

# Diseño y construcción de un analizador de electrolitos en bebidas hidratantes y fluidos corporales

Jaime Zapata, Nelson Sotomayor

Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Escuela Politécnica Nacional, Quito - Ecuador

**Resumen** – El objetivo del proyecto es el diseño y construcción de un equipo analizador de electrolitos, el cual se emplea para el análisis de muestras de sangre y fluidos corporales, determinando la cantidad de sodio ( $\text{Na}^+$ ), potasio ( $\text{K}^+$ ), y cloro ( $\text{Cl}^-$ ) presente.

El control se basa en la metodología de ion selectivo. Se emplean electrodos de sodio, potasio, cloro y un electrodo de referencia para llevar a cabo las mediciones de los electrolitos y se utiliza el microcontrolador Atmega 2560 para desarrollar el sistema de control.

Una vez construido e instalado el equipo, se comprueba su funcionamiento siguiendo un protocolo de reproducibilidad EP5-T2 del NCCLS, y se verifica los resultados empleando muestras estandarizadas utilizadas como controles de calidad.

## I. INTRODUCCIÓN

El sector médico ha encontrado en la industria electrónica un apoyo indispensable para perfeccionar sus técnicas de soporte tanto de carácter preventivo como post operatorio.

Un electrolito es una sustancia que al disolverse en agua, da lugar a la formación de iones. Los electrolitos pueden ser débiles o fuertes, según estén parcial o totalmente ionizados o disociados en un medio acuoso [1].

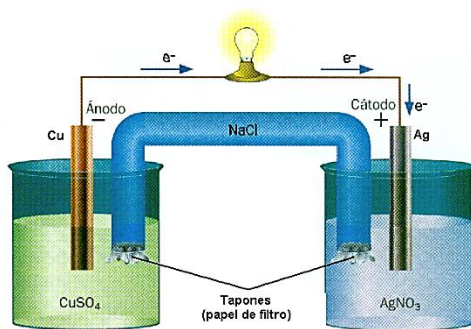


Fig. 1. Proceso de Ionización, tomado de [2]

Los electrolitos son minerales presentes en la sangre y otros líquidos corporales que lleven una carga eléctrica, pueden ser ácidos, bases y sales. Estos afectan la cantidad de agua en el cuerpo, la acidez de la sangre (pH), la

actividad muscular, y otros procesos importantes como mantener el equilibrio de los fluidos en las células para que éstas funcionen correctamente [3].

Para realizar la medición de concentración de un ion determinado en un electrolito, se emplea electrodos de ion selectivo. El proceso se basa en medir la diferencia de potencial causada por el contacto del electrodo con el ion a analizar, respecto del electrodo de referencia, el cual se encuentra con una solución estándar. Estos electrodos poseen una membrana que sólo responde al contacto con un determinado ion disuelto en la solución, no es posible determinar más de un ion con el mismo electrodo, y la diferencia de potencial generada a cada lado de la membrana permite determinar la concentración molar de un sólo electrolito con cada electrodo que se utiliza [4].

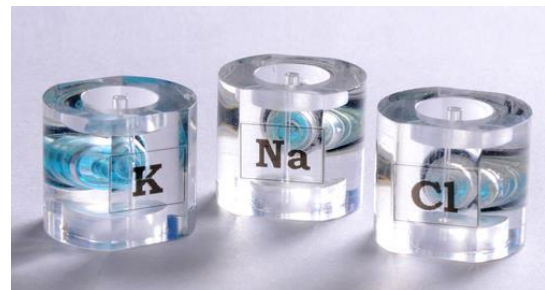


Fig. 2. Electrodos de sodio, potasio y cloro, tomado de [5]

El electrodo de ion selectivo debe estar inmerso en la solución acuosa que contiene el ion que se desea medir, y en la misma solución estará también inmerso el electrodo de referencia. Cuando el ion a medir atraviesa la membrana del electrodo de ion selectivo, debido al gradiente de concentración se genera una diferencia de potencial, la cual es proporcional a la concentración molar del ion, es decir, a mayor diferencia de potencial, mayor es la concentración del ion en la solución y tanto la concentración molar como la diferencia de potencial generada se relacionan mediante la Ecuación de Nernst [6].

La ecuación de Nernst se aplica cuando las condiciones de concentración y presión no son las estándar (1M, 1atm y 298K), expresa la relación cuantitativa entre el potencial de reducción estándar de un par redox (ácido-base)

determinado, su potencial observado y la proporción de concentración molar entre el donador de electrones y el aceptor.

La ecuación de Nernst, se presenta a continuación:

$$E = E^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{[C]}{[A]} \quad (1)$$

Dónde:

$E^0$  = Potencial normal de electrodo

R = Constante universal de los gases = 8,314 J / K x mol

T = Temperatura absoluta

n = Número de electrones que participan en la reacción

F = Constante de Faraday = 96493 coulomb

[C] = número de moles de la muestra aceptor

[A] = número de moles de la muestra donador

## II. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO

### A. Motor a pasos lineal

Para controlar el desplazamiento de la aguja de succión es necesario implementar un mecanismo de desplazamiento lineal. Para lograr este objetivo se utiliza un motor de pasos lineal, el cual permite tener un control preciso de posición, y para su control se utiliza un manejador de motores L293D.

El motor a pasos Haydon es un actuador lineal implementado para controlar el desplazamiento vertical de la aguja de succión, este motor tiene acoplado un tornillo sin fin que tiene una longitud de 152 mm.



Fig. 3. Motor a pasos lineal Haydon

Para controlar este tipo de motores se hace uso del circuito integrado L293D que es un elemento que posee cuatro circuitos para manejar cargas de media potencia, en especial motores y cargas inductivas, con capacidad de manejar corrientes hasta 600 mA en cada circuito y una tensión entre 4,5 V a 36V.

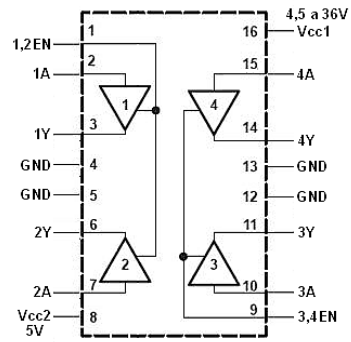


Fig. 4. Diagrama de pines del L293D, tomado de [7]

Las salidas tienen un diseño que permite el manejo directo de cargas inductivas tales como relés, solenoides, motores de corriente continua y motores a pasos, ya que incorpora internamente diodos de protección para contracorriente para cargas inductivas.

Las entradas son compatibles con niveles lógicos TTL. Para lograr un manejo de cargas con niveles diferentes a lógica TTL, el circuito integrado posee pines de alimentación separadas para la parte de control (Vcc2) y para la alimentación a la parte de potencia (Vcc1).

### B. Opto switch

Para obtener un correcto posicionamiento del motor a pasos, se implementa un mecanismo para encontrar una referencia. Para esto se utiliza una pieza a base de aluminio que tiene un orificio, con la finalidad de colocar dentro un opto transistor y emitir una señal cada vez que se detecte la presencia del orificio, de esta manera se puede garantizar tener siempre una posición de referencia para empezar a realizar los demás desplazamientos.

El opto switch es un elemento que posee internamente un diodo emisor de luz (LED) y un diodo receptor con un buffer amplificador de corriente para disparar a un transistor. La ventaja que tiene es que posee una ranura lo suficiente amplia para que se pueda insertar la placa de aluminio que contiene el orificio, además de que maneja niveles TTL de voltaje.



Fig. 5. Opto switch

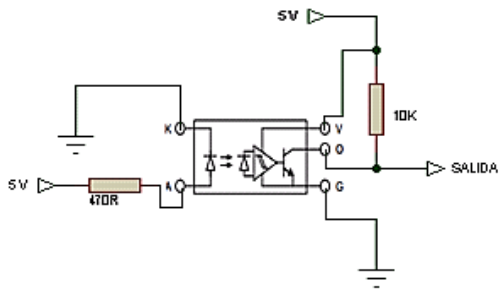


Fig. 6. Acondicionamiento del opto switch

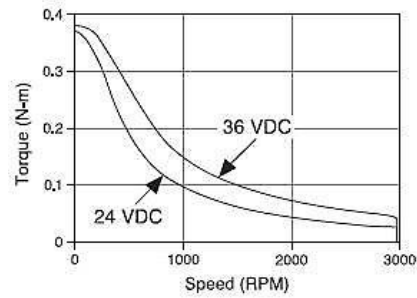


Fig.9. Torque vs Velocidad, tomado de [9]

### C. Bomba peristáltica

Una bomba peristáltica es un tipo de bomba hidráulica de desplazamiento positivo, es decir que consiste en el movimiento del fluido causado por la disminución de volumen de una cámara. El fluido es contenido dentro de un tubo flexible empotrado dentro de una cubierta circular de la bomba y un rotor unido a la circunferencia externa que comprime el tubo flexible. Mientras el rotor gira, la parte del tubo bajo compresión se cierra forzando a que el fluido sea bombeado para moverse a través del tubo. Adicionalmente, mientras el tubo se vuelve a abrir a su estado natural, el flujo es inducido a la bomba [8].



Fig. 7. Bomba peristáltica

Para realizar el movimiento de la bomba se emplea un motor a pasos NEMA 17 de tipo bipolar. Los motores a pasos idealmente son implementados en donde se requiera un control de posición preciso debido a que por cada pulso que se aplique, éstos se moverán un ángulo definido.



Fig. 8. Motor a pasos NEMA 17, tomado de [8]

Para la selección del voltaje se utiliza una curva que recomienda el fabricante. Como se aprecia en la Fig.9 se tiene un mayor torque a una velocidad más alta cuando se alimenta al motor con un voltaje de **36 VDC**, por tal razón es el voltaje que se selecciona para controlar la bomba peristáltica.

### D. Detector de muestra

Dentro de la cámara de electrodos se tiene un elemento indispensable para el correcto funcionamiento del equipo, este es un detector de muestra comercial, el cual permite diferenciar la presencia de líquido o aire en la tubería, lo que ayuda a realizar un mejor control para manejar la bomba peristáltica además de que es posible detectar fallas en la aspiración de muestra o cuando exista demasiadas burbujas de aire en las mangueras.



Fig.10. Detector de muestra y su circuito interno

Para el acondicionamiento total del sensor detector de muestra se realizan tres etapas previas, amplificación de la señal, desacoplamiento de impedancias y acondicionamiento de la señal, debido a que la señal ingresará a un canal analógico del microcontrolador en donde se realizará el algoritmo necesario para detectar la presencia de líquido en la tubería.

### E. Centrifugado

Para analizar la cantidad de electrolitos en la sangre es necesario realizar un proceso de centrifugado previo, debido a que en el suero se tiene presente esta información. Pero hay que tener en cuenta que para que exista una correcta separación de la sangre y suero se debe alcanzar una velocidad cercana a 3300 rpm por un tiempo aproximado de seis minutos, caso contrario no se podrá completar la separación, además la velocidad no debe superar las 5000 rpm o los glóbulos rojos se pueden destruir.

Para garantizar una correcta centrifugación de la sangre se implementa un control ON/OFF en una centrífuga comercial, debido a que este equipo ya garantiza una velocidad óptima para obtener resultados favorables, por tanto lo que se realiza es controlar el tiempo que transcurrirá para que la sangre se separe correctamente del suero.



Fig.11. Centrífuga LW scientific ultra 8V

La utilización de relés es de gran utilidad en controles de tipo ON/OFF debido a la facilidad de control y las cualidades de manejo de cargas, ya que pueden maniobrar motores de carga en AC a partir de una señal de control DC.

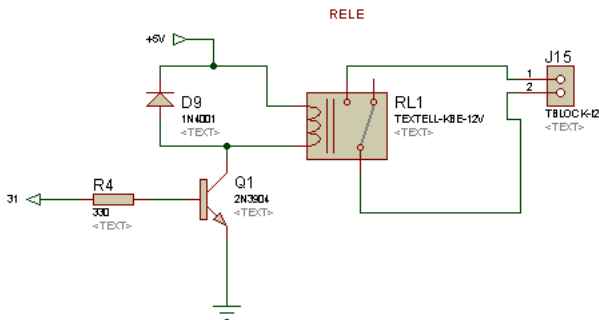


Fig.12. Accionamiento de relé para la centrífuga

requerir, entonces se tiene lo siguiente:

- 5V (Arduino, LCD, periféricos externos como pulsadores)
- +5V (Amplificadores operacionales TL084, amplificadores de instrumentación AD620)
- -5V (Amplificadores operacionales TL084, amplificadores de instrumentación AD620)
- 36V (Manejo de la bomba peristáltica)
- 12V (Manejo del motor a pasos lineal)
- 2.5V (Voltaje fijo para acondicionamiento del detector de muestra)

El transformador que se utiliza para realizar el diseño total de las fuentes de alimentación es de 3A, y tiene múltiples taps a la salida.

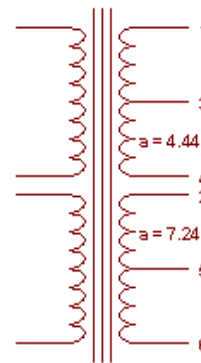


Fig.14. Esquema del transformador

### F. Arduino MEGA 2560

El control global de todo el equipo se realiza utilizando un microcontrolador ATmega 2560 que se encuentra presente en la tarjeta Arduino mega 2560, el software de programación es de descarga libre, el lenguaje de programación implementado es similar a C, y es llamado *Processing/Wiring*.

Una gran ventaja que presenta esta tarjeta es que posee un microcontrolador ATmega 8U2, lo cual permite tasas de transferencia mayores, elimina la necesidad de instalar drivers y permite que la transferencia del programa sea mediante un puerto USB, por lo que no sería necesario un programador externo, sino que ya tiene un bootloader que permite cargar nuevo código.



Fig.13. Tarjeta Arduino Mega 2560, tomado de [10]

### G. Fuentes de alimentación

Luego de haber analizado todas las funciones a realizar se puede finalmente decidir la cantidad de fuentes de alimentación a diseñar, y los niveles de voltaje que se va a

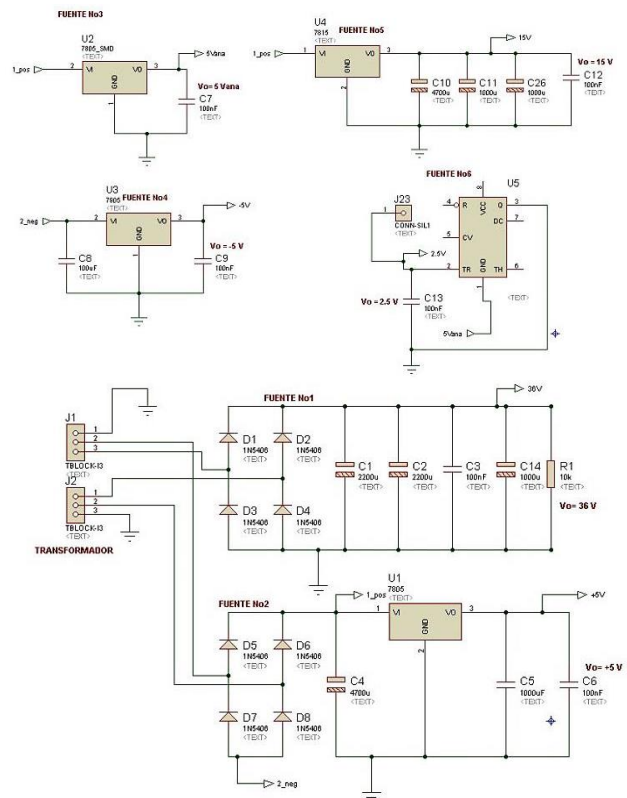


Fig.15. Diagrama de las fuentes de alimentación

III. DESARROLLO DEL SOFTWARE

Existen cinco procedimientos generales que se disponen para la aplicación: Calibración, analizar muestra, limpieza diaria, poner en reposo y purgar.

En la etapa de calibración se elaboran las pendientes de las rectas con las cuales se realizarán posteriormente las mediciones. El proceso de calibración se realiza utilizando estándares comprendidos en un paquete comercial propio para los equipos destinados a analizar electrolitos.

Se procede a determinar las pendientes necesarias partiendo de la Ecuación de Nernst:

$$\Delta E = \Delta E^0 - \frac{RT}{nF} \ln \frac{|producto|}{|reactante|} \quad (2)$$

Pero comúnmente se utiliza otra deducción de la ecuación en logaritmo base 10, y cambiando un poco la nomenclatura para entenderla de mejor manera se realizó lo siguiente:

$$E = E^0 + s \cdot \log \left( \frac{Ci(x)}{Ci(s)} \right) \quad (3)$$

Despejando la pendiente (s) de la ecuación, se tiene la siguiente expresión:

$$s = \frac{E - E^0}{\log \left( \frac{Ci(x)}{Ci(s)} \right)} \quad (4)$$

Con esta ecuación es posible determinar las pendientes para los electrodos de sodio, potasio y cloro.

En la etapa de análisis de muestra, el equipo permite una selección entre análisis de sangre o líquidos. En caso de ser líquidos diluidos o suero, el proceso no necesita preparar previamente a la muestra, pero para analizar sangre es obligatorio primeramente realizar el proceso de centrifugado ya que el análisis se lo realiza en suero, entonces al seleccionar sangre como muestra a analizar, el equipo centrifugará por seis minutos la sangre que se encontrará en tubos al vacío.

Siguiendo con el proceso de análisis, se utiliza la ecuación de Nernst para realizar las lecturas, debido a que se conoce la pendiente y es necesario determinar la concentración.

Entonces la concentración conocida o reactante  $Ci(s)$  procedente del STDB y las ecuaciones que se obtienen son las siguientes:

$$Ci(x)_{Na} = 35 \cdot 10^{\frac{E-E^0}{S_{Na}}} \quad (5)$$

$$Ci(x)_K = 41 \cdot 10^{\frac{E-E^0}{S_K}} \quad (6)$$

$$Ci(x)_{Cl} = 16 \cdot 10^{\frac{E-E^0}{S_{Cl}}} \quad (7)$$

Los valores analizados son útiles para ese instante, debido a que si el paciente ingiere alimentos o alguna bebida hidratante o realiza actividad física y nuevamente se realiza el análisis, los valores cambiarán considerablemente.

En la etapa de limpieza diaria, se limpia el camino del fluido al finalizar el día de trabajo para remover los depósitos de proteínas que se hayan formado. Para preparar la solución de limpieza es necesario agregar diluyente en la botella que contiene una enzima proteolítica. Cuando no se utilice es necesario guardarla en refrigeración a una temperatura de 2 a 8 ° C.

En la etapa de reposo, un temporizador actúa para que cada hora se realice un proceso automático de purga, es decir que aspire soluciones y lave las mangueras debido a que a pesar de que no se lo utilice, éste debe seguir aspirando soluciones para evitar que se seque los reactivos y que en las mangueras se creen sólidos, ya que las soluciones de estándares y de lavado son salinas. Una vez que se presione alguno de los pulsadores, se regresará al menú principal en donde se procederá a calibrar para empezar a trabajar con el equipo.

Cada vez que se realice un cambio de paquetes de solución, es necesario realizar un purgado de todos los estándares ya que muchas veces ingresa aire en los depósitos de solución, entonces primero se debe aspirar todo el aire para que al momento de realizar la calibración no exista problemas con la lectura.

A continuación se presenta la arquitectura del programa de control.

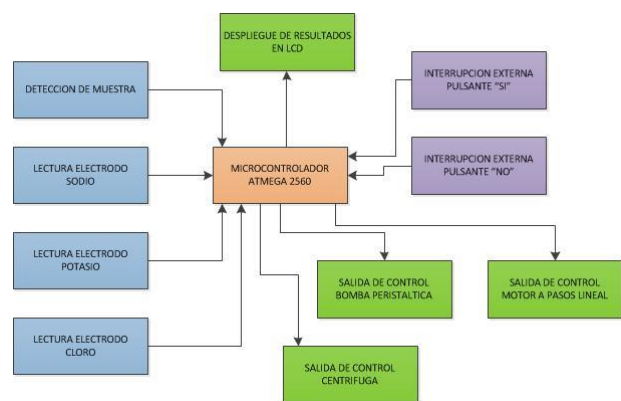


Fig.16. Arquitectura del programa de control

IV. PRUEBAS Y RESULTADOS

Las pruebas fueron corridas durante veinte días, con un lapso de separación de dos horas por cada corrida. En cada corrida se tomó datos de tres estándares de control de calidad diferentes, para determinar la confiabilidad

para lecturas de valores de concentración bajos, normales y altos de electrolitos. Cabe destacar que entre cada lectura es necesario tener un lapso de reposo de al menos cinco minutos, para asegurar que los electrodos vuelvan a su estado de reposo, de esta manera se garantiza que no exista errores en la lectura.

Todo este procedimiento es basado en el protocolo de reproducibilidad de suero EP5-T2 modificado del NCCLS.



Fig.17. Controles de calidad

Los valores obtenidos se contrastaron con los valores de los controles de calidad en los tres niveles y se obtuvieron los siguientes resultados.

Para el análisis de estándar de valores bajos se tiene los siguientes rangos permitidos:

Análisis de sodio: 115 – 127 mmol/L

Análisis de potasio: 1.9 – 2.23 mmol/L

Análisis de cloro: 78 – 92 mmol/L

El promedio de los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Análisis de sodio: 120.93 mmol/L

Análisis de potasio: 2.08 mmol/L

Análisis de cloro: 82.93 mmol/L

Para el análisis de estándar de valores medios se tiene los siguientes rangos permitidos:

Análisis de sodio: 132 – 145 mmol/L

Análisis de potasio: 3.9 – 4.57 mmol/L

Análisis de cloro: 94 – 110 mmol/L

El promedio de los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Análisis de sodio: 140.31 mmol/L

Análisis de potasio: 4.07 mmol/L

Análisis de cloro: 103.61 mmol/L

Para el análisis de estándar de valores altos se tiene los siguientes rangos permitidos:

Análisis de sodio: 155 – 171 mmol/L

Análisis de potasio: 6.26 – 7.32 mmol/L

Análisis de cloro: 112 – 131 mmol/L

El promedio de los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Análisis de sodio: 160.33 mmol/L

Análisis de potasio: 7.09 mmol/L

Análisis de cloro: 122.51 mmol/L

De las pruebas realizadas se determina las siguientes especificaciones del equipo:

Muestra : Suero sanguíneo, líquido diluido.

Cantidad de muestra: 300  $\mu$ L de Suero o líquido diluido.

Rangos de detección: Na<sup>+</sup>: 20.0 – 200.0 mmol/L  
K<sup>+</sup>: 0.2 – 40.0 mmol/L  
Cl<sup>-</sup>: 25.0 – 200.0 mmol/L

Resolución : 0.1 mmol/L

Tiempo de muestreo : Cada 5 minutos

Tiempo de análisis : 3 minutos

Tiempo de centrifugado : 6 minutos

Calibración : Automática bajo la supervisión de un operador

Detección de error : En calibración y aspiración de aire en la tubería

Reproducibilidad :  $\pm$  5% de la lectura

## V. CONCLUSIONES

- El equipo analizador de electrolitos para bebidas hidratantes y fluidos corporales se ha diseñado y construido cumpliendo los alcances establecidos.
- La metodología de ion selectivo presenta ventajas al realizar el análisis de electrolitos debido a que al reaccionar con un ion determinado permite tener lecturas de la cantidad molar presente sin ser alterada por otros electrolitos existentes en la muestra.
- Al momento de acondicionar electrodos de ion selectivo hay que tener presente que la ganancia no debe ser alta ya que el sistema se vuelve susceptible

al ruido externo.

- Para garantizar que los datos que se adquieren con los electrodos sean correctos es necesario adicionar una etapa de filtrado para altas y bajas frecuencias con la finalidad de que las interferencias externas no ingresen al microcontrolador.
- Para tener lecturas correctas es necesario tener un lapso de tiempo aproximadamente de cinco minutos entre cada corrida de muestra, debido a que los electrodos deben alcanzar el potencial de reposo para garantizar lecturas correctas.
- Al finalizar las pruebas, siguiendo el protocolo de reproducibilidad EP5-T2, se verifica la correcta reproducibilidad del equipo, lo cual garantiza que su operación sea confiable.
- Los motores de desplazamiento lineal son ideales para tener un control de posición preciso en el eje vertical, además presentan la ventaja de no necesitar acoplamiento externo, como ruedas dentadas, ya que con el tornillo sin fin que posee el motor es posible realizar los desplazamientos esperados.
- Para evitar que la corriente se incremente al momento de controlar los motores a pasos, tanto de la bomba peristáltica como del motor lineal, se desactiva el driver L293D, lo ideal es bloquear el rotor pero para la aplicación realizada no es necesario mantenerlo bloqueado ya que la carga aplicada a los motores no es significativa si se los deja en reposo.
- El tiempo para centrifugar la sangre es de seis minutos, con este tiempo se logra realizar la correcta separación del suero, además los tubos utilizados necesariamente deben ser al vacío para evitar la hemolización de la sangre.

## VI. RECOMENDACIONES

- Realizar un eficiente diseño mecánico para mejorar el desempeño de los motores, especialmente evitar que exista demasiada fricción entre componentes móviles ya que esto provoca un aumento de potencia requerida, por tanto la corriente consumida por el motor aumenta.
- Reemplazar el paquete de soluciones estándar en el momento en que exista presencia de burbujas, ya que esto ocasionará fallas en la calibración.
- Periódicamente realizar mantenimiento del equipo utilizando paquetes de mantenimiento comerciales, especialmente los electrodos y las mangueras deben ser limpiados para remover los residuos de proteínas

que se adhieren a las paredes y causan problemas en las lecturas.

- Para diseñar circuitos impresos es recomendado utilizar elementos de montaje superficial, ya que éstos reducen el espacio físico además de que evitan que el sistema sea afectado por interferencias externas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ciquime. Propiedades físicas y químicas. [Online]. Disponible: <http://www.ciquime.org.ar/files/at004.pdf>
- [2] Acabal. (2011). La pila eléctrica. [Online]. Disponible: <http://acabal44.blogspot.com/2011/02/la-pila-electrica.html>
- [3] MedlinePlus. (2011). Biblioteca Nacional de Medicina de EE.UU. [Online]. Disponible: <http://www.nlm.nih.gov/medlineplus/spanish/ency/article/002350.htm>
- [4] La guía. (2010). Electrodo ion selectivo. [Online]. Disponible: <http://quimica.laguia2000.com/enlaces-quimicos/electrodo-ion-selectivo>
- [5] Sensa Core Medical Instrumentation. (2012). Electrodes. [Online]. Disponible: <http://www.sensacore.com/electrodes.html>
- [6] La guía. (2010). Ecuación de Nernst. [Online]. Disponible: <http://quimica.laguia2000.com/ecuaciones-quimicas/ecuacion-de-nernst>
- [7] Texas Instruments. (2002). L293D Quadruple half-H drivers. [Online]. Disponible: <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/texasinstruments/l293d.pdf>
- [8] QuimiNet. (2008). Principio del funcionamiento de las bombas peristálticas. [Online]. Disponible: <http://www.quiminet.com/articulos/principio-del-funcionamiento-de-las-bombas-peristalticas-32722.htm>
- [9] National Instruments. (2012). Stepper Motors and Encoders. [Online]. Disponible: <http://sine.ni.com/ds/app/doc/p/id/ds-311/lang/es#header0>
- [10] Arduino. Arduino Mega 2560. [Online]. Disponible: <http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560>

## VII. BIOGRAFÍAS

### Jaime Zapata



Nació en Latacunga-Ecuador el 11 de abril de 1990. Realizó sus estudios secundarios en el colegio Hermano Miguel, donde obtuvo la mención de Abanderado del Pabellón Nacional. En la actualidad está realizando sus estudios superiores en la Escuela Politécnica Nacional, en la carrera de Ingeniería en Electrónica y Control, donde se desempeñó como Ayudante de Laboratorio del Departamento de Automatización y Control Industrial.

Áreas de interés: Control Industrial, Instrumentación biomédica, Robótica y Sistemas de adquisición de datos.

e-mail: [jainess.90@gmail.com](mailto:jainess.90@gmail.com)

## Nelson Sotomayor



Nació en Quito-Ecuador el 9 de Septiembre de 1971. Realizó sus estudios secundarios en el Instituto Nacional Mejía. Se graduó en la Escuela Politécnica Nacional como Ingeniero en Electrónica y Control en 1999. Obtuvo su título de Magíster en Ingeniería industrial en junio del 2006 en la Escuela Politécnica Nacional. En

septiembre del 2008 como becario del Gobierno de México y la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA), participó en el IV Curso Internacional de Robótica Aplicada, en el Centro Nacional de Actualización Docente CNAD ubicado en México DF. Actualmente desempeña el cargo de Profesor Principal T/C en el Departamento de Automatización y Control Industrial de la Escuela Politécnica Nacional. Además es Jefe del Departamento de Automatización y Control Industrial.

Áreas de interés: robótica móvil, informática y redes, microcontroladores, automatización y control industrial.

e-mail: [nelson.sotomayor@epn.edu.ec](mailto:nelson.sotomayor@epn.edu.ec)