Stoy R.D., Foster K.R., Schwan H.P.
Dielectric properties of mammalian tissues from 0.1 to 100 MHz: a summary of recent data
Physics in Medicine and Biology, Vol.27, n°4, pp.501-513, 1982
- Surowiec A., Stushly S.S., Barr J.R., Swarup A.
Dielectric properties of breast carcinoma and the surrounding tissues.
IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol.25, pp.257-262, 1988
- Tarassenko, L., Rolfe P.
Imaging spatial distribution of resistivity: An alternative approach
Electronics letters, Vol.20, pp.29-33, 1984
- Torrents J.M.
Desenvolupament de tècniques de mesura d'impedància elèctrica aplicades a la caracterització de sòls
Tesis doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona. 1996.
- Tresánchez M., Bragós R., Casas O., Rosell J., Warren M., Carreño A., Rodríguez-Sinovas A., Gómez P., Cinca J.
Identification of myocardial infarct scar by impedance spectroscopy
Medical & Biological Engineering & Computing, Vol.35, suppl.1, p.334, 1997
- Urquidi-MacDonald M., Real S., MacDonald D. D.
Application of Kramers-Kronig Transforms in the Analysis of electrochemical impedance data, II, Transformations in the complex plane.
J. Electrochem.Soc, Vol.133, pp.2018-2024, 1986.
- Valentinuzzi M.E.
Bioelectrical impedance techniques in medicine. Part I. Bioimpedance measurements. General concepts
John R. Bourne editor. Critical reviews in Biomedical Engineering. Vol.24, issues 4-6, 1996
- Warren M, Carreño A., Cinca J., Tresánchez M., Rodríguez-Sinovas A., Bragós R., Casas O., Gómez P., Soler-Soler J.
El paper de la resistivitat miocàrdica en la reversió de la elevació del segment ST durant les fases agudes i cròniques de l'oclusió coronària en porcs
Revista de la Sociedad Catalana de Cardiología, Vol.2, N°5, p.41, 1997

Warren M., Casas O., Bragós R., Tresánchez M., Carreño A., Rodríguez-Sinovas A., Yañez A., Rosell J., Riu P. J., Cinca J.

Timecourse of myocardial tissue electrical impedance ischemia and reperfusion in in-vivo pig hearts

Proc. of X International Conference on Electrical BioImpedance, Barcelona, pp.81-84, 1998

Webster J.G.

Electrical Impedance Tomography

Bristol: Institute of Physics, ch.4, pp.36-37, 1990

Yañez A.

Automatización de medidas de impedancia eléctrica. Aplicación a la caracterización de bioimpedancias

Proyecto Fin de Carrera. E.T.S.E.T.B. Univeritat Politècnica de Catalunya. Barcelona, 1997.

Yélamos D., Casas O., Bragós R., Rosell J.

Improvement of a front-end for bioimpedance spectroscopy

Proc. of X International Conference on Electrical BioImpedance. Barcelona, pp.383-386, 1998

Yorkey, J.Y.

Comparing reconstruction methods for electrical impedance tomography

Tesis doctoral. University of Wisconsin, U.S.A, 1986

Yorkey, J.Y., Webster J.G., Tompkins W.J.

Comparing reconstruction algorithms for electrical impedance tomography

IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol.34, pp.843-852, 1987