

Sistema de adquisición y control de señales biomédicas basado en un núcleo con licencia GPL: aplicación al estudio de un sistema farmacocinético mediante conductimetría

M.A. Toro Ruiz¹, S. Navas-Inocencio¹, M. Prado-Velasco^{1*}, M. Valera-MacKay²

¹Grupo de Modelado Multiescala y Tecnologías Emergentes en Bioingeniería, Universidad de Sevilla, Sevilla, Spain

(Corresponding author * mpradovelasco@ieee.org)

² Grupo de Farmacocinética de la Insuficiencia Renal, Universidad de Sevilla, Sevilla, Spain

Resumen

Los sistemas de control y adquisición de señales analógicas y digitales (SCADA) han evolucionado durante décadas de aplicación en los diferentes dominios de la ingeniería de procesos, control de la calidad ambiental y sistemas industriales inteligentes. Sin embargo su aplicación en el campo de la ingeniería biomédica es aún muy escasa. En este trabajo se analiza en primer lugar la convergencia de requisitos y metodologías entre los SCADAS modernos y campos de la ingeniería biomédica como la teleasistencia y los sistemas de adquisición de bioseñales para modelado y tratamiento de señales. En segundo lugar se presenta el diseño y primeros resultados de un SCADA escalable desarrollado sobre un núcleo con licencia GPL para el estudio de sistemas farmacocinéticos mediante conductimetría. Este SCADA tiene aplicaciones para la docencia en el área de farmacocinética, así como para la investigación en sistemas de diálisis.

1. Introducción

Históricamente, los SCADAS (Sistemas de Control y Adquisición de Señales Digitales y Analógicas) surgieron a partir de la necesidad de obtener información de campo y centralizar el acceso a ella desde un lugar distinto. Estos sistemas permitían la monitorización de las variables generadas por los sensores de campo a distancia. Los componentes principales de un SCADA son (a) un conjunto de sensores, (b) estaciones remotas ("Remote Terminal Units" o RTU) que contienen los sensores y envían la información, (c) una red de transmisión de datos, (d) una estación maestra de control ("Master Terminal Unit" o MTU) y (e) una aplicación o conjunto de aplicaciones que monitoriza y controla remotamente los dispositivos de RTU y MTU y que además implementan una interfaz Hombre-Máquina ("Human Machine Interface" o HMI) [1].

La monitorización de señales biomédicas es un aspecto clave en los sistemas de teleasistencia. El procesado de datos de tipo médico debe poseer una serie de características que permitan la generación de conocimiento personalizado del sujeto asistido. Las nuevas herramientas terapéuticas y diagnósticas en el campo de medicina están provocando un incremento del flujo de datos que los sistemas TIC tienen que soportar. Esta evolución está provocando una convergencia, en las tareas de captura y gestión en tiempo real de señales,

entre los sistemas de teleasistencia y los modernos SCADAS [2,3].

Otra característica de los SCADAS que ha evolucionado en los últimos años es el soporte sobre sistemas de software libre [4]. El software libre permite ser usado, copiado, estudiado, modificado y redistribuido libremente. Dentro de este tipo de software, existen varios subtipos, entre el que destaca el software GPL. Este tipo de licencia de software permite la distribución y modificación bajo ciertos términos que aseguran que todas las versiones modificadas del software permanecen bajo la propia licencia GPL.

El objetivo del proyecto presentado ha consistido en el desarrollo de un SCADA basado en un núcleo GPL orientado inicialmente, y en una primera versión, a la adquisición y análisis de señales de conductimetría para la monitorización de electrolitos en sistemas farmacocinéticos.

Las principales aplicaciones del sistema desarrollado se encuadran en el campo de la docencia en farmacocinética y en el estudio de sistemas de diálisis in-vitro. El trabajo aquí presentado se centra en los aspectos tecnológicos e ingenieriles de un proyecto más amplio, mostrando algunos resultados de experimentos de farmacocinética realizados para la validación del sistema.

2. Metodología

Entre los distintos sistemas GPL base existentes para el desarrollo de un SCADA, hemos optado por utilizar Pvbrowser, el cual proporciona un navegador y una aplicación para el desarrollo del server, Pvdevelop (<http://pvbrowser.org>).

Pvbrowser sigue la filosofía de una aplicación Web, utilizando un modelo de arquitectura cliente/servidor de segunda generación. En esta arquitectura, el servidor es un proveedor de servicios y el cliente un consumidor. Ambos interactúan a través de un mecanismo de paso de mensajes.

Los requisitos mínimos un navegador Pvbrowser (300 MHz CPU, 128 Mbyte RAM, 40 Mbyte HD) son una importante ventaja en otras aplicaciones de esta metodología.

El navegador Pvbrowser para la visualización de los procesos desde los distintos clientes está escrito en C++ y optimizado para los procesos de visualización. Pvbrowser utiliza llamadas POSIX y maneja widgets (elementos de la interfaz gráfica de usuario o GUI, que muestran información configurable) proporcionados por Qt de forma dinámica en vez de ficheros HTML. Pvbrowser es capaz de mostrar casi todos los widgets estándares de Qt (labels, buttons, editfields, comboboxes...) y otros widgets para visualizar imágenes bitmap, gráficos x-y además de gráficos SVG, OpenGL y VTK.

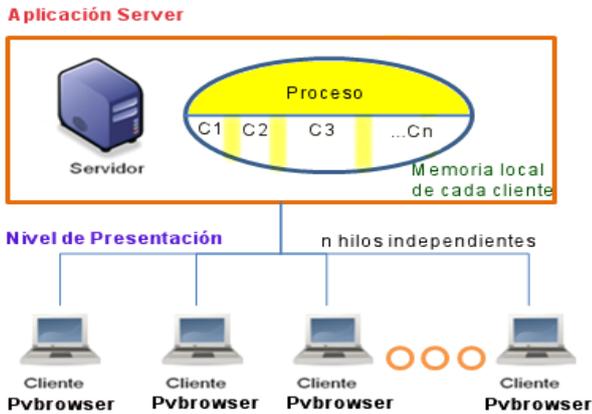


Figura 1. Arquitectura Multihilo C/S

Pvbrowser puede funcionar como una aplicación autónoma o como un Kpart (componente de escritorio KDE de sistemas Linux/Unix) del navegador Konqueror. La conexión TCP con el server se mantiene mientras se mantenga sesión con el server, con el cual intercambia comandos que se interpretan por las librerías de widget de Qt.

La programación del server está orientada a eventos y el lenguaje utilizado es C ANSI. El diseño de la HMI (Human Machine Interface) se realiza de forma gráfica utilizando la aplicación Pvdevelop.

Sobre este sistema base abordamos el diseño de un SCADA orientado al estudio de sistemas farmacocinéticos mediante conductimetría. Con el objetivo de permitir su fácil adaptación a diferentes escenarios, como el docente o la experimentación in-vitro, entre otras, se establecieron las características funcionales siguientes:

- **Escalabilidad:** posibilidad de incorporar nuevas sondas de medición y desarrollar nuevas funcionalidades mediante actualizaciones en el server.
- **Diferenciación de perfiles de acceso:** se han definido tres perfiles de usuario con diferentes privilegios configurables y con acceso discriminado mediante clave de acceso.
- **Arquitectura cliente/servidor:** permitiendo una centralización del control que hace más fácil el asegurar la integridad de los datos evitando que un programa cliente defectuoso o modificado pueda dañar el sistema. Esta arquitectura facilita la actualización de bases datos y las acciones de

reemplazar, actualizar o trasladar un servidor sin que los clientes se vean afectados.

- **Conexión con herramientas externas:** el tratamiento de los datos en diferentes herramientas externas (como Excel, a través de la utilización de macros para la importación automática de los datos) permite la ejecución de algoritmos matemáticos más especializados y fácilmente adaptables para cada experimento, sin necesidad de modificar el código del server.
- **Procesado de la información en tiempo real** que permita: (a) Procesar las lecturas de conductividad, obteniendo la evolución de la concentración en la disolución testada en tiempo real. (b) Fijar diferentes alarmas las cuales serán reconocidas por los clientes.
- **Gestión de archivos históricos:** se ha establecido inicialmente una base de datos basada en una estructura de archivos. Esta base de datos es gestionada por el server y los datos son visualizados por cualquiera de los clientes que posean los permisos necesarios realizando consultas remotas.
- **Independencia del S.O.:** ha sido un factor de gran importancia a la hora del diseño, asegurando la independencia del server y de los clientes, y haciendo que la migración sea prácticamente inmediata. Para garantizar esta independencia Pvbrowser solo efectúa llamadas a librerías propias (escritas en C) y llamadas POSIX al sistema.

La conversión de conductividad a concentración tiene en cuenta la temperatura y el tipo de electrolito. El proceso es realizado en dos pasos. Una conversión previa de la conductividad de la temperatura actual a la de referencia de 25 °C. Una conversión de conductividad a concentración a la temperatura de referencia.

El *conductímetro* utilizado en la parte experimental del proyecto es el modelo *EC-Meter GLP 31+* de la marca Crison (*Crison Instruments SA, Riera Principal, 34,36 E-08328 Alella (Barcelona)* <http://www.crison.es>). El conductímetro además de Conductividad Eléctrica (CE) también mide salinidad (NaCl) y sólidos totales disueltos (T.D.S.). Su electrónica está adaptada para el funcionamiento tanto de células de platino como de titanio. Actualmente la *célula* utilizada es el modelo *50 70* de la marca Crison. Es una célula de uso general que cuenta con una escala de medida CE: 0.2 $\mu\text{s/cm}$...200 ms/cm, una constante aproximada: 0,7 cm^{-1} , una escala de temperatura: -30 a 85 °C y está fabricada en vidrio y platino.

Este conductímetro posee una salida RS232 utilizada para imprimir informes en impresoras de 40 columnas térmicas o matriciales. Esta salida se ha utilizado para interpretar los informes enviados por el conductímetro a un Baud rate: 9600 bps, longitud de palabra: 8 bits y bits de stop: 2 bits, estableciendo una comunicación unidireccional a partir de la cual obtenemos los datos en tiempo real. Esto ha repercutido directamente en el tiempo mínimo de muestreo que actualmente está fijado en 5 segundos, y es el tiempo que el conductímetro tarda en enviar un informe completo.

3. Arquitectura del SCADA para farmacocinética

El SCADA está compuesto por el server conectado a la base de datos y al mundo real a través del conductímetro. En el server se ejecuta el programa principal y los hilos asociados a los clientes que visualizan el proceso.

El server gestiona los distintos perfiles de acceso de los clientes y el acceso a la base de datos por parte de los mismos. Tiene una estructura multi-hilo. Uno de los hilos está continuamente ejecutando un bucle a la espera de nuevos clientes y cuando los detecta genera automáticamente un nuevo hilo independiente para ese nuevo cliente. El SCADA desarrollado presenta la siguiente estructura:

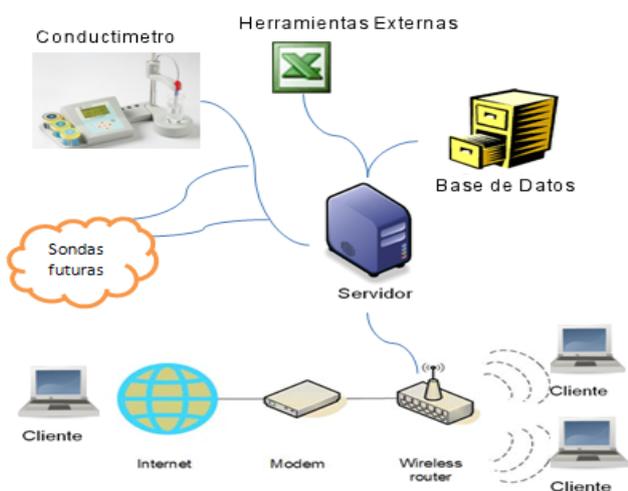


Figura 2. Esquema físico del SCADA

Inicialmente el server espera la entrada del cliente *máster*, acto seguido se permite la conexión de clientes con perfil *administrador* o *usuario*.



Figura 3. Esquema de aceptación de clientes.

Existen 3 tipos de clientes, cada uno con distintos privilegios:

- **Cliente *máster*:** Gestiona la comunicación con el conductímetro, y es quien decide que configuración cargar (rangos, electrolitos) para la conversión conductividad - concentración, actualiza la memoria global del proceso en la cual se especificarán los parámetros de configuración de las alarmas y el acumulado de todas las lecturas de conductividad, temperatura, así como el cálculo de la concentración

realizada en el experimento actual. A ella tienen acceso el resto de clientes. El cliente *máster* es el único que puede actualizar la base de datos de históricos añadiendo nuevos experimentos a la misma.

- **Cliente *Administrador*:** Lee de la memoria global del proceso la configuración, y los valores actualizados por el cliente *máster*. Tiene la posibilidad de utilizar los valores de concentración calculados a partir de la configuración cargada por el *máster*, o cargar una diferente en su memoria local y realizar los cálculos él mismo. Puede reconocer las alarmas que ocurran desactivando los testigos de aviso. Tiene acceso a la base de datos pudiendo realizar consultas remotas para visualizar experimentos anteriores.
- **Cliente *Usuario*:** El cliente usuario (simple) solo puede visualizar la evolución del experimento. Eligiendo que variable o variables mostrar en pantalla (conductividad, temperatura o concentración). No se le está permitido reconocer alarmas o acceder a la base de datos de históricos, y utiliza los cálculos de concentración realizados por el cliente *máster*.

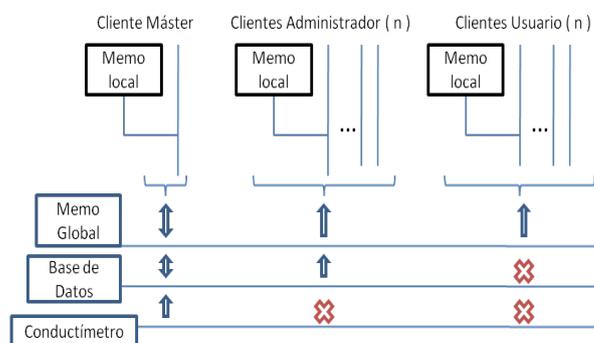


Figura 4. Esquema organización de los clientes.

La gestión de las alarmas, su activación, reconocimiento por cualquiera de los clientes habilitados a tal efecto y desactivación de las mismas se han diseñado como se esquematiza en el siguiente grafo:

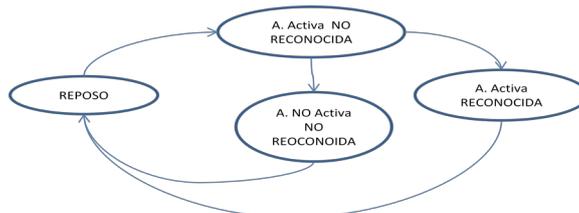


Figura 5. Grafo de la evolución de las alarmas

Todos los clientes están habilitados para comunicarse entre ellos haciendo uso de un chat interno, en el que se pueden ir describiendo todos los sucesos ocurridos durante el experimento.

4. Resultados

Con el objeto de validar el funcionamiento del SCADA desarrollado se han realizado varios experimentos de monitorización de un sistema farmacocinético de un solo pool bajo diferentes modelos: administración de bolos múltiples, perfusión a velocidad constante, y extravasales, mediante el dispositivo experimental que se muestra en las figuras 6 (esquema) y 7 (fotografía). Todos los

experimentos concordaron con los resultados teóricos esperados.

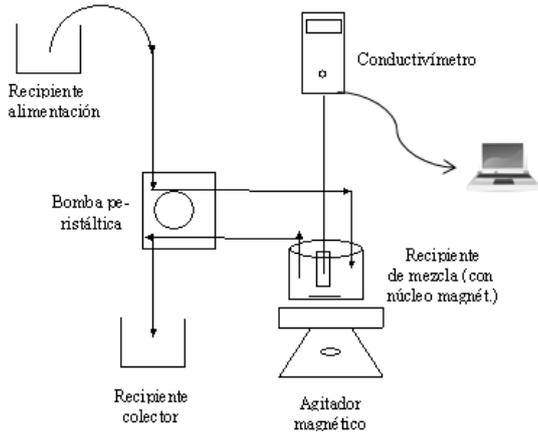


Figura 6. Esquema del dispositivo experimental

Se indican los principales datos y varias curvas capturadas en uno de los experimentos de bolos múltiples. En este se utilizaron 17 bolos de 74,5 mg (1 mEq) de KCl añadidos secuencialmente con un tiempo entre dosis (τ) igual a la mitad de la semivida ($t_{1/2}$). El flujo de la bomba peristáltica se reguló para obtener una semivida del electrolito de 38 segundos.



Figura 7. Sistema en funcionamiento

La evolución de la concentración de KCl fue monitorizada en tiempo real con el SCADA desarrollado, comprobando que la dinámica era la esperada. La figura 8 muestra una de las pantallas del SCADA con la evolución del citado experimento. La primera curva de la Fig. 8 muestra como el estacionario se consigue aproximadamente a los 10 bolos (5 $t_{1/2}$), de acuerdo a las predicciones teóricas.

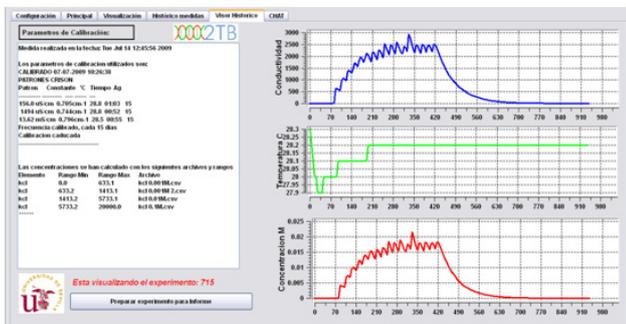


Figura 8. Visualización del experimento citado

5. Discusión y conclusiones

Presentamos una primera versión de un SCADA para señales biomédicas, orientado inicialmente al campo

farmacocinético. Ha demostrado su fiabilidad en la adquisición y tratamiento en tiempo real de temperaturas, conductividades y concentraciones. El sistema gestiona alarmas y avisos, y permite ejecutar cálculos en tiempo real, como el área bajo la curva (AUC). También incorpora mecanismos de exportación automática a Excel, y un subsistema de comunicación entre usuarios tipo chat.

De acuerdo con nuestro conocimiento, es el primer SCADA open-source de estas características disponible en área de farmacocinética. Es difícil comparar con sistemas de adquisición en el área de e-salud al existir pocos enfoques orientados a SCADA. Uno de los escasos ejemplos fue presentado en [5]. Pese a ello, la convergencia entre sistemas de teleasistencia y SCADAs ha sido ya analizada por algunos de los autores [3].

Se está trabajando en el diseño de una versión evolucionada que elimine la limitación actual a 5 s del tiempo de muestreo, siempre que el sistema sensor lo permita. Para simplificar la incorporación de nuevos biosensores al sistema se establecerán interfaces independientes para la adquisición de datos, y se utilizarán de mecanismos de *shared memory* y *mailbox* para la comunicación con estas interfaces de adquisición de datos. Un último aspecto que está teniéndose en cuenta en la futura versión es el diseño de un gestor de base de datos que combine la riqueza de los gestores objeto-relacionales con la velocidad de los modelos empleados en SCADAs industriales [2,3].

Finalmente, las características multi-servidor de Pvbrowser serán utilizadas para definir una nueva arquitectura open-source basada en Web-SCADAs que permita evolucionar el concepto de teleasistencia basada en modelos personalizados multinivel [6].

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el proyecto nacional PDI 1660/2007, del Plan de Renovación de las Metodologías Docentes, Universidad de Sevilla.

Referencias

- [1] D. J. Gaushell and H. T. Darlington, "Supervisory Control and Data Acquisition," Proceedings of the IEEE, vol. 75, pp. 1645-1663, 1987.
- [2] F. Fernández, L. M. Roa, and M. Prado, "Functional and Technological Description of a Real-Time Data Management System for Telehealthcare," in Medical and Care Compunetics 5, Londres, IOS Pres, 2008, pp. 107-115.
- [3] M. Prado, L. M. Roa, and J. Reina-Tosina, "Methodological issues for the information model of a knowledge-based telehealthcare system for nephrology (Nefrotel)," in Medical and Care Compunetics 3: IOS Pres, 2006, pp. 96-107.
- [4] S. A. Faus and W. Sujansky, "Open-Source EHR Systems for Ambulatory Care: A Market Assessment," California Healthcare Foundation, 2008.
- [5] J. K. Pollard, C. Santarelli, A. Theodorou, N. Mohoboob, and M. E. Fry, "Wireless and Web-based Medical Monitoring in the Home," in MedNet2001, 2001.
- [6] Prado, M., Roa, L. M., Reina-Tosina, J., "Viability study of a personalized and adaptive knowledge-generation telehealthcare system for nephrology (NEFROTEL)". Int. J. Med Inf., 75(9), 646-657, 2006.