

SOFTWARE CIENTÍFICO PARA EL ANÁLISIS DE SEÑALES CARDÍACAS

Pavel Augusto Ritto Mijangos*

Síntesis

En este trabajo, se presenta una herramienta de cómputo para análisis estadístico de señales cardíacas en el ambiente del sistema operativo Linux. Se describe un ejemplo de desarrollo de algoritmos y su aplicación para cálculo científico, que no requiere la compra del sistema operativo, software complementario o configuración especial del sistema.

Introducción

En diversas fuentes de internet [1] es posible encontrar críticas acerca de las diferencias entre sistemas operativos, en particular, Windows de Microsoft y Linux en sus diversas presentaciones / versiones. Sin embargo, no siempre es claro, desde el punto de vista práctico, cuál de los dos sistemas operativos nos conviene más al momento de realizar un trabajo científico. Actualmente, muchos de los paquetes científicos vienen en versiones para distintos sistemas operativos, por lo que en muchas ocasiones no queda otra opción que probar en ambos sistemas operativos para decidir cuál es el adecuado a nuestras necesidades.

La idea inicial para realizar este trabajo, surge de la motivación de tener a mano un conjunto de algoritmos para el análisis de señales cardíacas que sean aplicables a un conjunto de series temporales (archivos / bases de datos), que sea amigable (que no se requiera un conocimiento especializado para usarlo) y que sea fácil de instalar en otra máquina con Linux. Los algoritmos del software se describen en las Refs.[2,3], algunos de ellos están disponibles en lenguaje C o en lenguaje Fortran [4] pero no en lenguaje de Matlab [5] u Octave [6], que en muchos casos son más prácticos y nemotécnicos. Para los análisis que se describen aquí, el tiempo empleado para los cálculos es del orden de unos cuantos minutos, pero si el tipo de análisis lo requiriese se puede incorporar, sin mayor problema, programas realizados en Fortran o en C. El software científico fue desarrollado y probado en el sistema operativo Linux Red Hat - Fedora 3 (gratis) [7].

Señales cardíacas

El software está orientado hacia el análisis de señales cardíacas. La más popular de las señales cardíacas es la obtenida utilizando electrodos colocados en la piel, procedimiento conocido como electrocardiograma (ECG). No obstante, en la actualidad existen otros métodos para cuantificar el latido cardíaco utilizando distintas técnicas físicas, tales como las mecánicas, las acústicas o las ópticas [8]. Debido al movimiento cuasi periódico del corazón, la señal obtenida con cualesquiera de las técnicas mencionadas presenta características oscilatorias. Por ejemplo, en la figura 1 se muestra un segmento de un ECG típico de un humano sano, en el que se aprecian sutiles variaciones en la forma de la

señal. Existen muchos métodos para analizar las características de una señal cardíaca, ya sea desde el punto de vista meramente estadístico o bien desde el punto de vista más fundamental de la física [4,9]. El interés de realizar estos análisis es el encontrar propiedades matemáticas o físicas del latido cardíaco que permitan, por un lado, diagnosticar el estado fisiológico del organismo (*e.g.* sano o enfermo) y por otro, poder predecir una futura disfunción cardíaca. Se ha encontrado, que para realizar esta labor no siempre se requiere analizar todos los datos de la señal cardíaca, sino que en ocasiones es suficiente tomar un subconjunto de datos de la señal. En particular, el análisis del periodo cardíaco, el intervalo RR (la separación entre dos puntos máximos del tradicional ECG, ver figura 1), que no es realmente constante, ha demostrado proporcionar información suficiente para identificar personas sanas y personas con algunas disfunciones cardíacas. Es por ello que el software científico está enfocado al estudio de señales cardíacas siguiendo esta metodología de trabajar con menos datos. Los modelos matemáticos / físicos en que se fundamentan los algoritmos descritos en este trabajo (con excepción del que identifica los máximos de la señal cardíaca) se han publicado en revistas especializadas [2,3].

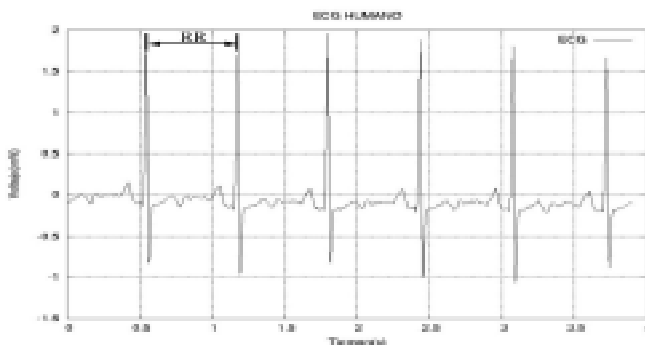


Figura 1. Se muestra un ECG tradicional de un humano sano. Obsérvese la naturaleza cuasi periódica (que no se repite exactamente) de la señal.

Estructura del software científico

A continuación se describe el software científico así como las herramientas utilizadas para realizarlo. El software inicia con una ventana de presentación, realizada en lenguaje shell (ver apéndice, figura 2), a partir de la cual se ejecuta un programa escrito en lenguaje de Octave que solicita el nombre del directorio a donde se encuentran los archivos por analizar (figura 3), no hay más límite en el número de archivos que el espacio en disco. También se le pide al usuario que escriba una etiqueta para el directorio en el cual escribir los resultados de los cálculos. A continuación se despliega

* Profesor - investigador de tiempo completo en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Carmen.

un menú con las diversas opciones de análisis de las señales cardíacas (figura 3). Después de elegir la opción de análisis deseada se ejecutan los respectivos programas en Octave con parámetros solicitados con tal fin, para cada uno de los archivos de la carpeta elegida. Las funciones que realiza el software son mostradas de manera esquemática en la figura 3.

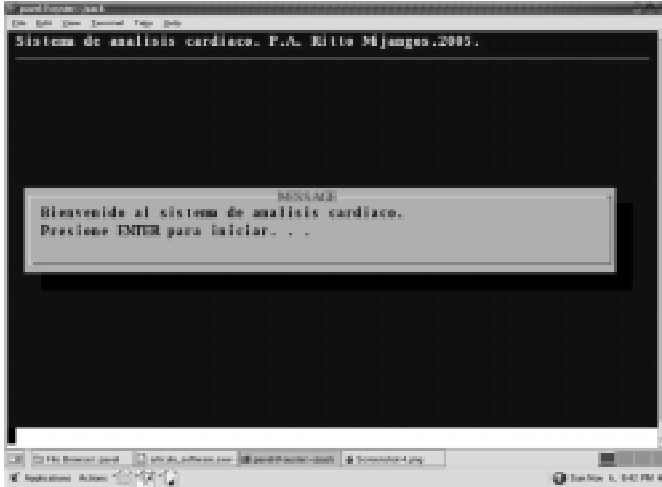


Figura 2. Se muestra la ventana de presentación para entrar al sistema. Esta se realiza en lenguaje shell.

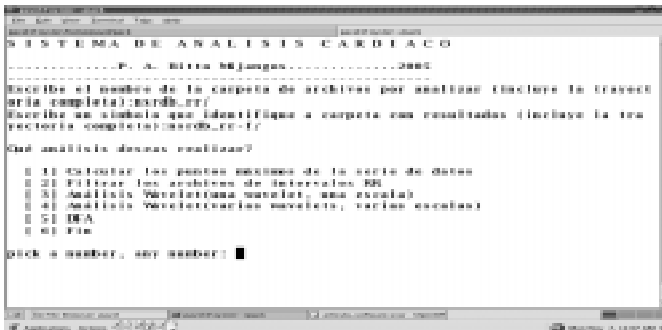


Figura 3. Se muestra el menú de opciones para realizar análisis de los datos cardíacos.



Figura 4. Esquema que muestra el procedimiento a seguir en el uso del software. Son dos los análisis de señales cardíacas que se presenta, el fractal y el de multiescalas.

Los algoritmos implementados en el software tienen las siguientes funciones (ver figuras 3 y 4)

- 1) Encontrar los picos de señales cardíacas. En humanos estos puntos se etiquetan como puntos R (ver figura 1). Este análisis se realiza mediante división de la señal en ventanas de igual ancho, semejante a como se muestra

la figura 1 (en este caso el ancho de la ventana es 0.5 s), a partir de los cuales se encuentra los valores máximos locales de la señal. Existen muchos métodos populares para realizar este análisis [1,4], sin embargo, el algoritmo que se eligió no está diseñado exclusivamente para el ECG tradicional [8], por lo que permite usarlo en señales cardíacas de otra naturaleza.

- 2) Filtrar archivos de datos que contenga los intervalos entre picos RR. Esto se realiza de acuerdo al método presentado en [13]. Este consiste en elegir un número de datos vecinos a cada punto y calcular el promedio. Después se aplica una regla de selección para obtener un valor acotado, estadísticamente confiable.
- 3) Realizar un análisis de multiescalamiento. Consiste en combinar la Transformada de Hilbert y la Transformada Wavelet sobre las series temporales de intervalos RR para extraer información no lineal imposible de obtener con otros métodos tradicionales como Fourier [3,14]. Solo se utiliza una función wavelet y una escala para el cálculo. Cada histograma es ajustado numéricamente a una distribución gaussiana. Por su simplicidad, se elige realizar el ajuste numérico desde Gnuplot. En la figura 5, se muestra un resultado típico del método aquí descrito, en el cual se aprecia que la distribución de las cinco señales cardíacas de humanos sanos, es la misma estadísticamente. Con el método de multiescalamiento ha sido posible discernir entre señales provenientes de humanos sanos y de personas que sufren *apnea del sueño* [3] (en este caso patológico las distribuciones difieren sobremanera). Al aplicar esta técnica al latido cardíaco del ostión de la especie *Crassostrea virginica* (bivalvo marino nativo de la Laguna de Términos), se ha encontrado un comportamiento estadístico semejante al de los humanos [8].

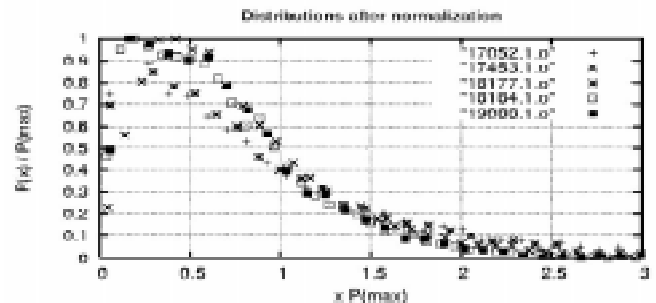


Figura 5. Se muestra la distribución de 5 archivos de datos cardíacos de personas sanas, después del análisis Hilbert-Wavelet. Como se aprecia, las distribuciones son muy parecidas.

- 4) Lo mismo que 3) pero con un conjunto selecto de funciones wavelet y un número de escalas de observación de la señal. Para cada wavelet y para cada escala se crean automáticamente subcarpetas para contener los resultados. Como la cantidad de archivos, wavelets y escalas puede ser considerablemente grande, los histogramas finales no se grafican, sino que las gráficas se crean automáticamente mediante un *script*, que se activa con el doble clic del ratón.

5) Realiza el Detrended Fluctuation Analysis (DFA) para identificar la fractalidad de las señales de intervalos RR. La fractalidad se entiende como la invarianza de las propiedades estadísticas o espaciales, ante el cambio de escala de estudio; no importa si los datos o el objeto se analiza "de cerca o de lejos". Para este análisis se requiere realizar un ajuste numérico local (en cada ventana de observación de los datos) con un polinomio (comúnmente de grado menor que 4), el cual se realiza desde Octave. El método DFA es relevante en el estudio del latido cardíaco pues ha permitido encontrar diferencias en cuanto al grado de fractalidad entre personas sanas y personas con disfunción ventricular [2] o bien, entre personas jóvenes y ancianas [14]. En la figura 6, se muestra un resultado típico del DFA, la pendiente de la recta ajustada a los datos proporciona el índice de fractalidad *alfa*. En humanos sanos jóvenes es aproximadamente 1, mientras que en casos de disfunciones cardíacas o longevidad el índice de fractalidad es distinto de 1. Así mismo, se ha encontrado que el índice de fractalidad del latido cardíaco del molusco *C. virginica* es cercano a 1 [8].

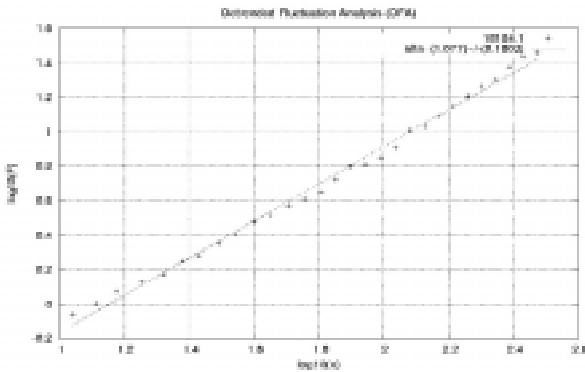


Figura 6. Se muestra el resultado del análisis fractal DFA para el latido cardíaco de una persona sana. La pendiente de la recta de ajuste numérico corresponde al índice de fractalidad *alfa*. Nótese que el valor de *alfa* obtenido numéricamente es cercano a 1.

Con excepción de 1) y 2), que son orientados a señales cardíacas, los algoritmos 3) y 5) pueden emplearse para encontrar características no lineales o fractales en otros sistemas que presenten fluctuación en alguna de sus variables; DFA se ha aplicado desde la década pasada en sistemas, aparentemente tan distintos, como puede ser la secuencia genética del DNA o el clima [15].

Conclusiones

Se ha presentado una herramienta de cómputo muy práctica basada en la plataforma Linux para el análisis de señales cardíacas. Los análisis que se pueden realizar con el software son de utilidad en el estudio de señales cardíacas en general. Se ha comentado la importancia que tienen los algoritmos que incluye para discernir distintos estados fisiológicos pero que también se han aplicado exitosamente en otros sistemas. El software presentado puede fácilmente ser extendido para incorporar otros algoritmos para el análisis de señales cardíacas, ya sea elaborados en Octave, Gnuplot, C, Fortran o en alguna otra herramienta de cálculo científico.

Agradecimientos

Se agradece al Promep y al Conacyt, proyecto Sep-2003-C02-45007, por el apoyo económico parcial para realizar este trabajo. Asimismo, se agradece a J. G. Contreras, por su participación en la etapa inicial del desarrollo del software.

Fuentes de información

¹WALDEN, Chris, "Windows to Linux roadmap, Part 1: Thinking in Linux: Differences and similarities", [Página internet: <http://www.opensourceforu.com/tutorials/Server-Side-Coding/Administration/thinking-in-linux/page1.html>], 2004; PÉREZ, Alejandro, "Windows vs. Linux, Mitos y Realidades", [Página internet: <http://www.microsoft.com/spanish/msdn/comunidad/mj.net/voices/art184.asp>], 2005; "Why Linux is a Better Choice than Windows", NOVELL, [Página internet: http://www.novell.com/linux/truth/better_choice.html?tab=copright], 2005; "The GNU operating system", [Página internet: <http://www.gnu.org/>], 2005.
²PENG, C.K., HAVLIN, S., STANLEY, H.E., and GOLDBERGER, A.L., "Quantification of scaling exponents and crossover phenomena in nonstationary heartbeat time series", *Chaos*, 5, 1995, pp. 82-87.
³IVANOV, P. Ch., ROSENBLUM, M.G., PENG, C.K., MIETUS, J., HAVLIN, S., STANLEY, H.E., and GOLDBERGER, A.L., "Scaling behaviour, of heartbeat intervals obtained by wavelet-based time-series analysis", *Nature*, 383, 1996, pp. 323-327.
⁴Physionet: Research, Resource for Complex Physiologic Signals", [Página internet: <http://www.physionet.org/>], 2005.
⁵The MathWorks – Matlab - The Language of Technical Computing", [Página internet: <http://www.mathworks.com/products/matlab/>], 2005.
⁶Octave Home Page", [Página internet: <http://www.octave.org/>], 1998.
⁷Red Hat: The Open Source Leader", [Página internet: <http://www.redhat.com/>], 2005.
⁸RITTO, P.A., ALVARADO, J.J., CONTRERAS, J.G., "Scaling and wavelet-based analyses of the long-term heart rate variability of the Eastern Oyster", *Physica A*, 349, 2005, pp. 292-301; SOMERVILLE, B.A., "The circulatory physiology of *Helix pomatia*", *J. Exp. Biol.*, 59, 1973, pp. 275-282; AKIYAMA, R., MATSUHISA, A., PEARSON, J.T. and TAZAWA, H., "Long term measurement of heart rate in chicken eggs", *Comp. Biochem. and Physiol. A*, 124, 1999, pp. 483-490; DIERINGER, N., KOESTER, J., and WEISS, K.R., "Adaptive changes in heart rate of *Aplysia californica*", *J. Comp. Physiol.*, 123, 1978, pp.01-21.
⁹GOLDBERGER, A.L., AMARAL, L.A.N., GLASS, L., HAUSDORFF, J.M., IVANOV, P.Ch., MARK, R.G., MIETUS, J.E., MOODY, G.B., PENG, C.K., and STANLEY, H.E., "Physiobank, Physiobank, and Physionet: Components of a New Research Resource for complex Physiologic signals", *Circulation*, 101 (23), 2000, pp. e215-e220 [Circulation Electronic Pages; <http://circ.ahajournals.org/cgi/content/full/101/23/e215>].
¹⁰GITE, Vivek, "Linux Shell Scripting Tutorial v1.05r3: A Beginners Handbook", [Página internet: <http://www.freeos.com/guides/lsst/>], 2002.
¹¹Gnuplot Home Page", [Página internet: <http://www.gnuplot.info/>], 2005.
¹²GNU macroprocessor, GNU m4, versión 1.4: A powerful macro processor", [Página internet: http://www.linuxselfhelp.com/gnu/m4/html_chapter/m4_toc.html], 1994.
¹³HO, K.K.L., MOODY, G., PENG, C.K., MIETUS, J., LARSON, M.G., LEVY, D., GOLDBERGER, A.L., "Predicting survival in heart failure case and control subjects by use of fully automated methods for deriving nonlinear and conventional indices of heart rate dynamics", *Circulation*, 96, 2000, pp. 842-848.
¹⁴HAVLIN, S., BULDYREV, S.V., BUNDE, A., GOLDBERGER, A.L., IVANOV, P. Ch., PENG, C. K., STANLEY, H.E., "Scaling in nature: From DNA through heartbeats to weather", *Physica A*, 273, 1999, pp. 46-69.
¹⁵INYEGAR, N.A., PENG, C.K., MORIN, R., GOLDBERGER, A.L., LIPSITZ, L.A., "Age-related alterations in the fractal scaling of cardiac interbeat interval dynamics", *Am. J. Physiol*, 271, 1996, pp. 1078-1084; PENG, C. K., HAUSDORFF, J.M., GOLDBERGER, A.L., "Fractal mechanisms in neural control: Human heartbeat and gait dynamics in health and disease", *Self-Organized Biological Dynamics and Nonlinear Control*, WALLECZEC, J. ed., Cambridge, Cambridge university press, 2000. [Páginas internet: <http://reylab.bidmc.harvard.edu/tutorial/DFA/master.html>, <http://www.physionet.org/tutorials/fmnc/>].

Apéndice

Herramientas de Linux

El software científico utiliza diversos paquetes científicos de Linux. Un paquete en Linux es un conjunto de algoritmos orientados a realizar una tarea específica. Para realizar el software científico, se emplearon los siguientes paquetes que usualmente están incluidos en las últimas versiones de Red Hat Fedora.

Bash (Bourne Again Shell) [10]: Es un intérprete de comandos, similar al MS-DOS de windows, a través del cual se interactúa con todo el sistema operativo Linux.

Gnuplot [11]: Es una utilidad basada en comandos, principalmente para graficar, aunque también se pueden realizar algunos análisis numéricos básicos.

m4 [12]: Es un macro procesador lógico de textos. Sirve para modificar o sustituir caracteres presentes en un archivo, sin tener que editarlo manualmente.

Octave [6]: Es un lenguaje de alto nivel para análisis numérico. Proporciona una línea de comandos mediante la cual se ejecutan comandos al estilo de Matlab. De hecho, Octave es altamente compatible con las funciones básicas / programación de Matlab. En el aspecto gráfico, Octave no es tan amigable como Matlab, pero en algunas tareas, puede ofrecer más flexibilidad para trabajar gráficos sin emplear tanta memoria.

Lo destacable de estos cuatro paquetes es que pueden interactuar entre sí recibiendo o proporcionando información / datos de manera sencilla, por ejemplo

Interacción Octave-Shell: Existe en Octave el comando `system` con el que se pueden ejecutar comandos del ambiente shell desde la línea de comandos `>> system('comando shell')`

Interacción Shell-Octave: Los programas en Octave también tienen terminación 'm' como en Matlab y se ejecutan desde el ambiente shell como sigue `>> octave file.m`

Un conjunto de instrucciones o comandos shell, se pueden reunir en un solo programa ejecutable, comúnmente conocido como `script`, con terminación 'sh'.

Interacción Gnuplot-Shell: Se realiza de manera parecida a Octave con el comando `system`

`>> system 'comando shell ' o bien >> !comando shell`

Interacción Shell-gnuplot: Los programas en Gnuplot tienen la terminación 'gnu' y se ejecutan desde el ambiente shell en la siguiente forma `>> gnuplot file.gnu`

Esta forma de interactuar se puede realizar a nuestra voluntad, sin encontrar trabas, como pudiera ser el toparse con archivos ejecutables con código oculto. Linux, es un sistema operativo de código abierto, lo que significa que el sistema operativo puede ser modificado como uno desee. Aquí radica su gran flexibilidad y poder.