

Diseño, implementación y evaluación de un sistema de telecardiología útil como apoyo a la investigación médica y en la toma de decisiones clínicas: Aplicación práctica en el estudio de la HRV durante la hemodiálisis

JD Trigo¹, Á Alesanco¹, P Serrano², J Mateo¹, A Recaj², I Pascual², RSH Istepanian³, J García¹

¹ Departamento Ingeniería Electrónica y Comunicaciones, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, España, {jtrigo,alesanco,mateo,jogarmo}@unizar.es

² Servicio de Cardiología, Hospital Clínico Universitario Lozano Blesa, Zaragoza, España, telecardiologo@gmail.com,luis@aphotekderma.com, ipascualcalleja@yahoo.es

³ Universidad de Kignston, Kignston, Inglaterra, r.istepanian@kingston.ac.uk

Resumen

Este artículo presenta un sistema de telecardiología útil para la investigación médica así como para la toma de decisiones clínicas. La arquitectura del sistema consta de tres secciones: la unidad de diálisis, el servidor de información remoto y el cardiólogo. En la unidad de diálisis, un médico recoge el ECG e información de interés durante el proceso de diálisis y lo envía al servidor. Cada ECG es almacenado, vinculado a la base de datos y procesado. Se genera automáticamente un informe de resultados y se notifica al cardiólogo. El sistema ha sido aplicado en el estudio de la HRV en pacientes sometidos a procesos de diálisis. En este caso particular, el informe consiste en tendencias de los índices temporales y frecuenciales de la HRV. El sistema ha sido evaluado por los pacientes así como por el personal médico, que lo valoraron positivamente. El sistema se ha mostrado como una herramienta eficiente y útil para el apoyo en la toma de decisiones clínicas.

1. Introducción

La señal electrocardiográfica (ECG) es la técnica no invasiva más usada para el diagnóstico de patologías cardíacas. La transmisión (en tiempo real o store-and-forward) de este tipo de señales a través de diferentes tipos de redes (cableadas o wireless) está presente en muchas de las aplicaciones de telecardiología implementadas hasta la fecha. Además, el procesado digital de los ECGs se ha mostrado como una herramienta significativa en las últimas décadas. Gracias al procesado automático se ha reducido tanto el coste como el tiempo empleado por los cardiólogos en el análisis [1]. Recientemente, se han diseñado novedosas técnicas de procesado mediante el esfuerzo conjunto de médicos e ingenieros, obteniendo como resultado unos índices más potentes para la toma de decisiones clínicas. Estas nuevas técnicas de procesado pueden ponerse al servicio de los médicos gracias a servidores de información, encargados de procesar las señales y de brindar al médico la información necesaria para el diagnóstico y el seguimiento clínico del cardiópata [2]-[3].

La diálisis es otra de las áreas en las que la telemedicina ha sido aplicada con éxito [4]. La mayoría de las últimas experiencias se han focalizado en la monitorización de sesiones de diálisis [5] incluyendo la comunicación entre el *cycler* y un PC [6]. Se ha presentado recientemente un sistema de telemedicina que monitoriza la presión sanguínea y el ritmo cardíaco mediante un teléfono móvil, resultando de gran utilidad para pacientes sometidos a un proceso de diálisis peritoneal ambulatoria continua [7].

La variabilidad del ritmo cardíaco (HRV) es un conjunto de índices utilizado para analizar los mecanismos que controlan el sistema cardiovascular. Algunos trabajos previos apuntan la relación existente entre la diálisis y la HRV. Según estos trabajos, la HRV podría tener valor pronóstico en pacientes sometidos a procesos de hemodiálisis, siendo capaz de identificar riesgos elevados de muerte súbita. Valores reducidos en algunos de los índices, particularmente aquellos que reflejan variabilidad a largo plazo, se han mostrado como predictores independientes de fallecimiento cardíaco en pacientes crónicos de hemodiálisis [8]. Otros estudios sugieren que la inestabilidad hemodinámica está fuertemente asociada con una HRV reducida. En otro estudio, el ratio baja frecuencia-alta frecuencia se ha mostrado como el índice más influyente de los que conforman la HRV para determinar pacientes en riesgo y, por tanto, puede resultar muy útil para identificar a estos pacientes [9].

Sin embargo, la mayoría de los trabajos previos usan un conjunto reducido de los índices que conforman la HRV para estudiar la relación entre la HRV y la diálisis. Algunos se concentran en índices temporales [10] y otros en frecuenciales [8]-[9]. Los últimos avances en el análisis del ECG han establecido nuevos métodos para identificar enfermedades cardiovasculares [11]-[12]. Por tanto, podría resultar de gran interés otorgar a los especialistas la posibilidad de servirse tanto de los índices convencionales como de los desarrollados recientemente para el estudio de los efectos de la hemodiálisis en la HRV con el objetivo de identificar pacientes con riesgo de muerte súbita.

En este artículo se presenta un sistema de telecardiología que resulta útil como apoyo a la investigación médica así como para la toma de decisiones clínicas. El escenario elegido para la evaluación de este sistema es el estudio de la HRV durante el proceso de hemodiálisis.

2. Arquitectura del sistema

La arquitectura del sistema de telecardiología se puede dividir en tres secciones (véase Figura 1): el médico en la unidad de diálisis, el cardiólogo especialista y el servidor de información. En la unidad de diálisis, un médico recoge el ECG mediante un dispositivo móvil y los envía al servidor. El ECG se procesa automáticamente y se genera y almacena un informe en el servidor. Por último, el especialista accede remotamente al servidor y analiza los resultados para emitir un diagnóstico.

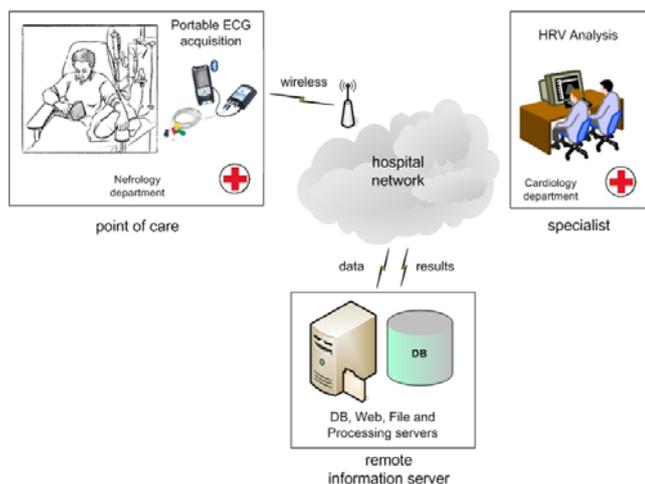


Figura 1. Escenario del sistema de telemedicina

2.1. Registro y transferencia de datos

La adquisición de los datos se realiza mediante un amplificador de señales biomédicas portátil (gMOBILab de gTEC, Graz-Austria) a 1024 Hz y 16 bits por muestra.

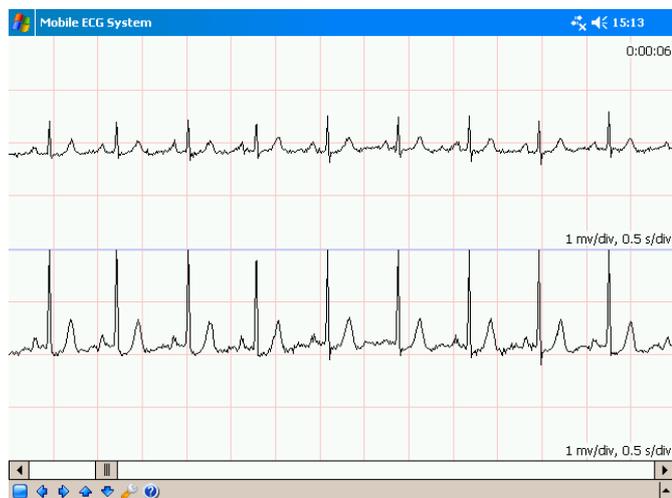


Figura 2. Visor de ECGs para la PDA

El adquisidor se conecta a una PDA, en la que se han incluido diversas aplicaciones programadas para el registro, almacenamiento (SCP_ECG) y transmisión de ECGs. Además de la visualización en tiempo real, también se puede consultar el fichero generado mediante un visor de ficheros SCP programado a tal efecto (Figura 2). Mediante un navegador web el médico puede enviar los datos e incluir datos adicionales (Figura 3). Los datos recogidos se envían al servidor a través de un enlace wireless con seguridad habilitada hasta un ordenador de la red del hospital que actúa como pasarela. El tiempo medio de transmisión fue de $15'08'' \pm 38''$.



Figura 3. Cliente web para la PDA

2.2. Almacenamiento y generación del informe

El servidor de información consta de varios módulos: el servidor web (Tomcat), la base de datos (MySQL), el módulo de MATLAB y el servidor de ficheros. Los ECGs recibidos se almacenan en el servidor de ficheros y se vinculan a la base de datos, diseñada siguiendo las indicaciones de los cardiólogos. El servidor web (programado mediante *struts*) posibilita un acceso seguro desde navegadores web desde la unidad de diálisis (usando la PDA) o desde cualquier PC. El módulo de Matlab aplica diferentes y avanzadas técnicas de procesamiento de señal a los ECGs, generándose un informe de resultados.

En el servidor se han establecido ciertas conexiones entre los diferentes módulos (Figura 4). La comunicación entre Java y Matlab se ha establecido mediante Matlab Server Pages (MSP) [14]. Java comparte cierta información con Matlab extraída de la base de datos, mientras que el núcleo central de procesamiento se concentra en Matlab. Cuando concluye el procesamiento, la base de datos se actualiza con los resultados generados. Para esto se ha hecho uso de mYm [15]. mYm es una herramienta capaz de conectar Matlab con MySQL, posibilitando la modificación de campos de la base de datos mediante líneas de código escritas en Matlab. Algunos resultados generales se almacenan directamente en la base de datos para una consulta rápida mediante el navegador web, pero también se genera un informe completo con información detallada de los resultados que es almacenado en el servidor de ficheros y se vincula a la base de datos.

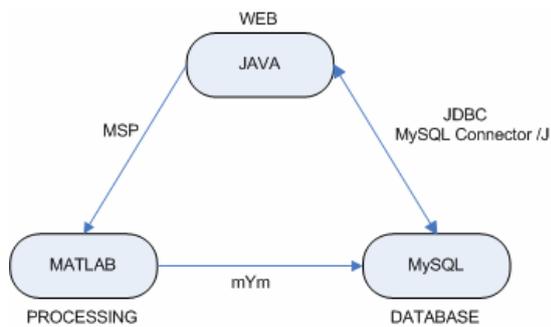


Figura 4. Conexiones en el servidor

2.3. Análisis de los resultados y diagnóstico

Cuando el proceso concluye, el cardiólogo recibe automáticamente un correo electrónico que le informa de que nuevos resultados han sido generados e incluidos en la base de datos para su revisión. El cardiólogo accede, mediante un navegador web, a los resultados, pero también puede consultar el registro de la señal ECG usando una herramienta programada a tal efecto. En el servidor se encuentra también información adicional de interés que puede ser útil para el diagnóstico clínico.

3. Aplicación en el estudio de la HRV durante la hemodiálisis

El sistema de telecardiología ha sido implementado con el objetivo de proporcionar apoyo en el estudio de la HRV en pacientes sometidos a procesos de diálisis (Figura 5). El protocolo de registro y análisis se efectuó con un grupo preliminar de 31 pacientes con patología renal. El ECG se registró durante la diálisis y durante los 10 minutos previos y posteriores a la misma. El tiempo medio de adquisición fue de $4h19' \pm 11'$ y el tamaño medio del archivo fue de 60,7 Mbytes.



Figura 5. Registro de un ECG en la unidad de diálisis.

Para el análisis de la HRV se computaron los siguientes índices temporales [16]:

- NN, número de latidos normales.
- NE, número de latidos anómalos (ectópicos).
- mHR, media del ritmo cardíaco.
- SDNN, desviación estándar de los intervalos entre latidos normales (NN).
- rMSSD, raíz cuadrada de la diferencia sucesiva de NN, calculada después de eliminar la componente

lineal estimada como la recta de regresión de las series de HR.

- pNN50, porcentaje de intervalos mayores que 50 ms respecto del total.

En cuanto a los frecuenciales, se ha calculado la densidad espectral de potencia (PSD) de la HRV, estimada después de eliminar la componente lineal [13], resampleada a 2 Hz, reduciendo así el efecto de los latidos ectópicos.

En la Figura 6 se muestra un ejemplo del cuadro resumen con los resultados generales que obtiene el servidor tras procesar la señal. En este informe se incluyen las tendencias de los índices de la HRV, observándose su variación a lo largo del proceso de diálisis. Asimismo se genera un fichero con todos los resultados obtenidos que se almacena en el servidor. El servidor incluye también herramientas estadísticas para obtener resultados medios del grupo de estudio.

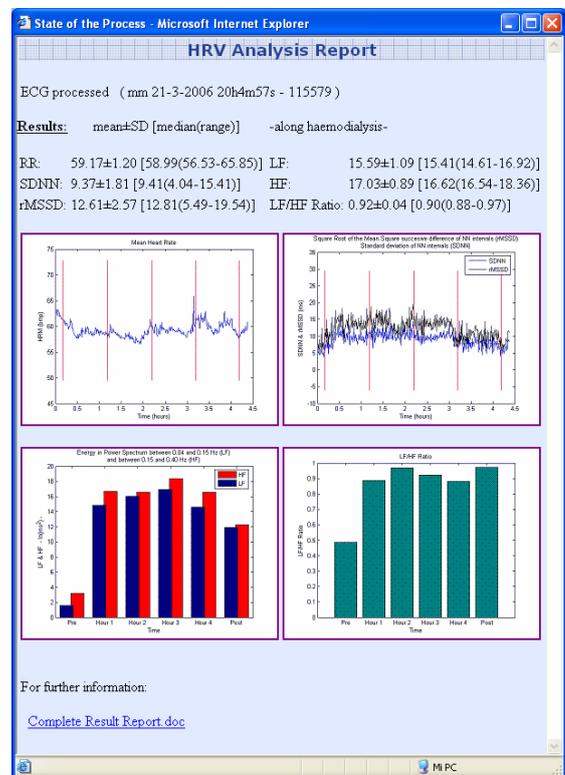


Figura 6. Cuadro resumen del informe de resultados

4. Evaluación del sistema

4.1. Evaluación por parte de los pacientes

Todos los pacientes fueron informados previamente antes de ser incluidos en el estudio. De los cuestionarios que rellenaron (Tabla 1) se extrae que más del 90% de los pacientes valoraron positivamente el sistema.

	Sí (N)	No (N)
Claridad acerca de la información dada	31	0
¿Se siente usted cómodo?	29	2
¿Se siente usted mejor atendido?	28	3

Tabla 1. Evaluación por parte de los pacientes

4.2. Evaluación por parte del personal del hospital

El personal del hospital también evaluó el sistema de telemedicina. El cuestionario constaba de cuatro apartados: evaluación general, calidad técnica, impacto sobre el propio personal del hospital e impacto sobre los pacientes. Los dos médicos que colaboraron en el proyecto rellenaron el cuestionario conjuntamente. Como se muestra en la Tabla 2, el personal del hospital también valoró positivamente el sistema, enfatizando su calidad técnica y su usabilidad.

<i>Evaluación general</i>		Sí	No
¿Se adecua el sistema a las necesidades concretas?	<i>f</i>		
¿Es fácil usarlo?	<i>f</i>		
¿Es intuitivo?	<i>f</i>		
¿Estarían dispuestos a utilizar el sistema en otra ocasión?	<i>f</i>		
<i>Calidad técnica</i>			
¿Permiten las características una actuación de calidad?	<i>f</i>		
¿Presenta problemas técnicos el equipo?	<i>f</i>		
Frecuencia de los fallos		1	al mes
<i>Impacto sobre el personal médico</i>			
¿Se han tenido que establecer cambios?	<i>f</i>		
¿Cuántos?		algunos	
¿Han sido estos cambios bien aceptados?	<i>f</i>		
¿Cuánto tiempo adicional supone?		20±5	m
<i>Impacto sobre los pacientes</i>			
¿Reacción del paciente?		calma	
¿Se observan cambios en la conducta de los pacientes?	<i>f</i>		
¿Existe preocupación por la responsabilidad de la atención, la confidencialidad o la pérdida de calidad de los datos?	<i>f</i>		

Tabla 2. Evaluación por parte del personal médico

5. Discusión y conclusiones

Fue necesario instalar en la PDA una batería de larga duración, puesto que una sesión de diálisis dura entre 4 y 5 horas. En cualquier caso, esto no fue un problema ya que el sistema trabaja en modo store-and-forward, y por tanto no se necesita un gran ancho de banda.

De los resultados preliminares de este reducido grupo de pacientes se observa que los pacientes muestran diferentes patrones de cambios en la HRV y que por tanto, es necesario que este estudio se complete con una población mayor.

La evaluación final ha revelado que el sistema ha recibido una muy buena acogida por parte de los pacientes. Desde el punto de vista del personal del hospital, el sistema constituye una herramienta útil para el apoyo al diagnóstico clínico. La principal ventaja es que el sistema les proporciona de manera automática nuevos índices que les permiten explorar aspectos del sistema cardiovascular que no se habían considerado antes. Actualmente, se están recogiendo datos de nuevos pacientes para validar los resultados preliminares.

Referencias

- [1] Carel RS, Drory Y, Miller H, Kaplinski E. Utilization of an automated ECG interpretation system in an ambulatory health service. *Med Prog Technol.* 1978 Nov; 6(1):35-8.
- [2] Jegelevičius D, Marozas V, Lukoševičius A, Patašius M. Web-based health services and clinical decision support. *Studies in Health Technology and Informatics: Transformation of Healthcare with Information Technologies.* ISSN 0926-9630. 2004; 105:27-37.
- [3] García J, Martínez I, Sörnmo L, Olmos S, Mur A, Laguna P. Remote processing server for ECG-based clinical diagnosis support. *IEEE Trans Inf Technol Biomed.* 2002 Dec; 6(4):277-284.
- [4] Mitchell JG, Disney AP. Clinical applications of renal telemedicine. *J Telemed Telecare.* 1997;3(3):158-62.
- [5] Bellazzi R, Magni P, Bellazzi R. Improving dialysis services through information technology: from telemedicine to data mining. *Medinfo.* 2001;10(Pt 1):795-9.
- [6] Ghio L, Boccola S, Andronio L, Adami D, Paglialonga F, Ardissino G, Edefonti A. A case study: telemedicine technology and peritoneal dialysis in children. *Telemed J E Health.* 2002;8(4):355-9.
- [7] Nakamoto H, Nishida E, Ryuzaki M, Sone M, Yoshimoto M, Itagaki K. Blood pressure monitoring by cellular telephone in patients on continuous ambulatory peritoneal dialysis. *Adv Perit Dial.* 2004; 20:105-10.
- [8] Fukuta H, Hayano J, Ishihara S, Sakata S, Mukai S, Ohte N, Ojika K, Yagi K, Matsumoto H, Sohmiya S, Kimura G. Prognostic value of heart rate variability in patients with end-stage renal disease on chronic haemodialysis. *Nephrol Dial Transplant.* 2003 Feb;18(2):318-25.
- [9] Cashion AK, Holmes SL, Arheart KL, Acchiardo SR, Hathaway DK. Heart rate variability and mortality in patients with end stage renal disease. *Nephrol Nurs J.* 2005 Mar-Apr;32(2):173-84.
- [10] Tamura K, Tsuji H, Nishiue T, Yajima I, Higashi T, Iwasaka T. Determinants of heart rate variability in chronic haemodialysis patients. *Am J Kidney Dis.* 1998 Apr;31(4):602-606.
- [11] Mateo J, Laguna P. Improved heart rate variability signal analysis from the IPFM model. *IEEE Trans Biomed Eng.* 2000 Aug; 47(8):985-996.
- [12] Bailon R, Mateo J, Olmos S, Serrano P, Garcia J, del Rio A, Ferreira IJ, Laguna P. Coronary artery disease diagnosis based on exercise electrocardiogram indexes from repolarisation, depolarisation and heart rate variability. *Med Biol Eng Comput.* 2003 Sep;41(5):561-71.
- [13] Mateo J, Laguna P. Analysis of Heart Rate Variability in the Presence of Ectopic Beats Using the Heart Timing Signal. *IEEE Trans Biomed Eng.* 2003 Mar; 50(3): 334-343. M. Young, *The Technical Writers Handbook.* Mill Valley, CA: University Science, 1989.
- [14] MSP, cortesía de A. Kizil, Yildiz Technical University, Estambul. <http://msp.sourceforge.net/>
- [15] mYm, cortesía de Y. Maret, Ecole Polytechnique Fédérale, Lausanne. <http://tswww.epfl.ch/~maret/software.php>