

## **SIMULADOR CARDIACO DIGITAL**

Vicente Plaza Guingla <sup>1</sup>, Manuel Santín Loayza<sup>2</sup>, Miguel Yapur Auad<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ingeniero Electrónico 1990

<sup>2</sup> Ingeniero Electrónico 1999

<sup>3</sup> Director de Tópico, Ingeniero Electrónico, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 1983, Master en Ciencias de la Ingeniería Biomédica, 1986, Profesor de la ESPOL desde 1983.

### **RESUMEN**

El presente trabajo ha sido diseñado con la finalidad de proporcionar al estudiante un dispositivo que permita simular un patrón de onda cardíaca normal y además que permita variar la frecuencia cardíaca, de manera que se ponga en práctica los conocimientos adquiridos al estudiar esta señal, y las alteraciones que se pueden presentar.

Este dispositivo podrá ser utilizado para diagnóstico, ya que permite determinar si la señal cardíaca simulada de la persona, tiene un ritmo cardíaco normal

(60 latidos por minuto ), si tiene bradicardia (menos de 60 latidos por minuto) o taquicardia (mas de 90 latidos por minuto).

Para digitalizar la señal cardíaca utilizamos un circuito adicional para convertir la onda cardíaca que es una señal analógica a una señal digital y la almacenamos en una memoria EPROM. Además utilizamos un microcontrolador que es el cerebro de todo el simulador, ya que tiene guardado dentro de él, las funciones que debe realizar.

El microcontrolador me permite acceder a la memoria EPROM donde se encuentran los datos ya digitalizados de la señal cardíaca, y a la vez estos datos digitales pasan a un convertidor digital analógico que convierte la señal digital a analógica, donde podrá ser observada en un osciloscopio o en un monitor cardíaco.

Para cambiar la frecuencia cardíaca utilizamos un convertidor analógico a digital y un potenciómetro, que están conectados con el microcontrolador, como ya lo anotamos el microcontrolador es el cerebro del dispositivo.

## INTRODUCCIÓN

Nuestro corazón es uno de los órganos mas importantes de nuestro cuerpo, y con el simulador tendremos la oportunidad de aprender un poco más acerca de su comportamiento.

El corazón actúa fundamentalmente como una bomba. Su actividad viene regulada por diversos elementos, tanto en el interior como exteriormente al mismo.

Para impulsar la sangre, el miocardio se contrae y relaja rítmicamente, empujándola por los vasos de todo el cuerpo. La fase de contracción recibe el nombre de sístole, y corresponde a la expulsión de la sangre fuera de la cavidad. La cantidad de sangre impelida se conoce como volumen por latido. A esta fase sistólica le sigue una de relajación muscular, que recibe el nombre de diástole, en la cual pueden distinguirse dos etapas, una que es de relajación propiamente dicha, y otra en que el mismo aumento de volumen en el interior de la cavidad cardíaca que ha provocado la relajación , ejerce un efecto suctor que arrastra la sangre hasta su interior.

Este proceso rítmico de contracción y relajación varía en su frecuencia y volumen, dependiendo de numerosos factores, por ejemplo, con el esfuerzo y el ejercicio físico ( y la consiguiente necesidad de oxigenar las células ), en los estados de excitación, etc.

Para la obtención de la señal cardíaca se requiere de un electrocardiógrafo, y de los electrodos respectivos que van adheridos a la piel, específicamente en el brazo derecho e izquierdo, en la pierna derecha e izquierda y uno en el pecho. La señal cardíaca tiene un patrón ya definido que se conoce como la onda P, QRS, T que corresponden a un evento electrofisiológico particular. Cada una de estas ondas da una información en amplitud y frecuencia del estado físico del corazón muy importante para que el cardiólogo pueda detectar a tiempo una alteración que podría causar trastornos y hasta la muerte del individuo.

## CONTENIDO

El simulador consta de cuatro partes fundamentales:

- El microcontrolador
- La memoria
- El convertidor digital analógico
- El amplificador

### 1.- El Microcontrolador ( $\mu$ C).

Un microcontrolador  $\mu$ C es una microcomputadora de pastilla porque contienen la mayoría de los elementos funcionales de una computadora, inclusive el procesador central, la memoria de acceso aleatorio (RAM), la memoria solo de lectura (ROM), y puertos de entrada y salida (E / S).

Aunque los microprocesadores y los microcontroladores tienen origen común, están diseñados para aplicaciones diferentes. La mayoría de los microcontroladores se emplean en aplicaciones de intenso Hardware, de tiempo real, en las que se tienen señales tanto digitales como analógicas. Estas varían desde el control de codificación por teclado hasta el de motores, procesos industriales y motores de automóvil.

En contraste, el microprocesador ( $\mu\text{P}$ ) que tiene mejoras continuas, se usa principalmente en aplicaciones de software intenso que se encuentran en computadoras personales, estaciones de trabajo para gráfico y en computadoras paralelas de nueva generación.

El diagrama simplificado en bloques ilustra un microcontrolador de una sola pastilla, de 8 bits, que contiene una unidad central de procesamiento (CPU) y memoria de datos RAM. Sin embargo también tienen funciones que no se encuentran en los microprocesadores, como memoria para programar (ROM o EPROM ), reloj, contador de tiempo y eventos, y puertos programables en paralelo y en serie de E/S. Las ventajas que ofrecen el uso del microcontrolador en donde es apropiado incluyen ahorros en memoria externa y circuitos integrados de apoyo, espacio para tarjetas de circuito impreso y consumo de potencia.

El microcontrolador ocupa una pastilla de silicio que es aproximadamente del mismo tamaño que la de un microprocesador, por lo que se tienen que aceptar situaciones de compromiso para acomodar las funciones adicionales. Se imponen, por ejemplo, límites de tamaño en las memorias RAM y ROM en pastilla. No obstante, algunos dispositivos  $\mu\text{C}$  avanzados pueden realizar funciones que requerían un microprocesador de generación anterior y cinco dispositivos adicionales de apoyo.

Los microcontroladores se obtienen con arquitectura de 4, 8 y 16 bits, con su funcionamiento relacionado en general con la longitud de bit. Se ofrecen en familias para dar al usuario opciones de rendimiento y de funciones. Por ejemplo los  $\mu\text{C}$  pueden tener diferentes cantidades de RAM y ROM en pastillas para facilitar la selección de acoplamiento de costo adecuado para u requisitos de aplicación. La parte principal de cada familia tiene una memoria ROM programada en fábrica. Una unidad  $\mu\text{C}$  de 8 bits puede ofrecer 1000 bytes de memoria ROM interna programada en fábrica y solo 64 bytes de memoria RAM interna, pero otro puede ofrecer 2000 bytes de ROM interna y 128 bytes de RAM interna.

Las primera unidades de  $\mu\text{C}$  con tecnología NMOS. Algunso diseños se han convertido a CMOS y se están introduciendo nuevos dispositivos en esa tecnología. Ofrecen menor consumo de potencia importante en aplicaciones de control. Las unidades  $\mu\text{C}$  han seguido los mismos pasos de desarrollo que las  $\mu\text{P}$ , y se han beneficiado con los adelantos técnicos logrados en esos dispositivos.

Para desarrollo de productos se obtienen unidades  $\mu\text{C}$  sin ROM. El diseñador puede querer desarrollar software en memorias EPROM o EEPROM fuera de pastilla, para permitir cambios de programas más rápidos y económicos. Cuando se obtiene un programa depurado de errores, el usuario puede pedir

unidades  $\mu\text{C}$  convencionales en cantidad, con memorias ROM programadas de fábrica.

°En forma alterna algunos fabricantes de unidades  $\mu\text{C}$ , está, ofreciéndolas con EPROM y EEPROM en la pastilla, porque algunos clientes podrían no tener nunca la capacidad para hacer pedidos en volumen suficiente para justificar la compra de microcontroladores programados en fábrica. Se obtienen ya algunas unidades  $\mu\text{C}$  de 8 bits con convertidores analógico / digital. Esta opción permite conectar con interfaz directa a transductores analógicos tales como sensores de presión, temperatura y movimiento. Los microcontroladores de 8 bits con puerto en serie de E / S en la pastilla, permiten que trabajen juntas dos o más unidades  $\mu\text{C}$  en el sistema,. Algunas unidades  $\mu\text{C}$  de 16 bits y una sola pastilla tienen ambas cosas, puerto en serie de E / S y conversión analógica / digital (10 bits) de alta resolución.

En el simulador cardíaco utilizamos el  $\mu\text{C}$  D8051H que es de la familia MCS-51, los 8XX1 más concretamente los 8X51. Las diferencias entre estos miembros se muestra en la tabla 1.

Como se puede observar, existen tres versiones para cada uno: una versión sin ROM cuyo prefijo es 80 y sufijo 31 y dos versiones con ROM con sufijo 51; la versión EPROM tiene prefijo 87. Existe un miembro un poco mas completo de

esta familia, el cual cambia el número 1 por el 2, y posee mayor capacidad de ROM, de RAM, y temporizadores / contadores.

Las características más importantes de los microcontroladores 8X51 son:

- CPU de ocho bits, optimizada para aplicaciones de control.
- Procesador Booleano ( operación sobre bits)
- Espacio de memoria de programa de 64 Kbytes
- Espacio de memoria de datos de 64 Kbytes
- 4 Kbytes de memoria interna de programa
- 128 bytes de memoria RAM interna
- 32 líneas de entrada / salida, direccionables bit a bit
- Dos temporizadores / contadores de 16 bits
- Comunicación asincrónica Full Duplex
- 5 fuentes de interrupción
- Oscilador interno.

## 2.- La Memoria

La memoria utilizada en el proyecto es una memoria EPROM específicamente es la 27C256 que es de 32 K X 8.

Una EPROM puede ser programada por el usuario y también puede borrarse y reprogramarse tantas veces como se desee, una vez programada, la EPROM es

una memoria no volátil que contendrá sus datos almacenados indefinidamente. El proceso para programar la EPROM implica la aplicación de niveles de voltaje especiales (comúnmente en el orden de 10 a 25 voltios) a las entradas adecuadas en el circuito en una cantidad de tiempo especificada (por lo general 50 milisegundos por localidad de dirección). El proceso de programación generalmente es efectuado por un circuito especial de programación que está separado del circuito en el cual la EPROM eventualmente trabajará. El proceso de programación completo puede llevar varios minutos para un microcircuito EPROM.

En una EPROM las celdas de almacenamiento son transistores MOSFET que tienen una compuerta de silicio sin ninguna conexión eléctrica (es decir, una compuerta flotante). En su estado normal, cada transistor está apagado y cada celda guarda un 1 lógico. Un transistor puede encenderse mediante la aplicación de un pulso de programación de alto voltaje, el cual inyecta electrones de alta energía en la región formada por la compuerta flotante. Estos electrones permanecen en esta región una vez que ha finalizado el pulso ya que no existe ninguna trayectoria de descarga,. Esto mantiene el transistor encendido de manera permanente, aún cuando se retire la potencia de alimentación del dispositivo y la celda guarda ahora un 0 lógico. Durante el proceso de programación, se emplean las direcciones y terminales de la EPROM para

seleccionar las celdas de memoria que serán programadas como ceros, así como las que se dejarán como unos.

Una vez que se ha programado una celda de la EPROM, se puede borrar su contenido exponiendo la EPROM a la luz ultravioleta (UV), la cual se aplica a través de la ventana que se encuentra sobre el encapsulado del circuito. La luz UV produce una fotocorriente que va desde la compuerta flotante hacia el sustrato de silicio; con esto se apaga el transistor y se lleva de nuevo la celda hacia el estado uno lógico. Este proceso de borrado requiere entre 15 a 20 minutos de exposición a los rayos UV. Desafortunadamente, no existe ninguna forma de borrar solo algunas celdas; la luz UV borra todas las celdas al mismo tiempo por lo que una EPROM borrada almacena solamente unos lógicos. Una vez borrada la EPROM puede reprogramarse.

### 3.- El convertidor digital a analógico

Existen varios métodos y circuitos para producir la operación D / A. En este proyecto hemos usado un convertidor D / A en circuito integrado, y describiremos las características significativas de la forma en que realiza la transformación digital a analógica.

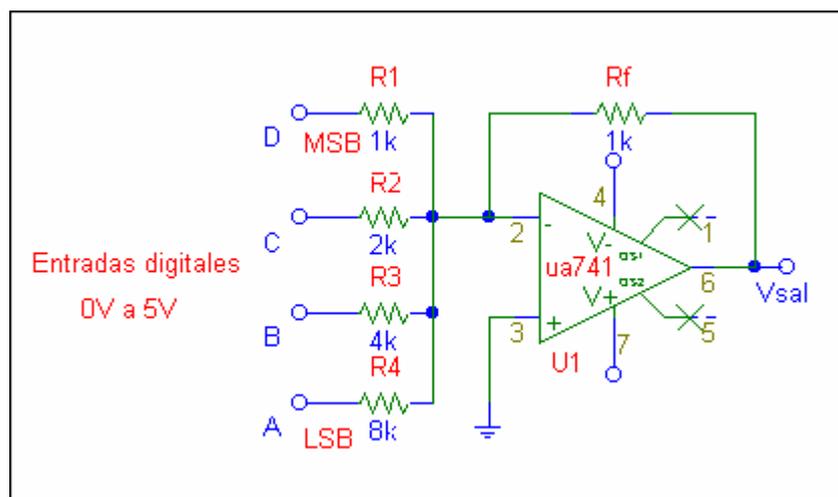
En la siguiente figura se muestra el circuito básico de un convertidor D / A de 4 bits. Las entradas A, B, C, D son entradas binarias que se supone tiene valores de

$$V_{sal} = -\left(V_D + \frac{V_C}{2} + \frac{V_B}{4} + \frac{V_A}{8}\right)$$

0 o 5V. El amplificador operacional que sirve de amplificador sumador, el cual produce la suma de los factores de ponderación de estos voltajes de entrada.

Desarrollando la fórmula para el voltaje de salida tenemos:

El signo negativo está presente debido a que el amplificador sumador es un



amplificador inversor.

La salida del amplificador sumador es un voltaje analógico que representa una suma de los valores de ponderación de las entradas digitales. Por ejemplo, si la entrada digital es 1010, entonces  $V_D=V_B=5V$  y  $V_C=V_A=0V$ . Así, al utilizar la ecuación  $V_{sal} = -(5V+0V+1/4 \times 5V+0V)$  por lo tanto  $V_{sal} = -6.25V$ . El voltaje de salida aumenta según se incremente el valor digital,

Las especificaciones del convertidor son: resolución, precisión, offset.

*Resolución.*- La resolución porcentual del convertidor depende únicamente del número de bits. Por esta razón los fabricantes por lo general especifican una resolución del convertidor por el número de bits. Un convertidor de 10 bits tiene una resolución más sensible (mayor exactitud) que uno de 6 bits. En nuestro proyecto utilizamos un convertidor de 8 bits,.

*precisión.*- Los fabricantes tienen varias maneras de especificar la precisión. Las dos más comunes se llaman error de escala completa y error de linealidad, que normalmente se expresan como un porcentaje de la salida a escala completa del convertidor (%F.S.).

El error a escala completa es la máxima desviación de la salida del convertidor de su valor estimado (lineal); expresado a escala completa. Por ejemplo suponga que el convertidor tiene una exactitud de  $\pm 0.01\%$  F.S. Como este convertidor tiene una salida a escala completa de 9.375 V, este porcentaje se convierte en  $\pm 0.01\% \times 9.375 \text{ V} = \pm 0.9375 \text{ mV}$ .

Esto significa que la salida de este convertidor puede, en cualquier instante, variar 0.9375 mV de su valor esperado.

El error de linealidad es la desviación máxima en el tamaño de paso del tamaño de paso ideal. Por ejemplo, un convertidor que tenga un tamaño de paso estimado de 0.625 V. Si este convertidor tiene un error de linealidad de  $\pm 0.01\%$  F.S., esto significaría que el tamaño de paso real podría apartarse del estimado hasta 0.9375 mV.

Es importante entender que la precisión y resolución de un convertidor deben ser compatibles. Es lógico el tener una resolución de digamos 1% y una precisión de 0.1 por ciento y viceversa. Para ilustrar, un convertidor con una resolución de 1% y una salida a escala completa de 10 V. Puede producir un voltaje analógico de salida dentro de 0.1 V de cualquier valor deseado asumiendo una exactitud perfecta. No tiene sentido tener una precisión costosa de 0.01 % de F.S. (o bien, 1 mV) si la resolución ya limita la proximidad al valor deseado a 0.12 V. Lo mismo puede decirse al tener una resolución muy pequeña (de muchos bits) en tanto que la exactitud es pobre, se trata de un desperdicio de bits de entrada.

*Error de desplazamiento (offset).*- En el caso ideal, la salida de un convertidor será de cero voltios cuando la entrada binaria es toda de ceros. Pero, en la práctica, habrá un voltaje de salida muy pequeño para esta situación y se llama error de desplazamiento. Este error de desplazamiento, si no se corrige, se sumará a la salida esperada de convertidor en todos los casos de entrada.

Por ejemplo digamos que un convertidor de cuatro bits tiene un error de desplazamiento de +2mV mayor que la esperada y esto se debe al error de desplazamiento; este puede ser tanto positivo como negativo.

Muchos convertidores tendrán un ajuste externo de desplazamiento que permitirá al usuario ponerlo en cero. Esto, por lo general, se logra al aplicar todos los ceros a la entrada del convertidor y vigilar la salida mientras se gradúa un potenciómetro de ajuste de desplazamiento hasta que la salida esté lo mas cerca de 0 voltios como se requiere.

#### 4.- El Amplificador

Este último bloque es la amplificación de la señal, más concretamente es la conversión de corriente a voltaje, ya que el convertidor la señal de salida analógica es de corriente y mas no de voltaje, en nuestro trabajo colocamos el amplificador sobrecompensado denominado  $\mu A741$  que es muy conocido.

La configuración de este amplificador operacional se denomina como amplificador inversor, ya que su salida es invertida con respecto a la entrada. No

se va a profundizar en esto porque, es una configuración muy conocida y no necesita de mucho profundidad de estudio.

## **CONCLUSIONES**

El objetivo del proyecto se logró satisfactoriamente, la calidad de la señal cardíaca observada en el osciloscopio es muy buena, sin ruido, y se presenta la opción de variar la frecuencia de la señal.

Una de las aplicaciones es usar el simulador para dar clases a estudiantes de Medicina, ya que podrían observar las condiciones normales y patologías que sufren los pacientes, esto ayudaría a dar un diagnóstico acertado.

Otra aplicación, es que el simulador serviría en la reparación de equipos médicos que utilicen como entradas la señal cardíaca, tales como monitores cardíacos y electrocardiógrafos, es decir no se necesitaría obligatoriamente un paciente para probar los equipos.

Como el cerebro del simulador es el microcontrolador , tuvimos que aprender a programarlo, ya que este dispositivo tiene su propio lenguaje de programación

llamado RCHPSIM, pero que tiene una similitud al TASM aprendido en la materia de Microprocesadores.

Los circuitos integrados utilizados no son muy fáciles de adquirir debido a su costo económico, esto debido a que el proyecto lo tratamos de reducir en elementos, pero esto hizo que los elementos usados sean más costosos.

Como recomendación se podría añadir una etapa más en la que este mismo simulador se lo utilice también como electrocardiógrafo con interfase a una computadora personal, debido a que los elementos utilizados en el proyecto son totalmente digitales.

## REFERENCIAS

1. José Adolfo Gonzáles Vázquez, Introducción a los microcontroladores Hardware, Software, Aplicaciones (Madrid, McGraw-Hill, 1992).
2. Robert F. Coughlin / Frederick F. Driscoll, Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales, (Cuarta Edición, Prentice Hall, 1989) pp 88-106.
3. Ronald J. Tocci, Sistemas Digitales, principios y aplicaciones (Sexta Edición, Prentice Hall) , pp 561-607.
4. Robert Boylestad / Louis Nashelsky, Electrónica teoría de circuitos (Quinta Edición, México, Prentice Hall, 1989) pp. 500-674.



**ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL**

**TOPICOS ESPECIALES DE INSTRUMENTACION MEDICA**

**RESUMEN DEL PROYECTO “ SIMULADOR CARDIACO DIGITAL ”**

**REVISADO POR:**

-----  
**ING. MIGUEL YAPUR A.**  
**DIRECTOR DEL TOPICO**



