



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

MÓDULO DIDÁCTICO DE UN MEDIDOR DE LA FRECUENCIA CARDÍACA MEDIANTE FOTOPLETISMOGRAFÍA

Ángel Bladimir Chancusi Molina

DIRECTOR: ING. FRANKLIN SILVA

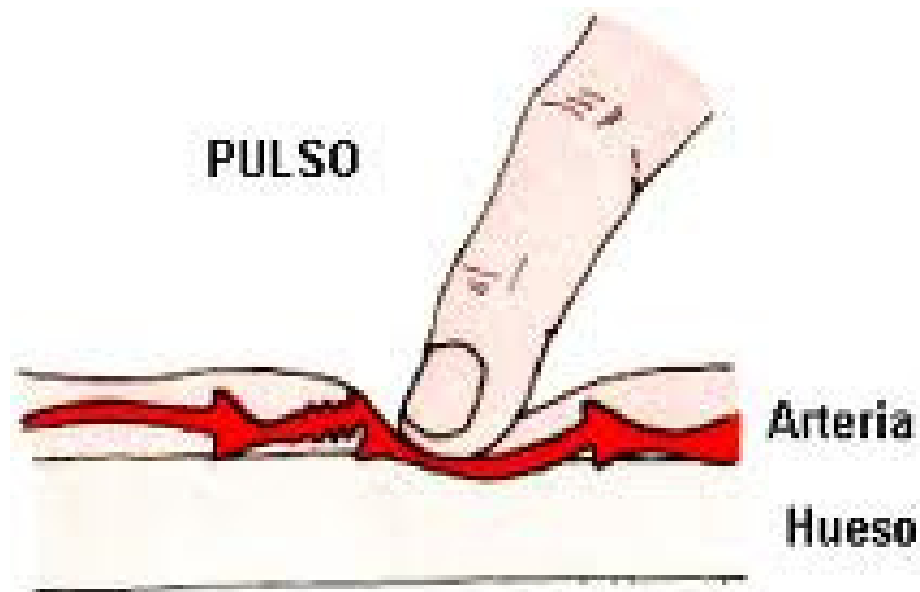
CODIRECTOR: ING. FABRICIO PÉREZ

AGENDA

- ✓ Pulso arterial.
- ✓ Forma de onda normal del pulso arterial.
- ✓ Frecuencia cardíaca.
- ✓ Fotopletismografía.
- ✓ Técnicas de captura de fotopletismografía.
- ✓ ZigBee
- ✓ Diseño del sistema.
- ✓ Implementación y pruebas.
- ✓ Análisis de resultados.
- ✓ Análisis de costos.
- ✓ Conclusiones y recomendaciones.

PULSO ARTERIAL

La sangre forzada dentro de la aorta durante la sístole no sólo mueve la sangre en los vasos hacia delante, también establece una onda de presión que se transmite a lo largo de las arterias periféricas. La onda de presión expande las paredes arteriales ya que la sangre viaja desde la aorta, y la expansión es palpable como el pulso.



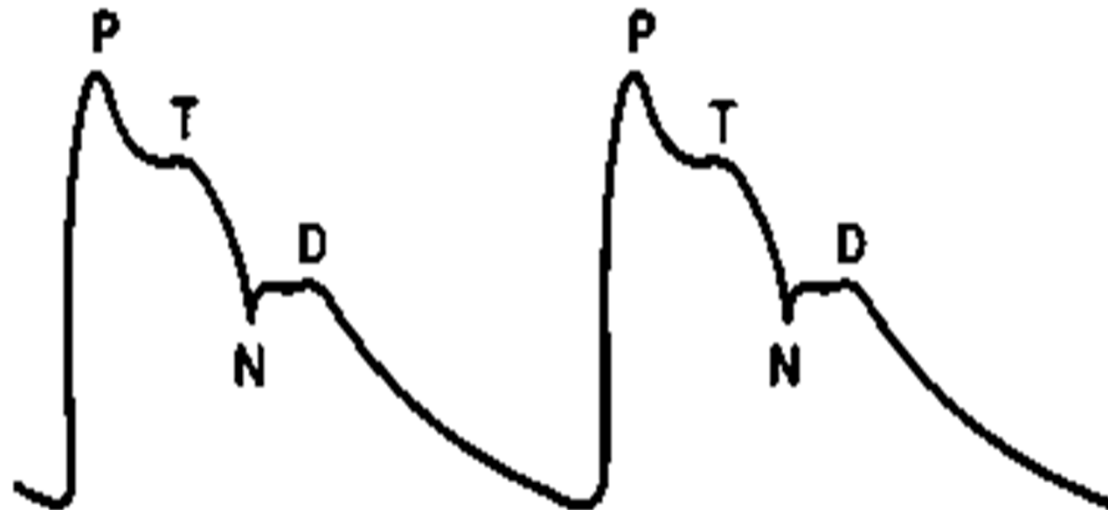
FORMA DE ONDA NORMAL DEL PULSO

Onda de percusión (P), corresponde a la fase de eyección de la sístole ventricular.

Onda de marea (T), se debe a la caída de la columna de sangre durante la fase de eyección lenta.

Incisura dícrota (N), se debe al cierre brusco de la válvula aórtica y marca el final de la sístole ventricular.

Onda dícrota (D), es debido al rebote de la columna de sangre de la válvula aórtica cerrada.



FRECUENCIA CARDÍACA

Es el número de veces que se contrae el corazón en la unidad de tiempo. Se expresa en latidos por minuto (lpm). Los valores normales en reposo de la frecuencia cardíaca son:

PACIENTES	FRECUENCIA CARDÍACA
Recién nacidos (0 – 1 mes de edad)	70 – 190 lpm
Bebes (1 – 11 meses de edad)	80 – 160 lpm
Niños (1 – 2 años de edad)	80 – 130 lpm
Niños (3 – 4 años de edad)	80 – 120 lpm
Niños (5 – 6 años de edad)	75 – 115 lpm
Niños (7 – 9 años de edad)	70 – 110 lpm
Niños de 10 años o más y adultos (incluso ancianos)	60 – 100 lpm
Atletas bien entrenados	40 – 60 lpm

FOTOPLETISMOGRAFÍA

Mide los cambios en la absorción de luz dentro de los capilares dérmicos.

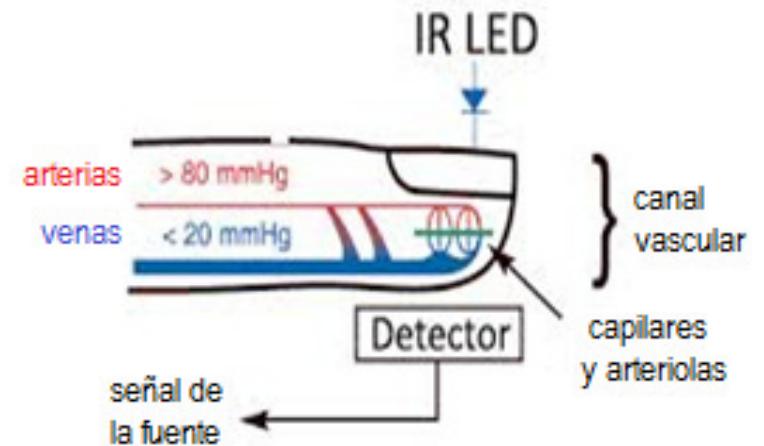
La fotopletismografía utiliza un transductor que emite luz infrarroja de un diodo emisor de luz (LED), la mayor parte de luz que emite el diodo es absorbida por los tejidos. La luz reflejada se mide mediante un fotodetector.



TÉCNICAS DE CAPTURA DE FOTOPLETISMOGRAFÍA

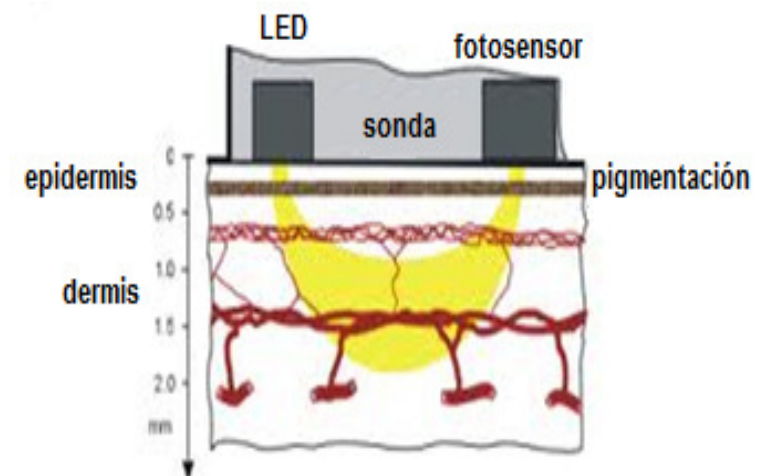
Trans-iluminado.

En esta técnica se colocan un dispositivo emisor y detector de tal forma que el dedo del paciente queda entre los mismos.



Reflexión de luz.

Esta técnica de captura de señales superficiales se detecta la luz reflejada en mayor o menor cantidad por las venas superficiales.



ZIGBEE

ZigBee es un estándar que define un conjunto de protocolos para el armado de redes inalámbricas de corta distancia y baja velocidad de datos. Opera en las bandas de 868 MHz, 915 MHz y 2.4 GHz y puede transferir datos hasta 250Kbps.

Entre las aplicaciones de ZigBee están:

- ✓ Automatización en el hogar.
- ✓ Automatización industrial.
- ✓ En hospitales.
- ✓ En hoteles.
- ✓ En monitoreo ambiental.



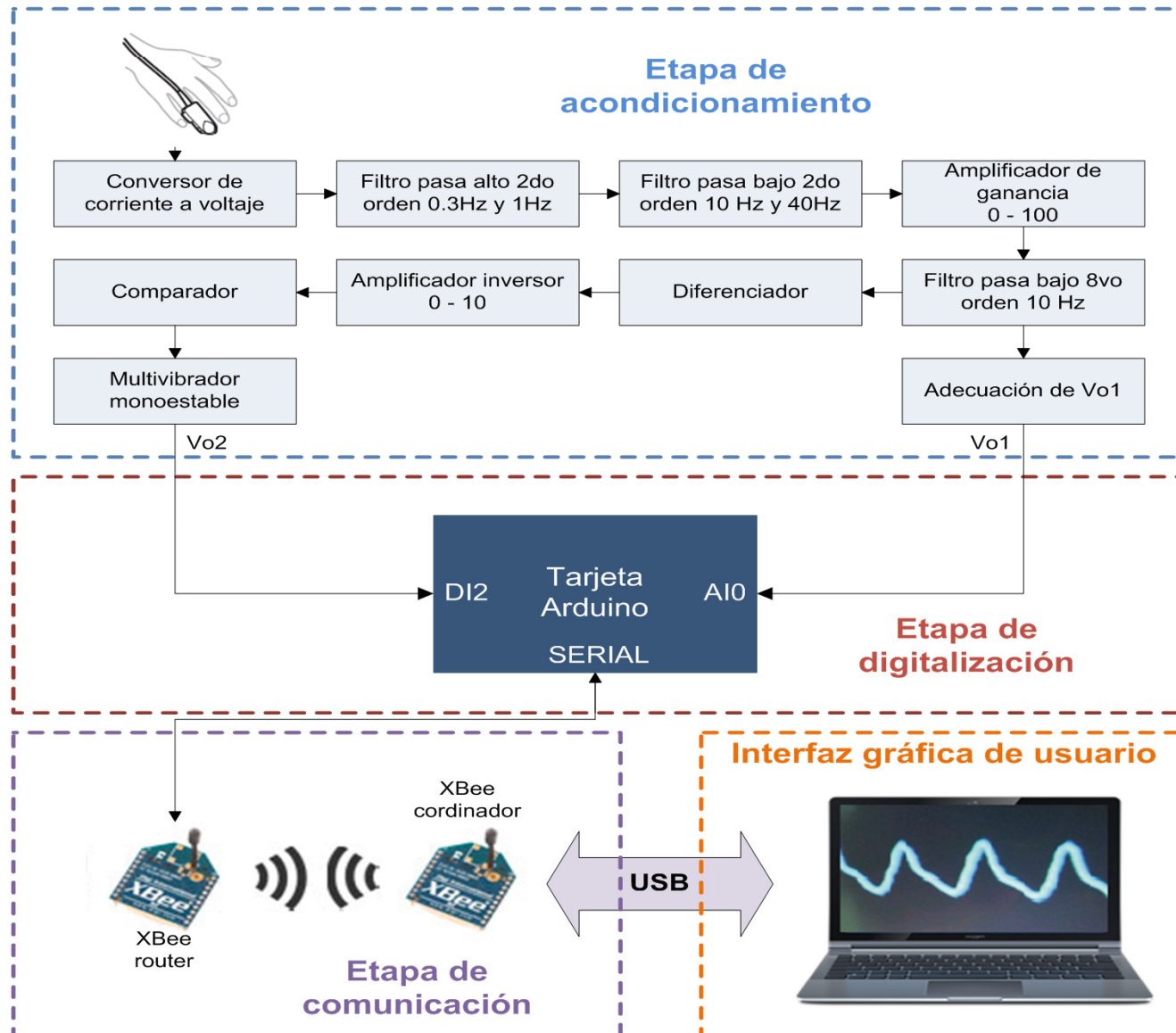
ZIGBEE

Ahora se va a comparar ZigBee con algunos de los estándares más populares que trabajan en la frecuencia libre o sin licencia de los 2.4 GHz.

ZigBee (WPAN)	Bluetooth (WLAN/WPAN)	Wi-Fi (WLAN)
<ul style="list-style-type: none">• Estándar 802.15.4.• 250 Kbps.• TX: 35mA.• Modo de espera: 3µA.• Iluminación, Sensores, Periféricos.• Red de Malla.	<ul style="list-style-type: none">• Estándar 802.15.1.• 1 Mbps.• TX: 40mA.• Modo de espera: 200µA.• 100+ KB de memoria.• Audio, reemplazo de cable.• Punto a Multipunto.	<ul style="list-style-type: none">• Estándar 802.11.• Mayor a 54 Mbps.• TX: 400+ mA.• Modo de espera: 20 mA.• 100+ KB de memoria.• Empresarial, puntos de acceso casero.• Punto a Multipunto.

DISEÑO DEL SISTEMA

Diagrama de bloques del sistema:

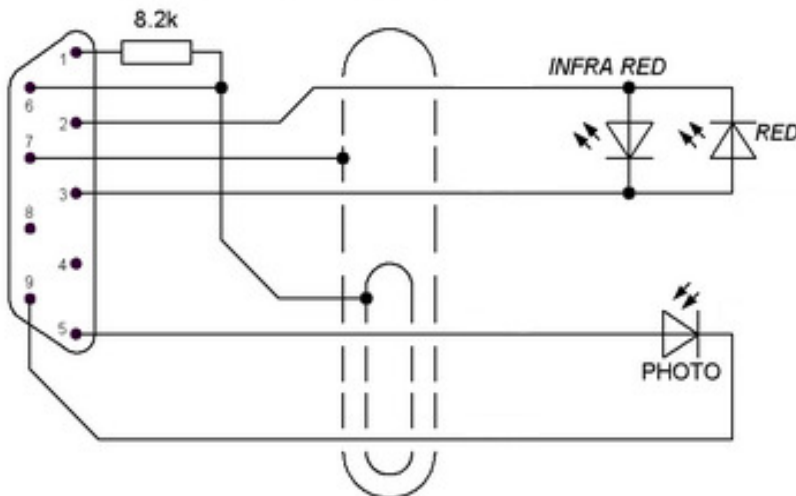


DISEÑO DEL HARDWARE

Para el diseño de esta etapa de acondicionamiento se partirá del sensor de oximetría NELLCOR DS-100A:



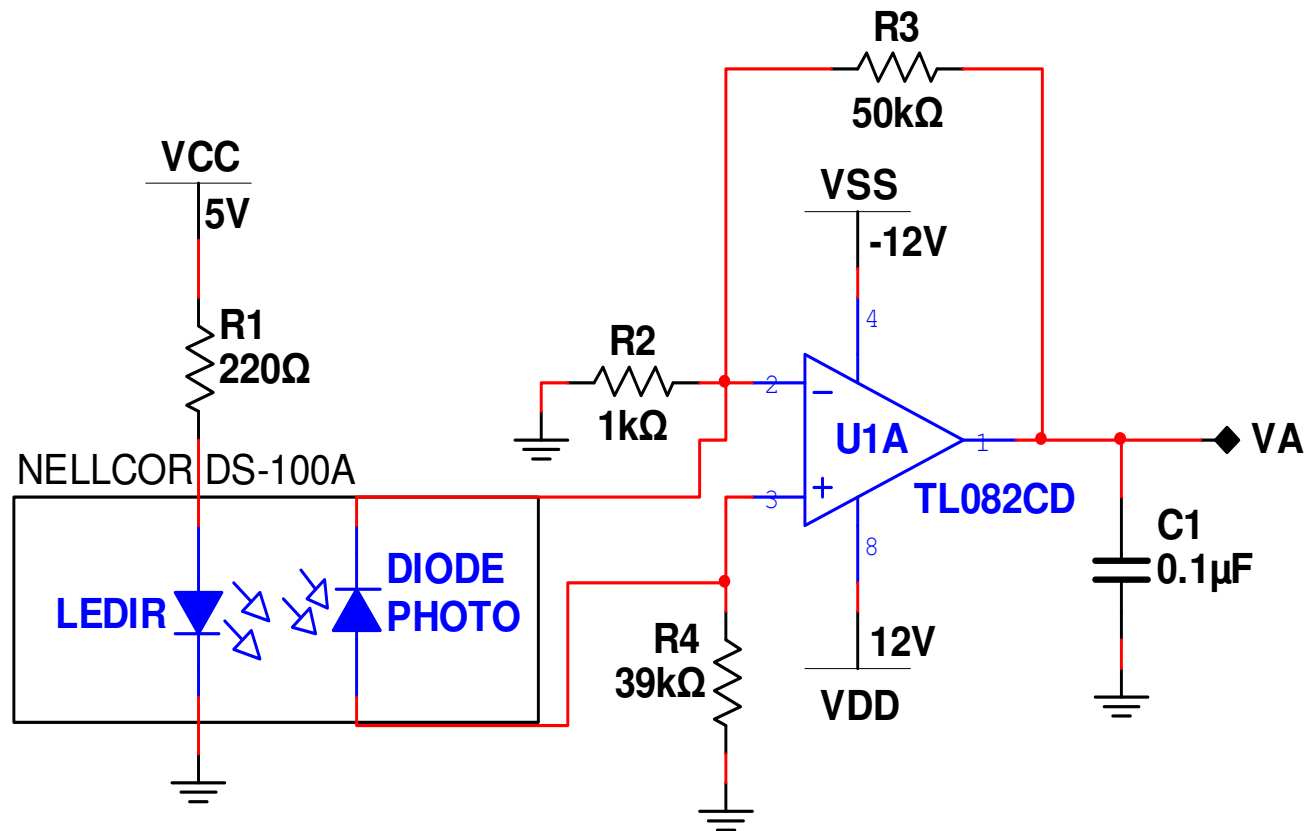
SpO2 sensor Nellcor DS-100A



PINES	DESCRIPCIÓN
1	Resistencia del sensor
2	Polarización LEDs
3	Polarización LEDs
4	No Conexión
5	Ánodo del Fotodiodo
6	Resistencia del sensor
7	Tierra del cable
8	No Conexión
9	Cátodo del Fotodiodo

CONVERSOR DE CORRIENTE A VOLTAJE

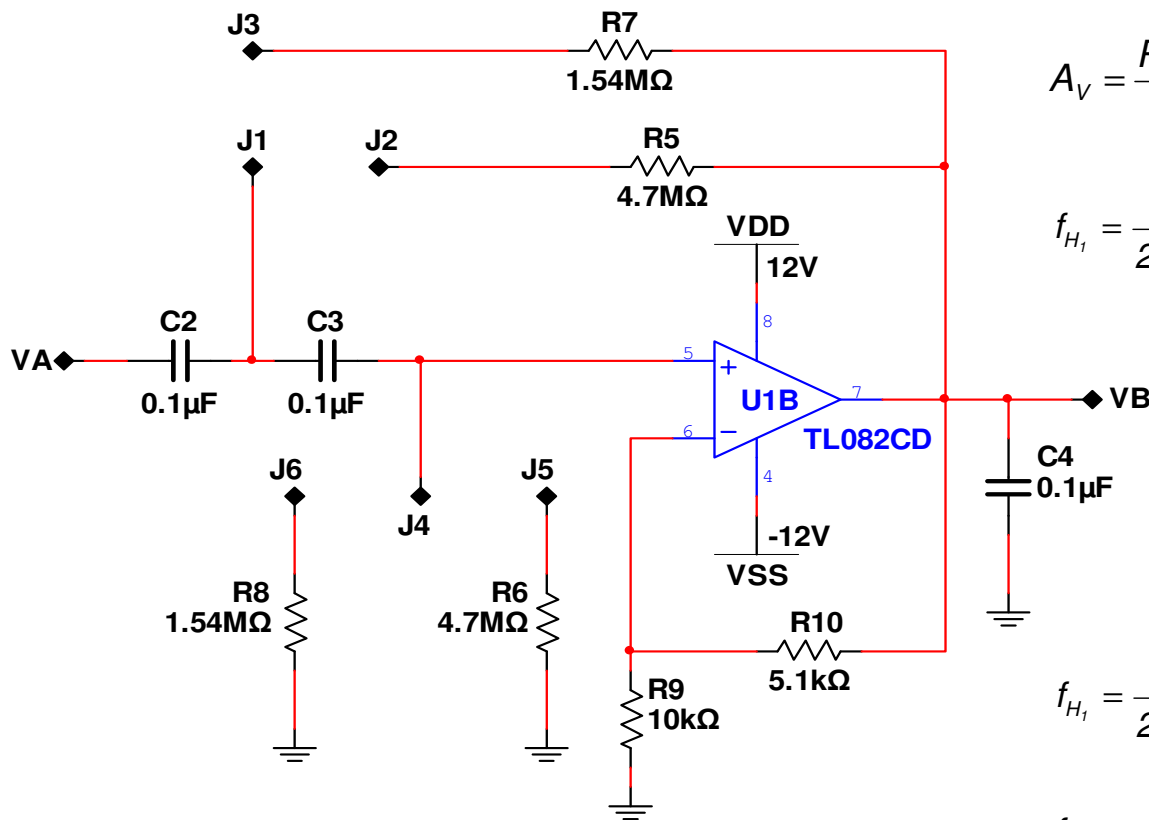
El fotodiodo produce una corriente entre 0 y 800 μA , debido a que es muy pequeño se da la necesidad de convertirla en voltaje y amplificarla.



$$V_A = I_P R_4 (1 + R_3 / R_2)$$

FILTRO PASA ALTO DE 2° ORDEN

El propósito del filtro pasa alto es remover las variaciones de voltaje causadas por el movimiento del dedo y el voltaje de polarización DC del sensor.



$$A_V = \frac{R_9 + R_{10}}{R_9} = \frac{10k\Omega + 5.1k\Omega}{10k\Omega} = 1.51$$

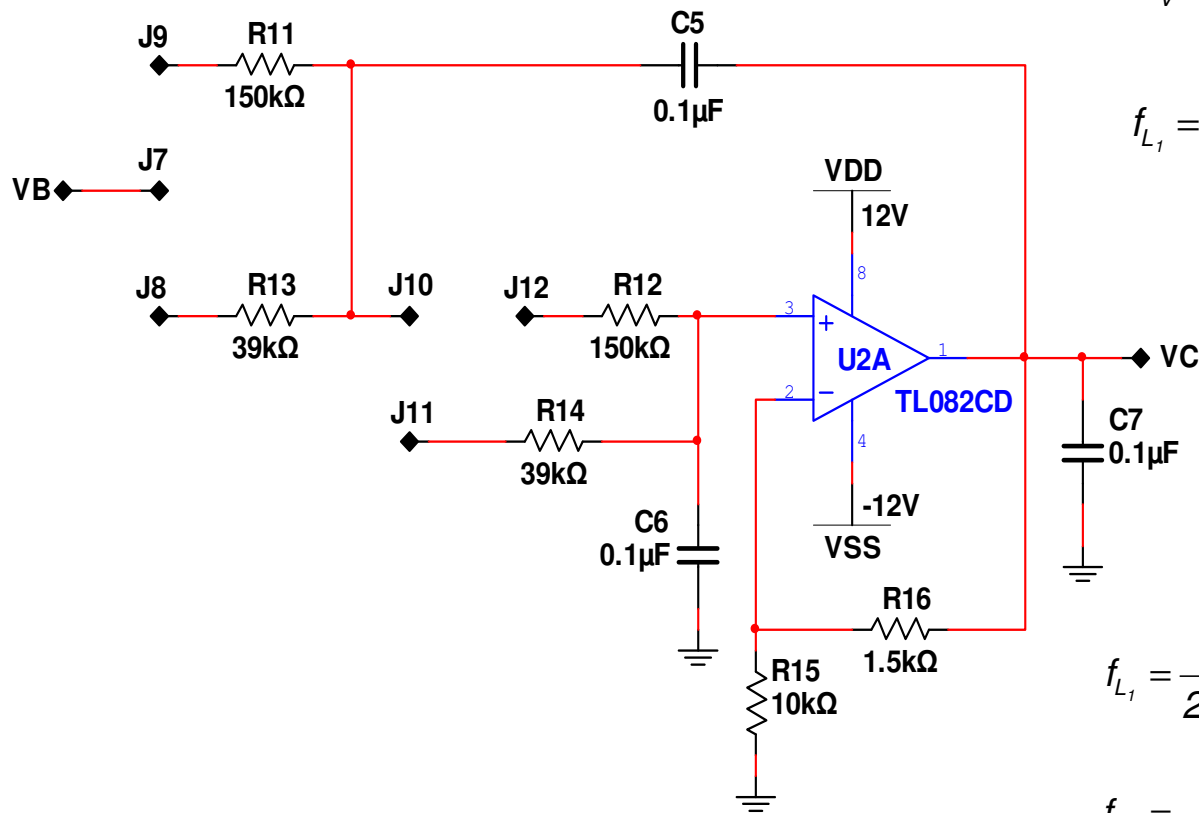
$$f_{H_1} = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_2 C_3 R_7 R_8}} \quad \text{or} \quad f_{H_2} = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_2 C_3 R_5 R_6}}$$

$$f_{H_1} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(0.1\mu F)(0.1\mu F)(1.54M\Omega)(1.54M\Omega)}} = 1 \text{ Hz}$$

$$f_{H_2} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(0.1\mu F)(0.1\mu F)(4.7M\Omega)(4.7M\Omega)}} = 0.3 \text{ Hz}$$

FILTRO PASA BAJO DE 2° ORDEN

El objetivo del filtro pasa bajo es remover el ruido de alta frecuencia producido por la fuente de poder, luz y lámparas fluorescentes.



$$A_V = \frac{R_{15} + R_{16}}{R_{15}} = \frac{10k\Omega + 1.5k\Omega}{10k\Omega} = 1.15$$

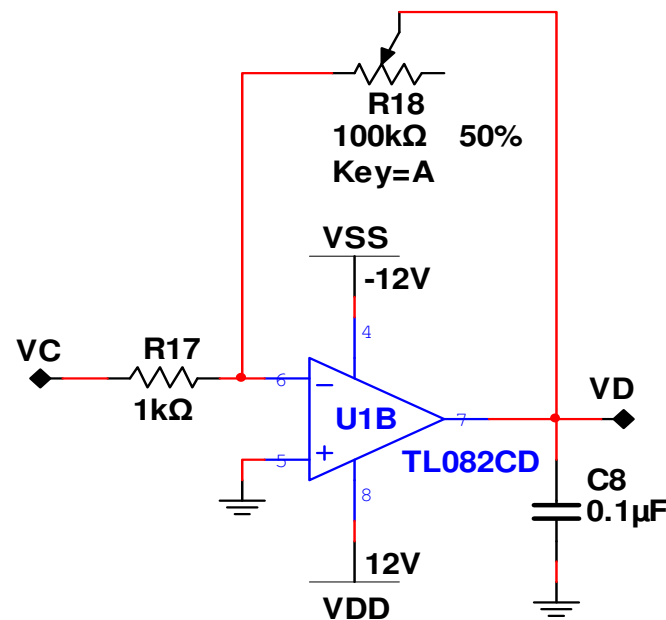
$$f_{L_1} = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_{13}R_{14}C_5C_6}} \quad \text{o} \quad f_{L_1} = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_{11}R_{12}C_5C_6}}$$

$$f_{L_1} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(39k\Omega)(39k\Omega)(0.1\mu F)(0.1\mu F)}} = 40 \text{ Hz}$$

$$f_{L_2} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(150k\Omega)(150k\Omega)(0.1\mu F)(0.1\mu F)}} = 10 \text{ Hz}$$

AMPLIFICADOR DE GANANCIA

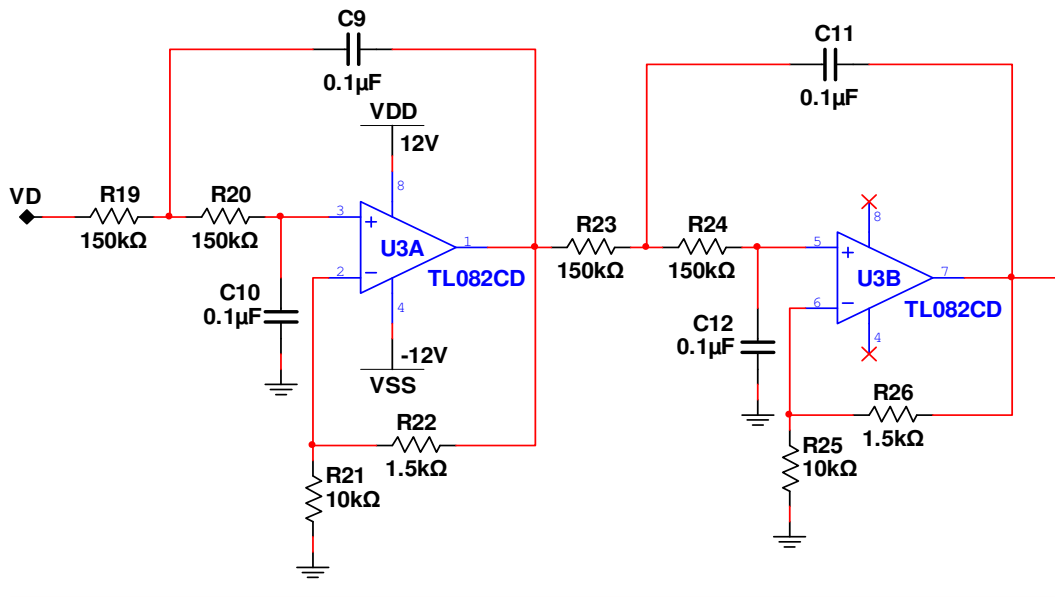
Las variaciones de tensión obtenidas de la etapa anterior están en el orden de los milivoltios, por lo tanto, el objetivo de esta etapa es amplificar la señal obtenida y reducir en lo posible el ruido.



$$A_v = - \frac{R_{18}}{R_{17}}$$

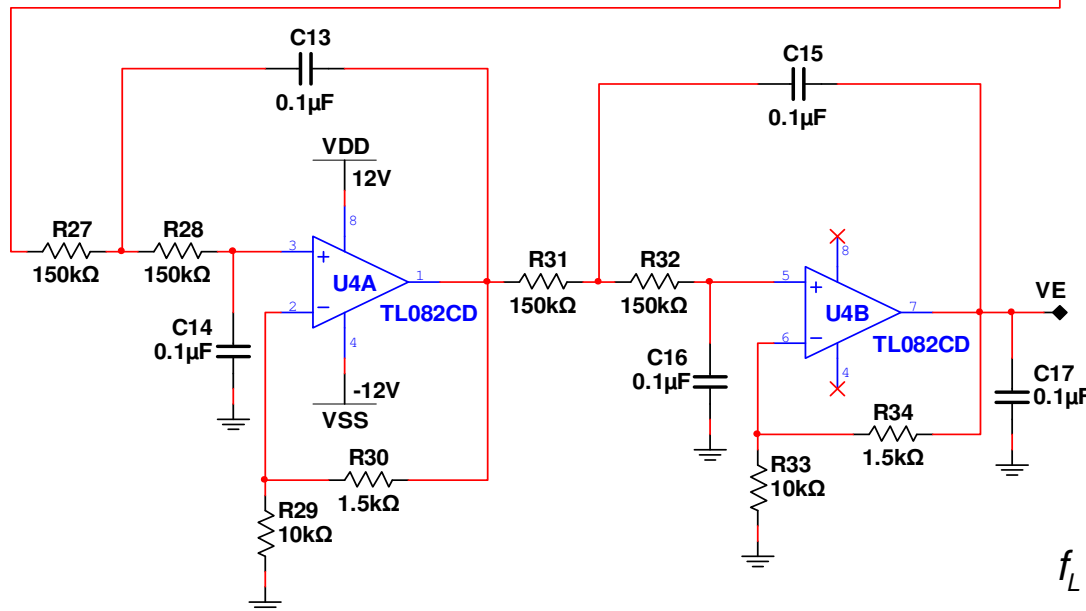
$$A_v = - \frac{100 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega}$$

FILTRO PASA BAJO DE 8° ORDEN



$$A_{V_1} = A_{V_2} = A_{V_3} = A_{V_4} = \frac{R_{21} + R_{22}}{R_{21}} = \frac{10k\Omega + 1.5k\Omega}{10k\Omega} = 1.15$$

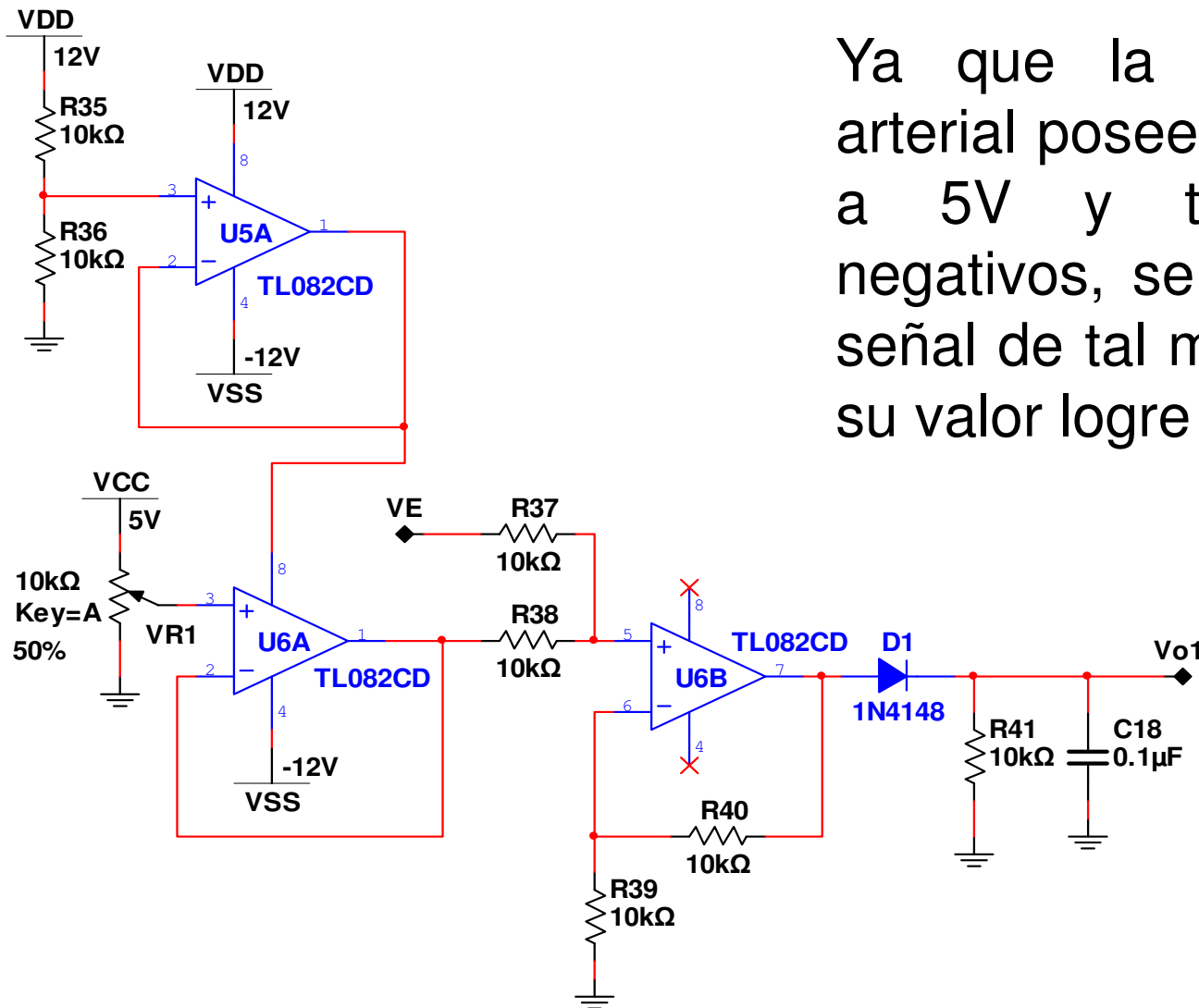
$$A_{V_t} = A_{V_1} \times A_{V_2} \times A_{V_3} \times A_{V_4} = 1.15 \times 1.15 \times 1.15 \times 1.15 = 1.75$$



$$f_L = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_{19}R_{20}C_9C_{10}}}$$

$$f_L = \frac{1}{2\pi\sqrt{(150k\Omega)(150k\Omega)(0.1\mu F)(0.1\mu F)}} = 10\text{Hz}$$

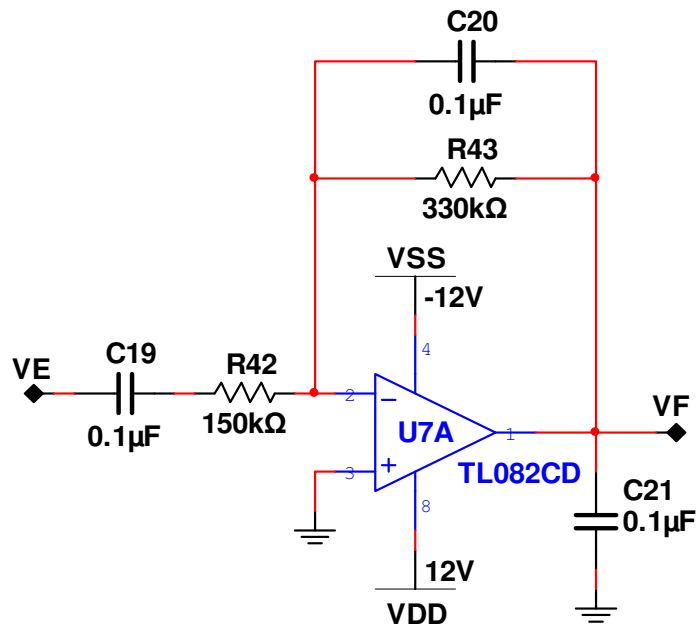
ADECUACIÓN DE LA ONDA DEL PULSO ARTERIAL



Ya que la onda del pulso arterial posee voltajes mayores a 5V y también voltajes negativos, se debe adecuar la señal de tal modo que siempre su valor logre ser 0V.

DIFERENCIADOR

El diferenciador permite acentuar el volumen de cambio de la señal.



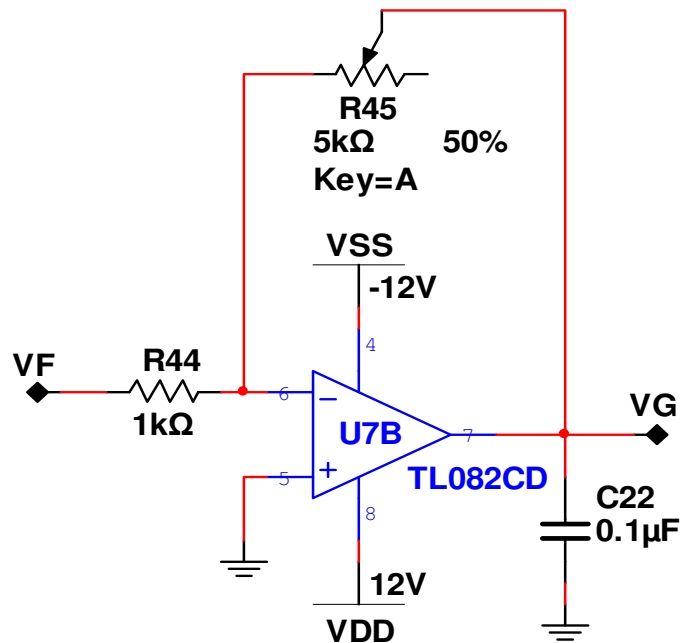
$$V_{OUT} = -R_{43} C_{19} \frac{\partial V_{IN}}{\partial t}$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_{43} C_{19}} = \frac{1}{2\pi (330 \text{ K}\Omega)(100 \text{ nF})} = 4.82 \text{ Hz}$$

Con el resultado de la frecuencia de corte, se determina el valor máximo de la frecuencia cardiaca para el módulo didáctico que es de 289 latidos por minuto.

INVERSOR

La señal con un desfase de 180° se produce cuando pasa a través del circuito diferenciador. Para resolver esto, un inversor puede ser utilizado para recuperar la fase de la señal.

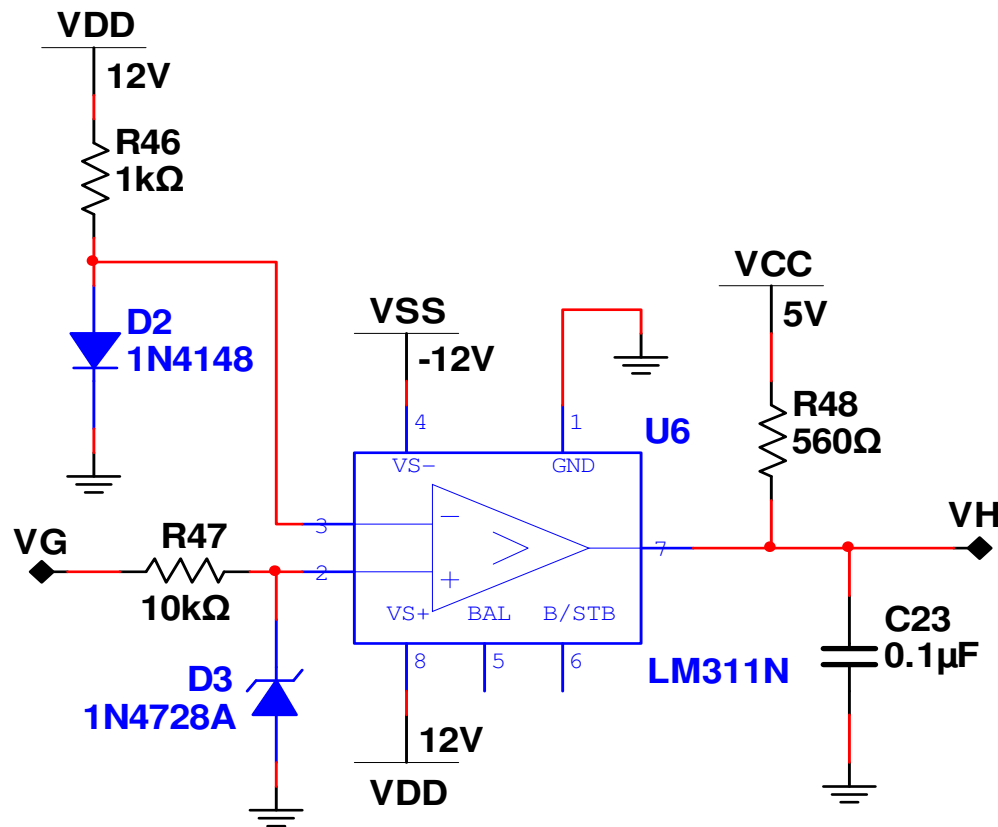


$$A_V = \frac{-R_{45}}{R_{44}}$$

$$A_V = \frac{-5k\Omega}{1k\Omega}$$

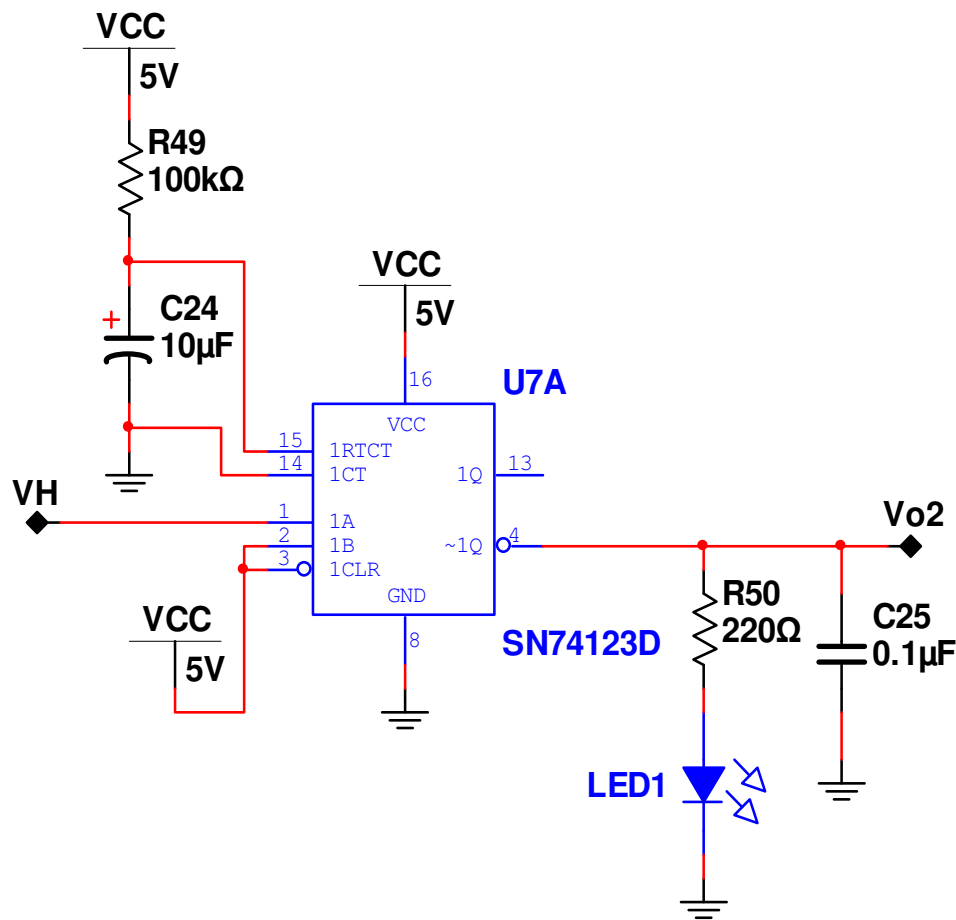
COMPARADOR

En un latido del corazón, el comparador puede generar sólo un pulso que es usado para disparar al multivibrador monoestable.



MULTIVIBRADOR MONOESTABLE

Produce un pulso por cada señal de disparo positivo que recibe el multivibrador. El LED conectado a la salida del multivibrador titilará una vez por cada latido del corazón.

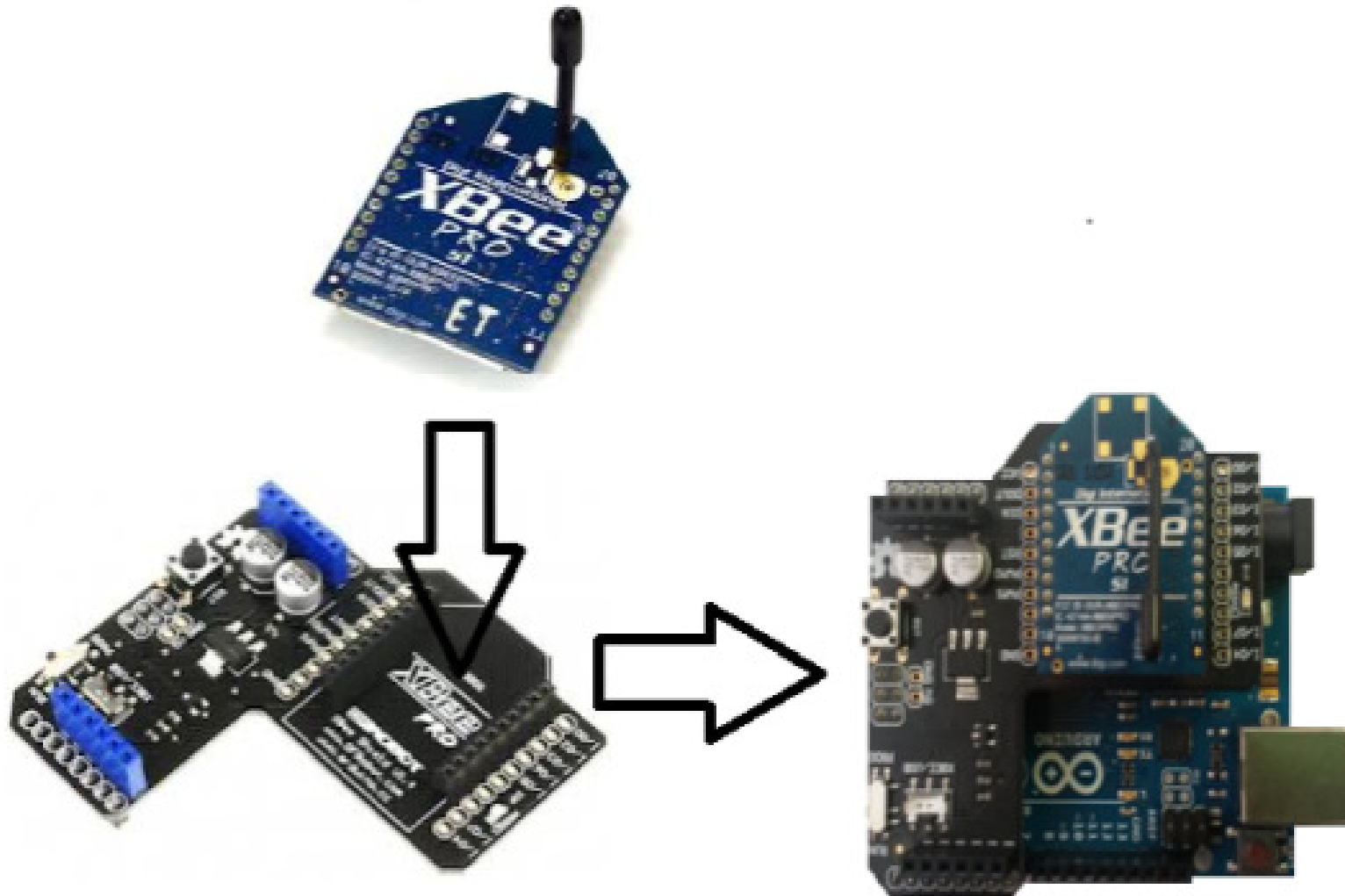


$$t = k R_{49} C_{24} \left(1 + \frac{0.7}{R_{49}} \right)$$

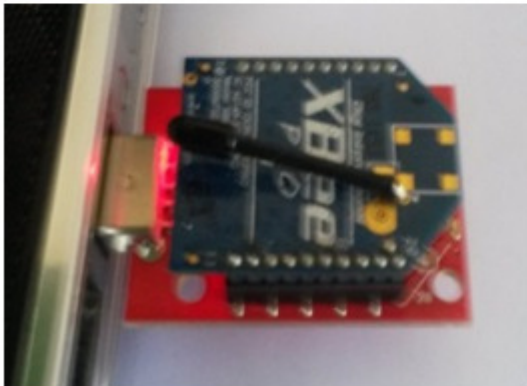
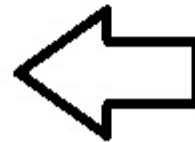
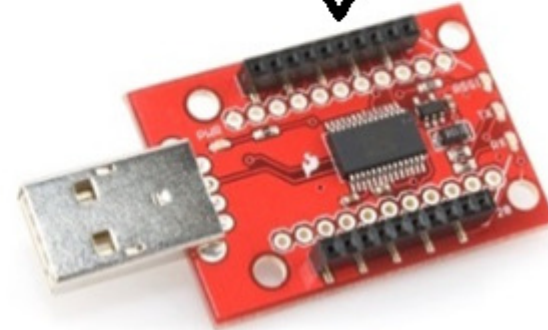
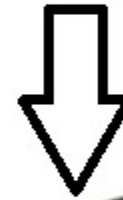
$$t = (0.28)(100 \text{ k}\Omega)(100 \mu\text{F}) \left(1 + \frac{0.7}{100 \text{ k}\Omega} \right)$$

$$t = 0.28 \text{ s}$$

CONEXIÓN ARDUINO UNO, XBEE SHIELD Y XBEE PRO



CONEXIÓN XBEE PRO, XBEE EXPLORER CON EL COMPUTADOR

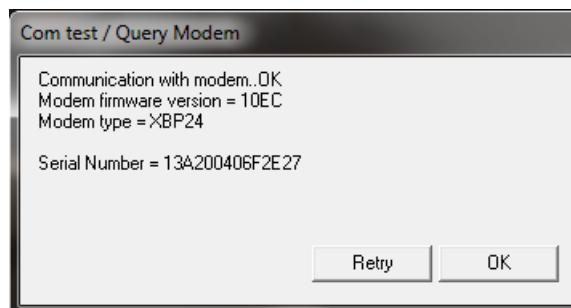
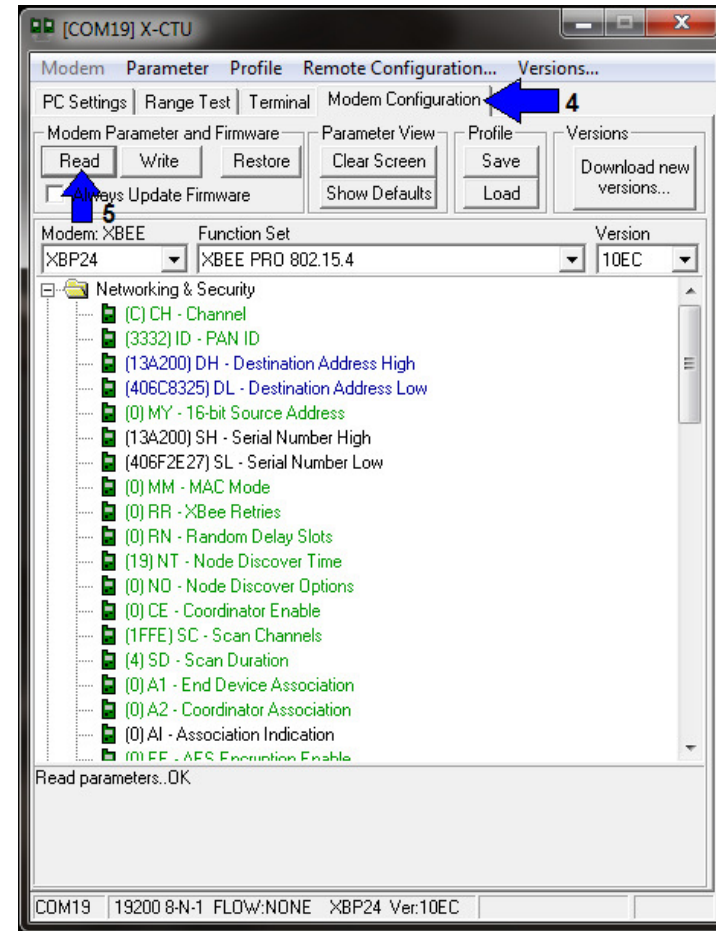
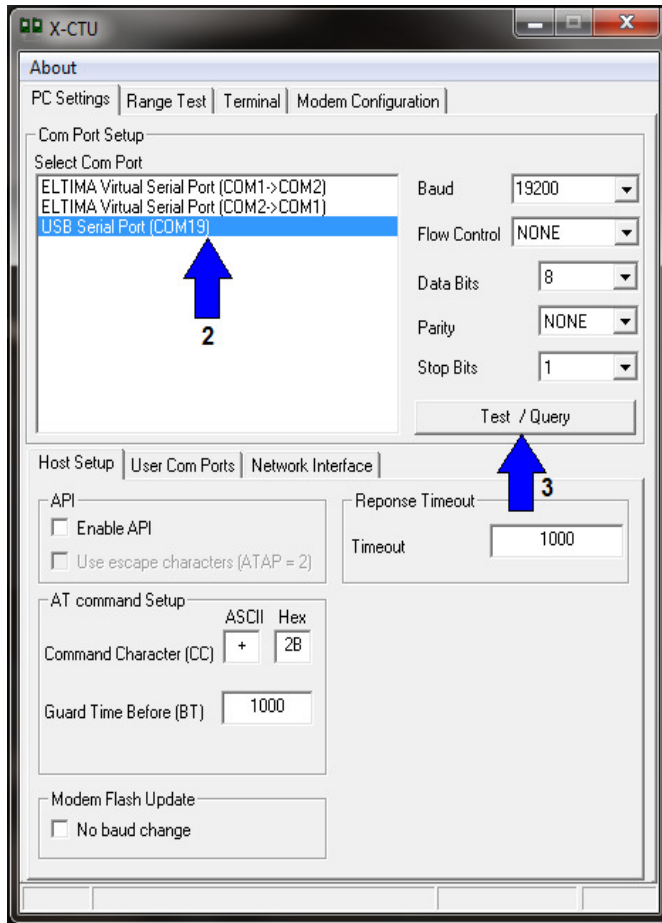


DISEÑO DEL SOFTWARE

Código para la tarjeta ARDUINO UNO:

```
int heartWave = 0;           // Variable para almacenar el valor análogo leído
int pinFreq = 2;            // Etiquetar la variable que se conecta al pin digital 2
int Freq = 0;               // Variable para almacenar el valor digital leído
void setup()
{
  Serial.begin (19200);      // Abrir el puerto serie a 19200 bps
  pinMode (pinFreq, INPUT); // Establecer el pin digital 2 como entrada
}
void loop()
{
  heartWave = analogRead (A0); // Leer el pin análogo 0
  Freq = digitalRead (pinFreq); // Leer el pin digital 2
  Serial.print (heartWave);    // Enviar
  Serial.print (",");
  Serial.println (Freq);
  delay(20);                   // Retardo de 20 milisegundos
}
```


Configuración de los XBee:



Transmisor

Modem: XBEE Function Set: XBEE PRO 802.15.4 Version: 10EC

- (C) CH - Channel
- [3332] ID - PAN ID ← 7
- [13A200] DH - Destination Address High ← 8
- [406C8325] DL - Destination Address Low ← 9
- [0] MY - 16-bit Source Address ← 10
- [13A200] SH - Serial Number High
- [406F2E27] SL - Serial Number Low
- [0] MM - MAC Mode
- [0] RR - XBee Retries
- [0] RN - Random Delay Slots
- [19] NT - Node Discover Time
- [0] NO - Node Discover Options
- [0] CE - Coordinator Enable
- [1FFE] SC - Scan Channels
- [4] SD - Scan Duration
- [0] A1 - End Device Association
- [0] A2 - Coordinator Association
- [0] AI - Association Indication
- [0] EE - AES Encryption Enable

Modify networking settings

COM19 | 19200 8-N-1 FLOW:NONE | XBP24 Ver:10EC

Receptor

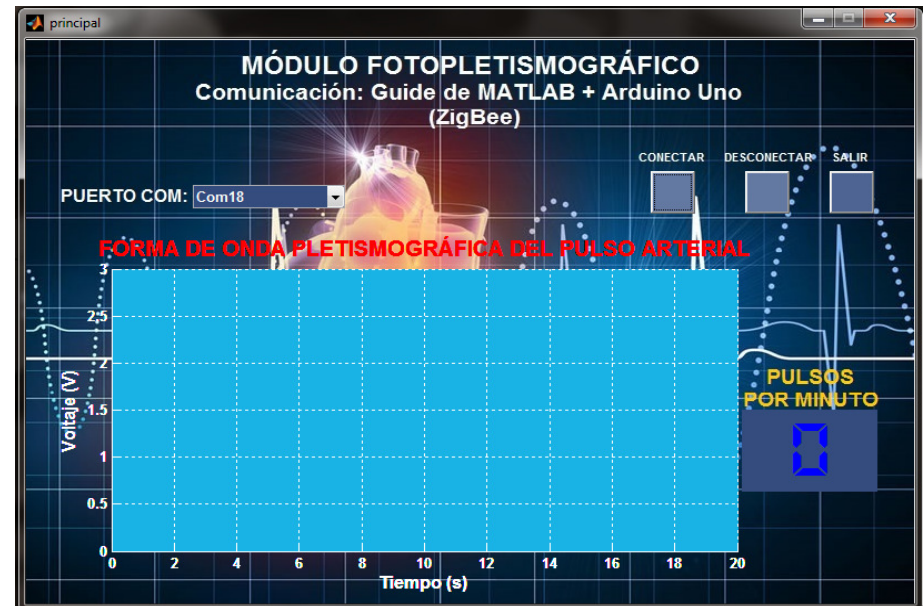
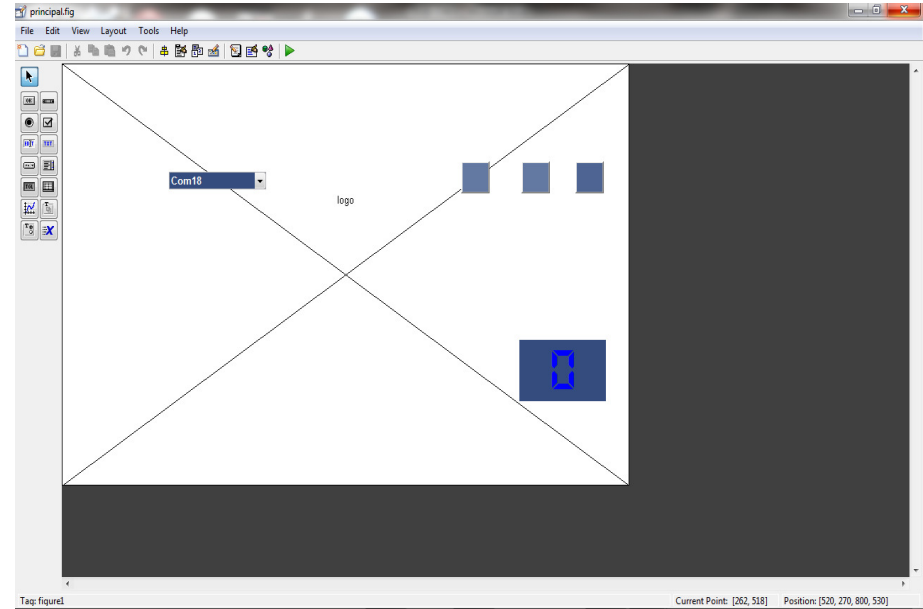
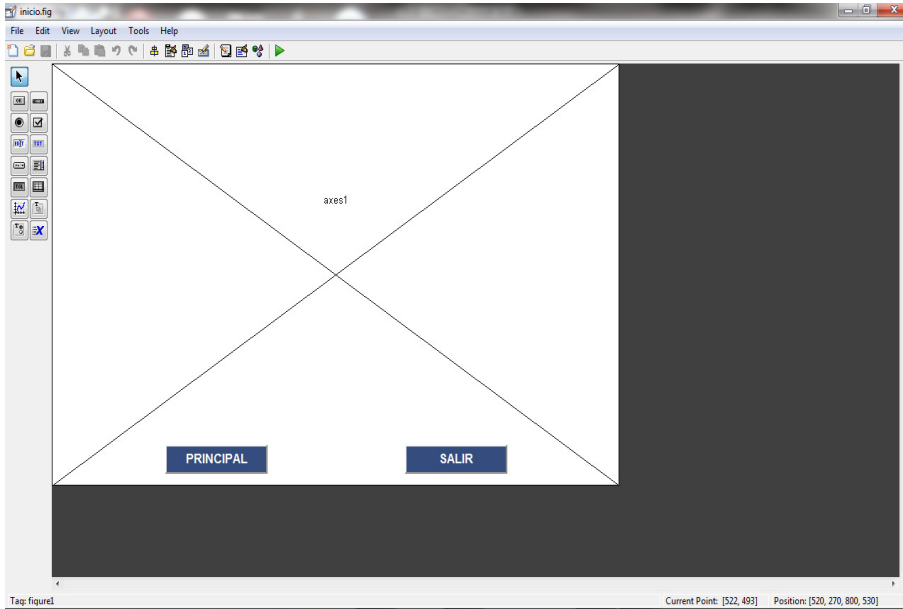
Modem: XBEE Function Set: XBEE PRO 802.15.4 Version: 10EC

- (C) CH - Channel
- [3332] ID - PAN ID ← 15
- [13A200] DH - Destination Address High ← 16
- [406F2E27] DL - Destination Address Low ← 17
- [0] MY - 16-bit Source Address ← 18
- [13A200] SH - Serial Number High
- [406C8325] SL - Serial Number Low
- [0] MM - MAC Mode
- [0] RR - XBee Retries
- [0] RN - Random Delay Slots
- [19] NT - Node Discover Time
- [0] NO - Node Discover Options
- [0] CE - Coordinator Enable
- [1FFE] SC - Scan Channels
- [4] SD - Scan Duration
- [0] A1 - End Device Association
- [0] A2 - Coordinator Association
- [0] AI - Association Indication
- [0] EE - AES Encryption Enable

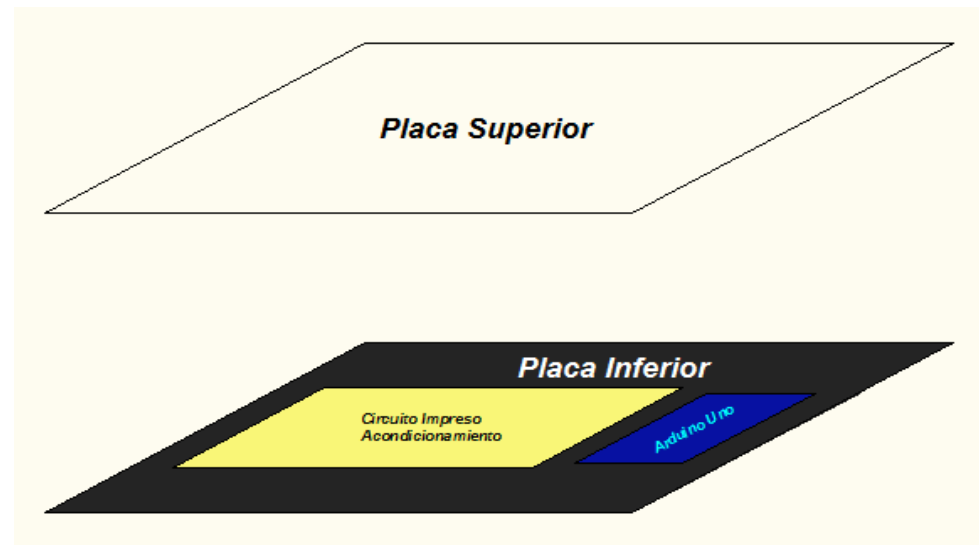
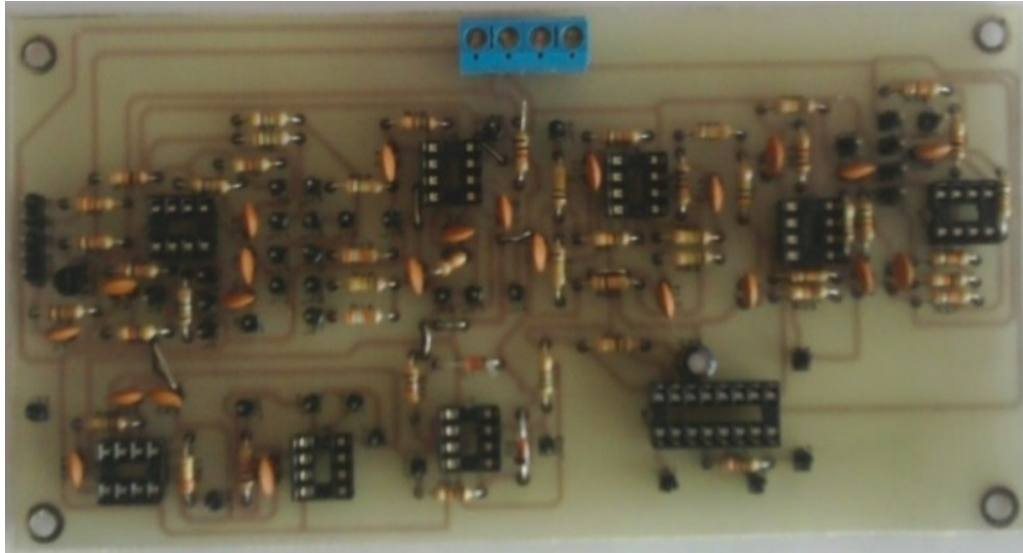
Read parameters..OK

COM19 | 19200 8-N-1 FLOW:NONE | XBP24 Ver:10EC

DESARROLLO DE LA GUI

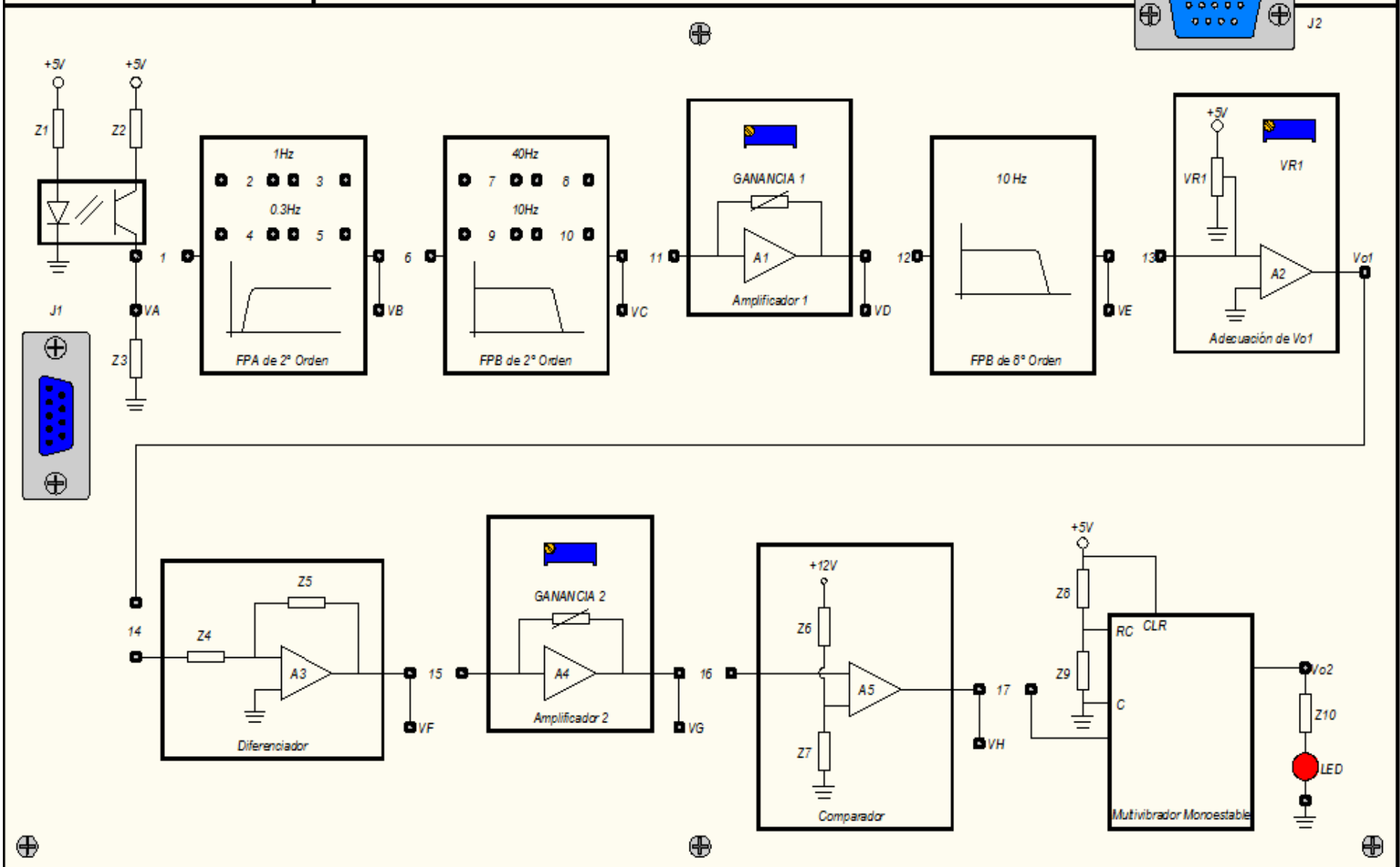


IMPLEMENTACIÓN

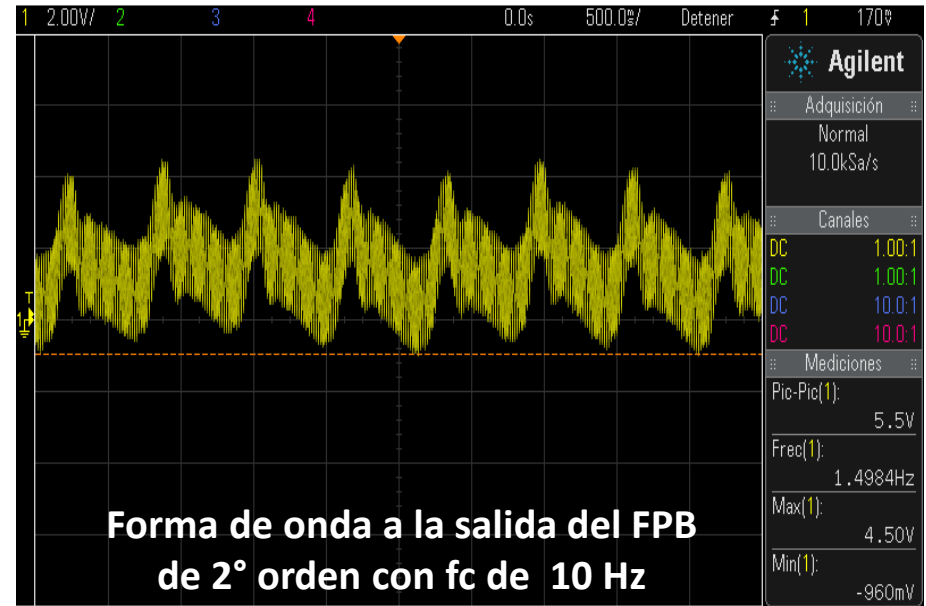
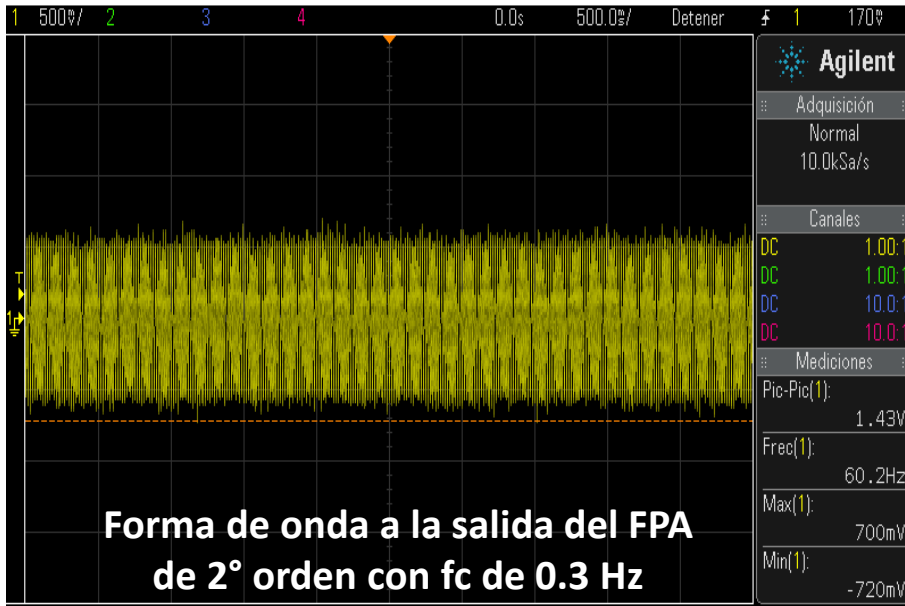


MÓDULO DIDÁCTICO TERMINADO

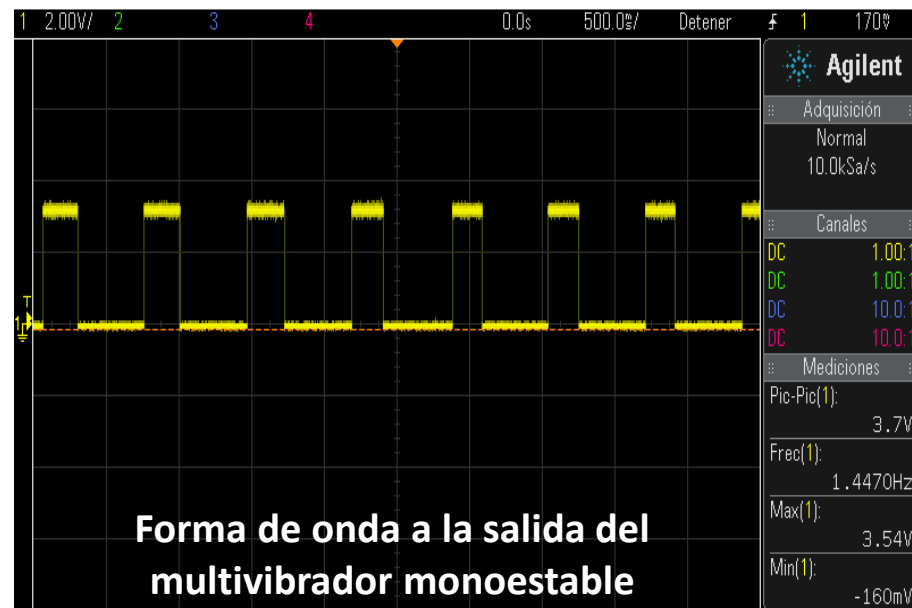
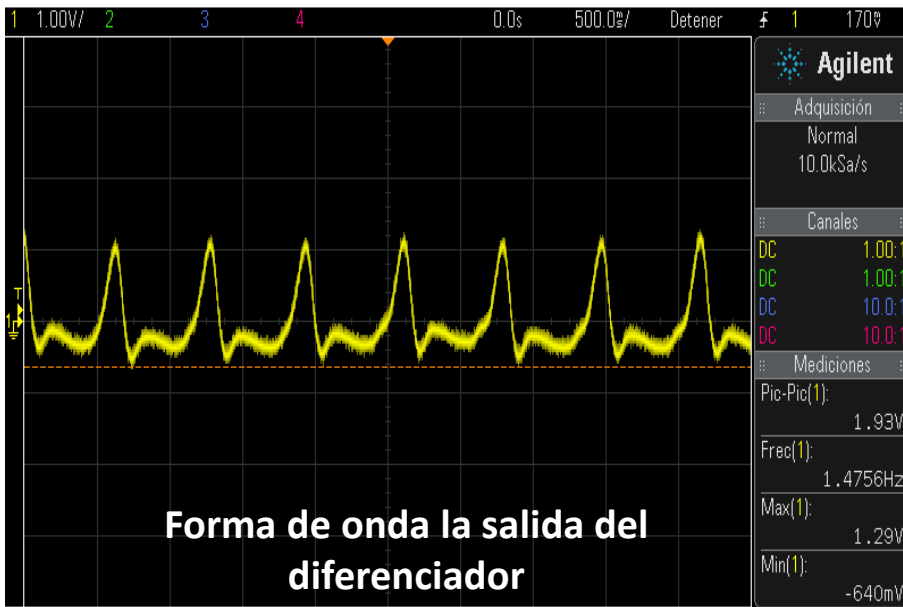
ACH-73006 MÓDULO FOTOPLETISMOGRÁFICO



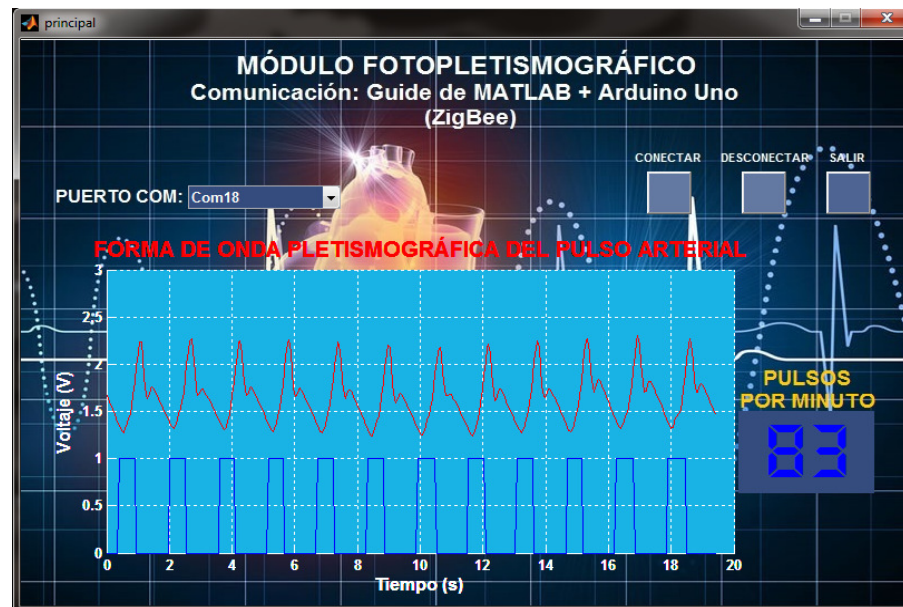
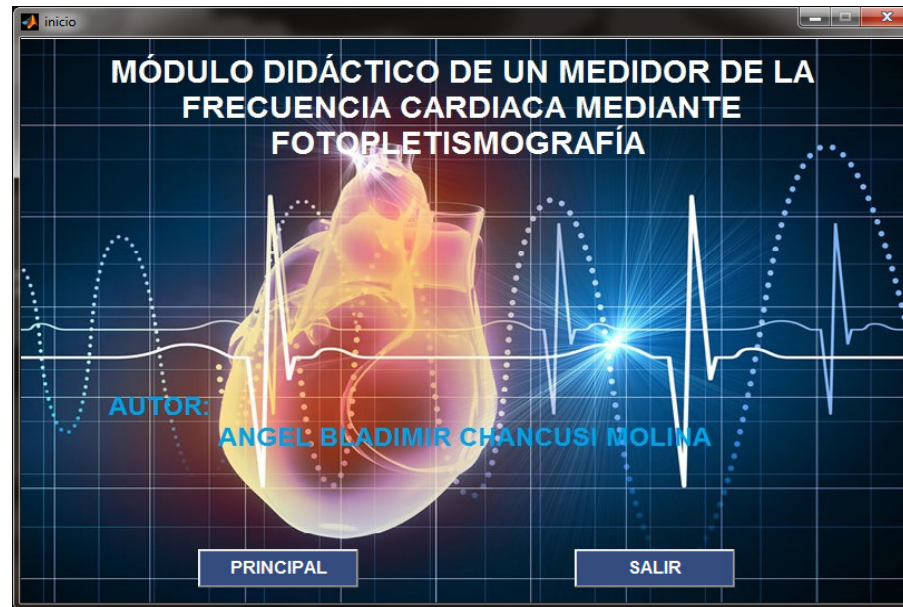
PRUEBAS



PRUEBAS

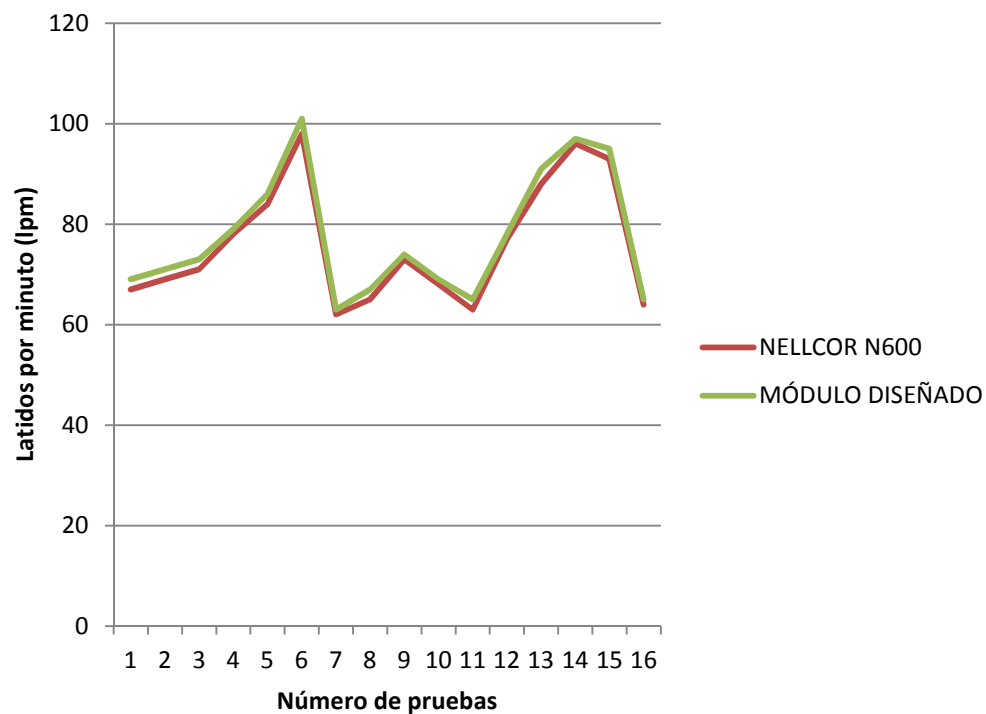


PRUEBAS DE LA GUI



ANÁLISIS DE RESULTADOS

Prueba N°	NELLCOR N600 (lpm)	Equipo Diseñado (lpm)	Error (%)
1	67	69	2,98
2	69	71	2,89
3	71	73	2,81
4	78	79	1,28
5	84	86	2,38
6	98	101	3,06
7	62	63	1,61
8	65	67	3,07
9	73	74	1,36
10	68	69	1,47
11	63	65	3,17
12	77	78	1,29
13	88	91	3,41
14	96	97	1,04
15	93	95	2,15
16	64	65	1,56
PROMEDIO			2,22



ANÁLISIS DE COSTOS

COSTOS DIRECTOS	VALOR	
Materiales Directos		390,05
Circuito impreso	40,00	
Tarjeta Arduino Uno	36,00	
Sensor NELLCOR DS-100A	54,00	
Caja contenedora de acrílico	10,00	
XBee Pro - S1	110,00	
XBee Shield	15,90	
XBee Explorer USB	35,50	
Postes y tuercas	21,00	
Otros componentes electrónicos	60,00	
Imprevistos 2%	7,65	
Materiales Indirectos *		452,68
Fuente de alimentación	15,00	
Computador**	50,00	
Elaboración del programa Informático	300,00	
Taladro*	21,00	
Brocas	5,00	
Luz*	16,80	
Set de juego de herramientas	15,00	
Cautín*	21,00	
Imprevistos 2%	8,88	
Costos Indirectos		105,40
Movilización	100,00	
Internet*	5,40	
Mano de Obra Directa		1360,00
Sueldo ***	1360,00	
TOTAL	2308,12	

CONCLUSIONES

- ✓ Se diseñó e implementó un módulo didáctico fotoplethysmográfico utilizando la técnica de captura por transiluminado, que permite visualizar el valor de la frecuencia cardíaca expresada en pulsos por minuto y la representación gráfica de la forma de onda del pulso arterial mediante una interfaz gráfica de usuario desarrollada en GUIDE de MATLAB; permitiendo una idónea visualización de las señales obtenidas por el prototipo, así como una fácil manipulación por parte del usuario mediante un entorno visual sencillo.
- ✓ Se comprobó con pruebas experimentales que con filtros pasa bajos de segundo y cuarto orden, la forma de onda del pulso arterial no se consiguió disminuir las interferencias de ruido provocado por altas frecuencias.

CONCLUSIONES

- ✓ Se realizó una comparación entre el valor de la frecuencia cardíaca obtenida por el módulo didáctico desarrollado y la obtenida por el equipo NELLCOR N600 a un mismo paciente en reposo, revelando que tiene un porcentaje promedio de error en la medición del 2,22%; por tanto, el módulo es confiable en la monitorización del ritmo cardíaco.
- ✓ El módulo didáctico, ofrece una lectura de la frecuencia cardíaca una vez se ha estabilizado en aproximadamente 5 segundos y la interfaz de usuario dispone de suficientes datos para realizar las tareas requeridas.
- ✓ Al realizar una comparación de costos entre el módulo desarrollado y el equipo comercial NELLCOR N600, se notó beneficio económico del 28% de ahorro.

CONCLUSIONES

- ✓ El módulo permite completar las prácticas que se realizan en el laboratorio.
- ✓ El alcance del monitoreo inalámbrico del módulo didáctico es aplicable dentro de un laboratorio o habitación.

RECOMENDACIONES

- ✓ Se recomienda emplear únicamente sensores de oximetría compatibles con la marca Nellcor; ya que otros sensores tienen diferentes conectores al del DB9.
- ✓ Se sugiere mantener la mano del paciente lo más quieto posible mientras se realizan las mediciones, ya que el movimiento del sensor perjudica en la detección de los latidos cardíacos.
- ✓ Con el propósito de garantizar la detección adecuada de los latidos cardíacos, se recomienda emplear uno de los dedos índices de las manos para la medición; en el caso de que el paciente tenga dedos gruesos, emplear el dedo meñique.

RECOMENDACIONES

- ✓ Ya que no se pudo conseguir circuitos especiales de mayor precisión e inmunes al ruido, es recomendable que se tenga atención en la selección de los dispositivos y su disponibilidad en el mercado nacional, aunque esto lleve al aumento en el costo del proyecto.
- ✓ Si se quiere lograr mayor alcance de monitoreo se recomienda utilizar el XBee del tipo RPSMA y una antena adicional.

GRACIAS