

Capítulo 7. Fuente de alimentación.

Como cualquier aparato electrónico, este electrocardiógrafo requiere una fuente de alimentación eléctrica para su operación. Dicha fuente de alimentación está formada principalmente por una fuente de corriente alterna a corriente directa, un circuito cargador de baterías, una batería recargable, una fuente bipolar (que toma energía de la batería) y un arreglo de relevadores que conmutan la conexión a la batería ya sea para recargarla o para que proporcione energía (**figura 7.1**).

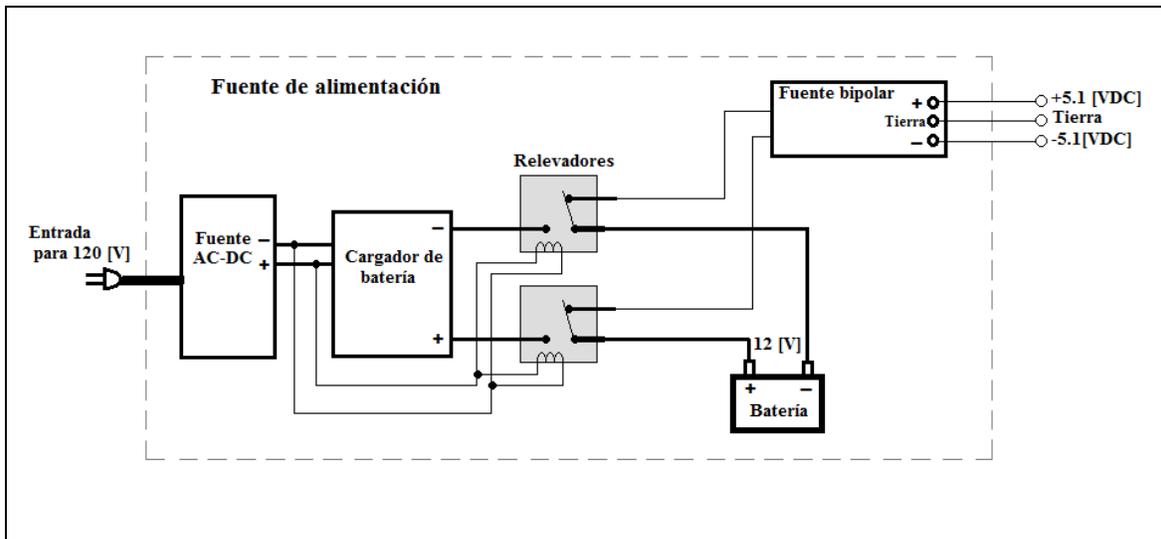


Figura 7.1 Diagrama a bloques de la fuente de alimentación del electrocardiógrafo.

La fuente de corriente alterna a corriente directa convierte $120 [V_{AC}]$ a $18 [V_{DC}]$ y alimenta a un circuito encargado de cargar la batería de $12 [V_{DC}]$, dicho circuito es controlado por el chip UC3906 (fabricado por Unitrode Products de Texas Instruments para recargar baterías de plomo-ácido). El arreglo de un par de relevadores conectan las terminales de la batería hacia el cargador o hacia las tarjetas del electrocardiógrafo dependiendo si se conecta o no el equipo a la línea eléctrica, y finalmente la fuente bipolar de corriente directa proporciona $\pm 5.1 [V_{DC}]$ al tomar energía de la batería de $12 [V]$.

7.1 Baterías recargables.

Una batería es un dispositivo capaz de brindar energía eléctrica, se encuentra formada por un arreglo de células (o celdas) que desarrollan reacciones electroquímicas para generar dicha energía. Básicamente cada célula está formada por dos metales distintos y una solución electrolítica que en conjunto proporcionan una diferencia de potencial eléctrico.

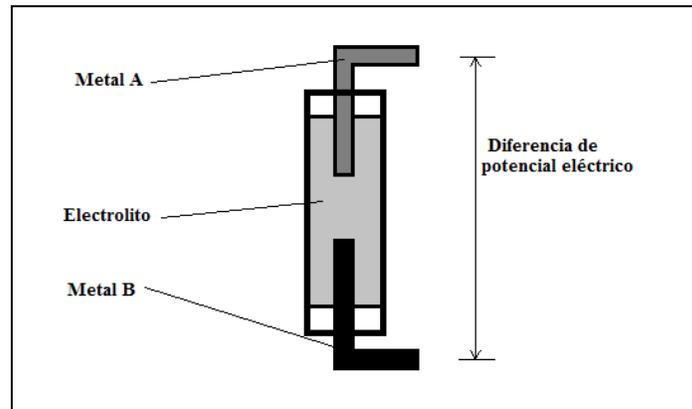


Figura 7.2 Celda eléctrica, elemento básico de una batería.

Las llamadas baterías primarias realizan una reacción electroquímica en sus células que ocurre solamente una vez y después de ello no se pueden volver a utilizar, en las baterías secundarias o mejor conocidas como baterías recargables la reacción electroquímica en sus células es reversible cuando se hace circular una corriente eléctrica a través de ella; es decir, puede pasar por un ciclo de carga y descarga una y otra vez (aunque el número de ciclos es limitado).

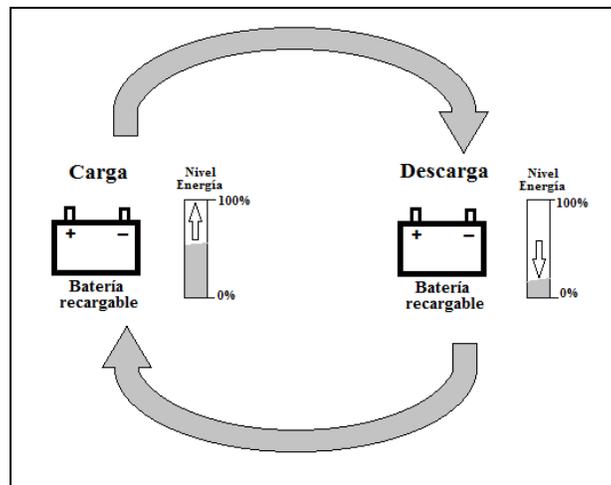


Figura 7.3 Ciclo de carga y descarga de una batería recargable.

Una batería recargable tiene energía disponible y lista para usarse en cualquier momento (siempre y cuando se cargue previamente) y la mayoría de los aparatos médicos las usan por tal razón. Debido a ello se optó por el uso de una batería recargable para energizar al electrocardiógrafo.

Existen diversos materiales con que están hechas las baterías recargables, sin embargo las más populares debido a su costo y larga vida útil (alrededor de 10 años) son las baterías selladas de plomo-ácido (Sealed Lead-Acid: SLA), éstas se conforman a partir de células de 2 [V]. Una batería de este tipo fue empleada en este proyecto y tiene las siguientes características:

Material/Tipo	<i>Plomo-ácido sellada (SLA)</i>
Voltaje nominal	12 [V]
Capacidad	1300 [mAh]
Corriente de carga máxima	0.6 [A] máx.
Voltaje de carga en standby	13.5 [V] a 13.9 [V]
Voltaje de carga	14.0 [V] a 15.0 [V]
Dimensiones	9.7 [cm] x 4.3 [cm] x 5.2 [cm]

Tabla 7.1 Características de la batería recargable utilizada para este proyecto.



Figura 7.4 Batería recargable sellada de plomo – ácido de 12 [V] utilizada para energizar el electrocardiógrafo.

Como ya se mencionó, para recargar la batería se implementó un circuito cargador de baterías basándose en los diagramas de la hoja de datos del chip UC3906, el cual está formado básicamente por comparadores de voltaje.

Se tienen dos modalidades de operación para el chip cargador UC3906 según el fabricante, la primera se llama de “doble nivel flotante” (dual level float) y la segunda “corriente de dos pasos” (dual step current). Cuando una batería contiene muchas células se recomienda la segunda modalidad porque el chip suministra dos valores de corriente que son siempre constantes conforme se incrementa el voltaje en las celdas (esto crea cierta uniformidad de carga en todas las células). Por otra parte cuando una batería contiene relativamente pocas celdas como en el caso de la nuestra (6 celdas x 2[V]= 12[V]) se recomienda la primera modalidad ya que en ella se modifica la

De acuerdo a la hoja de datos se tiene el siguiente procedimiento de diseño:

Ecuaciones de diseño:	Valores calculados:
1) Elegir un valor de I_D comprendido entre 50 $[\mu A]$ y 100 $[\mu A]$, un valor de $I_T \leq 25 [mA]$, así como de I_{MAX} , V_T , V_{OC} y V_F de acuerdo a los requerimientos de la batería.	1) Los valores elegidos* son: $I_D = 80 [\mu A]$ $I_{MAX} = 0.26 A$ $I_T = 20 [mA]$ $V_T = 11.93 [V]$ $V_{OC} = 14.6 [V]$ $V_F = 13.90 [V]$
2) $R_C = \frac{2.3 [V]}{I_D}$	2) $R_C = \frac{2.3 [V]}{80 [\mu A]}$ $R_C = 28.75 [k\Omega]$
3) $R_A + R_B = R_{SUM} = \frac{V_F - 2.3 V}{I_D}$	3) $R_A + R_B = R_{SUM} = \frac{13.90 V - 2.3 V}{80 \mu A}$ $R_{SUM} = 145.0 [k\Omega]$
4) $R_D = \frac{2.3 V - R_{SUM}}{V_{OC} - V_F}$	4) $R_D = \frac{2.3 V - 145.0 [k\Omega]}{14.6 - 13.9 [V]}$ $R_D = 476.42 [k\Omega]$
5) $R_A = (R_{SUM} + R_X) \cdot 1 - \frac{2.3 V}{V_T}$ Donde $R_X = \frac{(R_C)(R_D)}{(R_C + R_D)}$	5) $R_A = (145 [k\Omega] + 27.11 [k\Omega]) \cdot 1 - \frac{2.3 V}{11.3 [V]}$ $R_A = 138.93 [k\Omega]$ Donde $R_X = \frac{(28.75 k\Omega)(476.42 [k\Omega])}{(28.75 k\Omega + 476.42 k\Omega)} = 27.11 [k\Omega]$
6) $R_B = R_{SUM} - R_A$	6) $R_B = (145.0 - 138.93) [k\Omega]$ $R_B = 6.06 [k\Omega]$
7) $R_S = \frac{0.25 [V]}{I_{MAX}}$	7) $R_S = \frac{0.25 [V]}{0.26 [A]}$ $R_S = 0.96 [\Omega]$
8) $R_T = \frac{V_{IN} - V_T - 2.5 [V]}{I_T}$	8) $R_T = \frac{(18.1 - 11.93 - 2.5) [V]}{20 [mA]}$ $R_T = 183.5 [\Omega]$
9) $I_{OCT} = \frac{I_{MAX}}{10}$	9) $I_{OCT} = \frac{0.26 [A]}{10}$ $I_{OCT} = 26 [mA]$

Tabla 7.2 Pasos de diseño para la obtención de valores de los resistores externos del UC3906.

La columna izquierda muestra las ecuaciones de diseño (Fuente: Hoja de datos del UC3906 por Unitrode Products), la columna derecha los cálculos a partir de éstas.

***A continuación se presenta una explicación de cada valor para el inciso 1):**

$I_D = 80 [\mu A]$	Valor elegido "arbitrariamente" del rango recomendado por el fabricante $50 [\mu A] \leq I_D \leq 80 [\mu A]$.
$I_{MAX} = 0.26 A$	$I_{MAX} = \frac{\text{Capacidad de corriente de batería}}{5} = \frac{1300 \text{ mAH}}{5}$ $= 0.26 A$
$I_T = 20 [mA]$	Valor elegido "arbitrariamente" del rango recomendado por el fabricante $I_T \leq 25 [mA]$.
$V_T = 11.93 [V]$	Voltaje cercano e inferior a 12 [V].
$V_{OC} = 14.6 [V]$	Valor contenido en el rango de <i>voltaje de carga</i> de la batería.
$V_F = 13.90 [V]$	Voltaje dentro del intervalo para la carga en "standby" de la batería.

7.2 Fuentes de alimentación de corriente continua.

Como se observa en la **figura 7.1**, la fuente de alimentación del electrocardiógrafo tiene incluida una fuente de AC a DC, ésta convierte el voltaje de 120 [V_{AC}] proveniente de la línea eléctrica a 18 [V_{DC}] suministrándolo al cargador de batería. Está basada en la “clásica” topología de una fuente de alimentación regulada de AC a DC (tratada en la mayoría de la bibliografía referente a dispositivos electrónicos), que consta de una etapa de transformación, rectificación, filtrado y regulación.

Etapa de transformación. Inicialmente se tiene un voltaje $V_{1RMS} = 120$ [V] (para este voltaje y los posteriores el número en el subíndice indica distintas etapas, y las letras si se trata de valor eficaz o valor pico) proveniente de la línea eléctrica y es ingresado al devanado primario de un transformador, las características nominales del transformador utilizado son 120 [V_{AC}] de alimentación en el devanado primario y 24 [V_{AC}] (500 [mA] máx.) de salida en el devanado secundario (**Figura 7.6**).

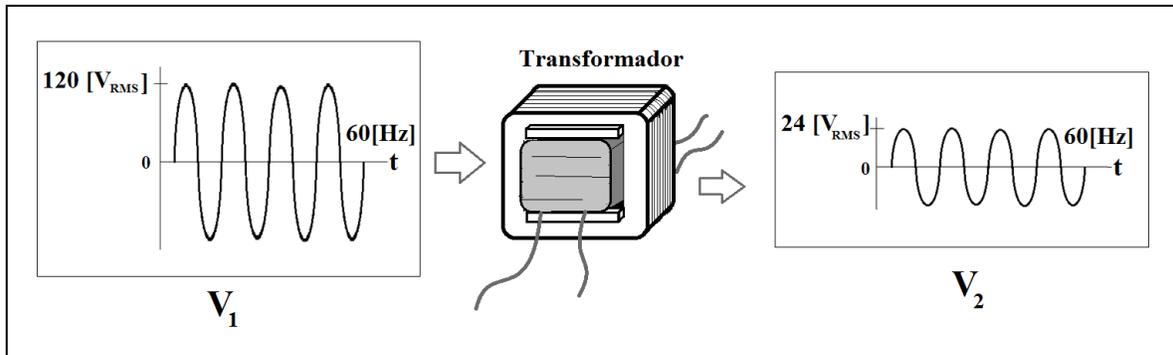


Figura 7.6 Reducción de voltaje de la línea eléctrica por medio de transformador.

entonces

$$V_{2RMS} = 24 [V]$$

Etapa de rectificación. Los 24 [V_{AC}] se entran a un rectificador de onda completa empleando un puente de diodos (**Figura 7.7**). Se eligió el rectificador con puente de diodos porque no requiere tap central en el devanado secundario del transformador como lo requeriría un rectificador de onda completa de dos diodos y porque la frecuencia de la onda de corriente rectificada es el doble que si se usara un rectificador de media onda lo cual mejora el posterior filtrado, así como la regulación de voltaje.

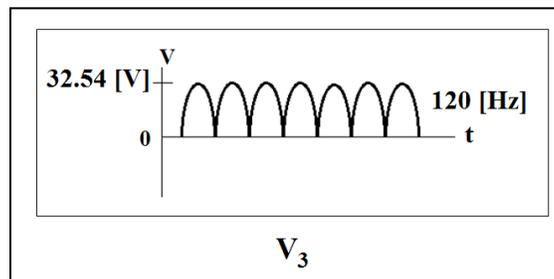


Figura 7.7 Rectificación de la onda de voltaje.

tenemos que en la entrada del puente

$$V_{2pico} = 24 \sqrt{2} = 33.94 \text{ V}$$

y a la salida incluyendo la caída de tensión en los diodos

$$V_{3pico} = (V_{2pico} - 1.4)$$

$$\boxed{V_{3pico} = 32.54 \text{ V}}$$

Etapa de filtrado. Para que la forma de la onda rectificada presente una notablemente menor variación de amplitud (llamada voltaje de rizo) se agrega un capacitor en paralelo a la salida del puente de diodos a esto se le conoce como filtrado de voltaje (**Figura 7.8**).

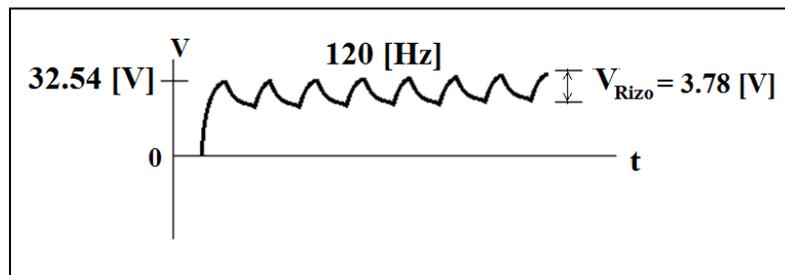


Figura 7.8 Filtrado de la onda de voltaje.

El voltaje de rizo mostrado en la figura se calcula mediante:

$$V_{rizo} = \frac{(I)(\tau)}{C}$$

donde:

V_{rizo} : Voltaje de rizo.

I : Corriente máxima que demanda la siguiente etapa (regulación).

τ : Periodo de la onda (para 120 [Hz] el periodo es de 8.33 [ms]).

C : Capacitancia.

la corriente que consume la siguiente etapa (I) es la suma de la corriente que será aplicada a la batería para cargarla (pág. 93) y la corriente que consume propiamente el regulador (9.5 [mA] de la hoja de datos), entonces:

$$I = 260 \text{ [mA]} + 9.5 \text{ [mA]}$$

$$I = 269 \text{ [mA]}$$

el valor elegido de capacitancia fue $C = 1000 \text{ [}\mu\text{F]}$, por lo que al sustituir valores:

$$V_{rizo} = \frac{(269 \times 10^{-3})(8.33 \times 10^{-3})}{1000 \times 10^{-6}}$$

$$\boxed{V_{rizo} = 2.24 \text{ [V]}}$$

y el voltaje V_3 en DC obtenido en la etapa de filtrado fue

$$V_{3DC} = V_{3pico} - \frac{V_{rizo}}{2}$$

$$V_{3DC} = 32.54 - \frac{2.24}{2}$$

$$\boxed{V_{3dc} = 31.42 [V]}$$

Este último voltaje es el que se ingresa a la entrada de la etapa de regulación.

Etapa de regulación. Para disminuir considerablemente el voltaje de rizo obteniendo prácticamente un voltaje constante en la salida de nuestra fuente de alimentación AC-DC (**Figura 7.9**) se colocó un dispositivo regulador de voltaje encapsulado de tres terminales LM7818 que acepta un voltaje máximo de entrada de 35 [V] y que entrega a su salida 18 [V] regulados.

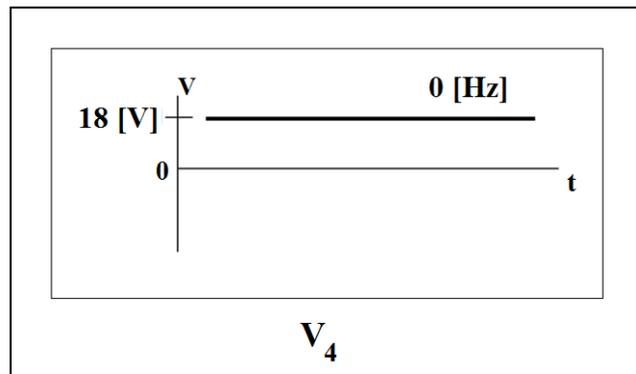


Figura 7.9 Señal de voltaje regulada.

entonces:

$$\boxed{V_4 = 18 [V_{dc}]}$$

Este voltaje en DC alimenta al cargador de batería explicado ya en este capítulo.

7.3 Fuente bipolar

La fuente bipolar también forma parte de la tarjeta de alimentación y energiza al electrocardiógrafo cuando es requerido para realizar un estudio. Esta fuente convierte los 12 [V_{DC}] de la batería en ± 5.1 [V_{DC}].

El voltaje bipolar simétrico de la fuente es obtenido a partir de una sola batería utilizando un amplificador operacional de potencia L165 configurado como seguidor de voltaje (**Figura 7.10**). Para crear la referencia (tierra) de la fuente bipolar se conectó el terminal no inversor del operacional a un divisor de voltaje simétrico entre las terminales de la batería. El voltaje positivo y negativo respecto a la referencia creada se toman de las propias terminales de la batería, obteniendo así ± 6 [V_{DC}].

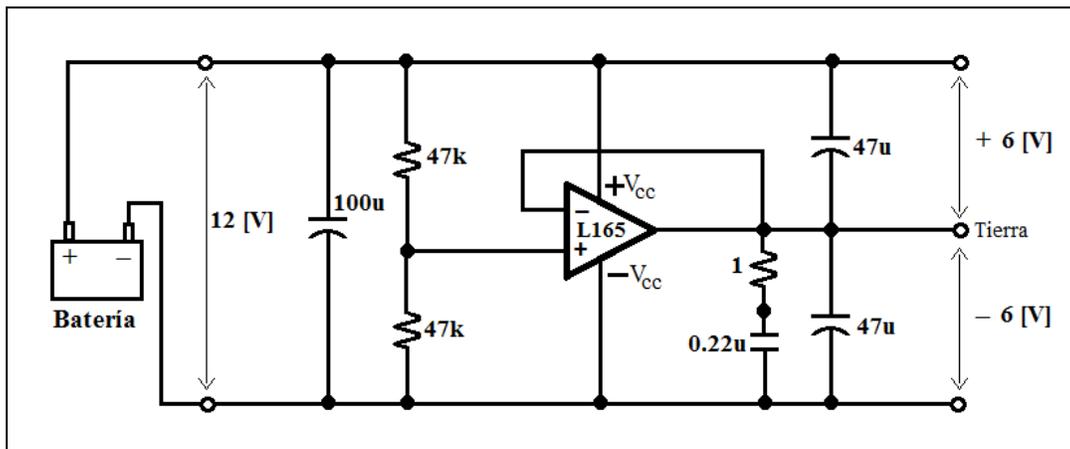


Figura 7.10 Obtención de un voltaje bipolar simétrico a partir de una batería por medio de un amplificador operacional de potencia L165.

Fuente: Basado en circuito de aplicación recomendado para el L165 encontrado en hoja de datos del fabricante ST.

Dado que el PIC16F877A y el display LCD de 2x16 (*capítulo 2*) requieren un voltaje máximo de alimentación de 5.5 [V_{DC}], se optó porque los ± 6 [V_{DC}] que brinda la fuente bipolar fueran reducidos a ± 5.1 [V_{DC}] y se alimentara con este voltaje a todos los circuitos del electrocardiógrafo. Para ello se agregó un diodo zener de 5.1 [V] en cada polaridad de voltaje:

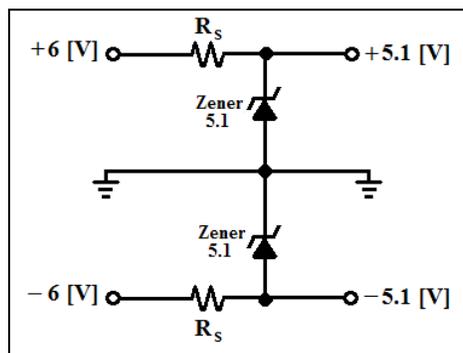


Figura 7.11 Conexión de diodos zener para la fuente bipolar

Por lo tanto se calculó la resistencia de potencia en serie R_s cuyo valor debe estar entre R_{smin} y $R_{sMÁX}$ mediante las expresiones:

$$R_{smin} = \frac{V_s - V_z}{I_{ZM}} \quad y \quad R_{sMÁX} = \frac{V_s - V_z}{I_{LMÁX} - I_{ZK}}$$

donde:

$I_{LMÁX}$: Es la máxima corriente consumida por todas las tarjetas del electrocardiógrafo y se calculó consultando las hojas de datos de cada chip.

$$I_{LMÁX} = 96 \text{ mA}$$

I_{ZK} : Mínima corriente a través del diodo zener para que pueda regular el voltaje.

$$I_{ZK} = 1 \text{ [mA]}$$

I_{ZM} : Máxima corriente que soporta el diodo zener sin destruirse.

$$I_{ZM} = 178 \text{ [mA]}$$

entonces sustituyendo valores:

$$R_{smin} = \frac{6 - 5.1}{178 \times 10^{-3}}$$

$$R_{smin} = 5.05 \text{ } [\Omega]$$

$$R_{sMÁX} = \frac{6 - 5.1}{96 - 1 \times 10^{-3}}$$

$$R_{sMÁX} = 9.47 \text{ } [\Omega]$$

Un valor de resistencia comercial que se encuentra dentro de estos dos valores es:

$$R_s = 5.6 \text{ } \Omega$$

y fue adquirida con potencia de 1 [W] para que estuviera sobrada a la potencia que disipa:

$$P_s = (R_s)(I_s^2)$$

$$P_s = 5.6 \text{ } [(178 + 96) \times 10^{-3}]^2$$

$$P_s = 0.42 \text{ } [W] \quad (\text{potencia disipada en la resistencia en serie al diodo zener } R_s)$$

De acuerdo a los cálculos realizados, el diagrama eléctrico y circuito impreso de la tarjeta de alimentación completa es:

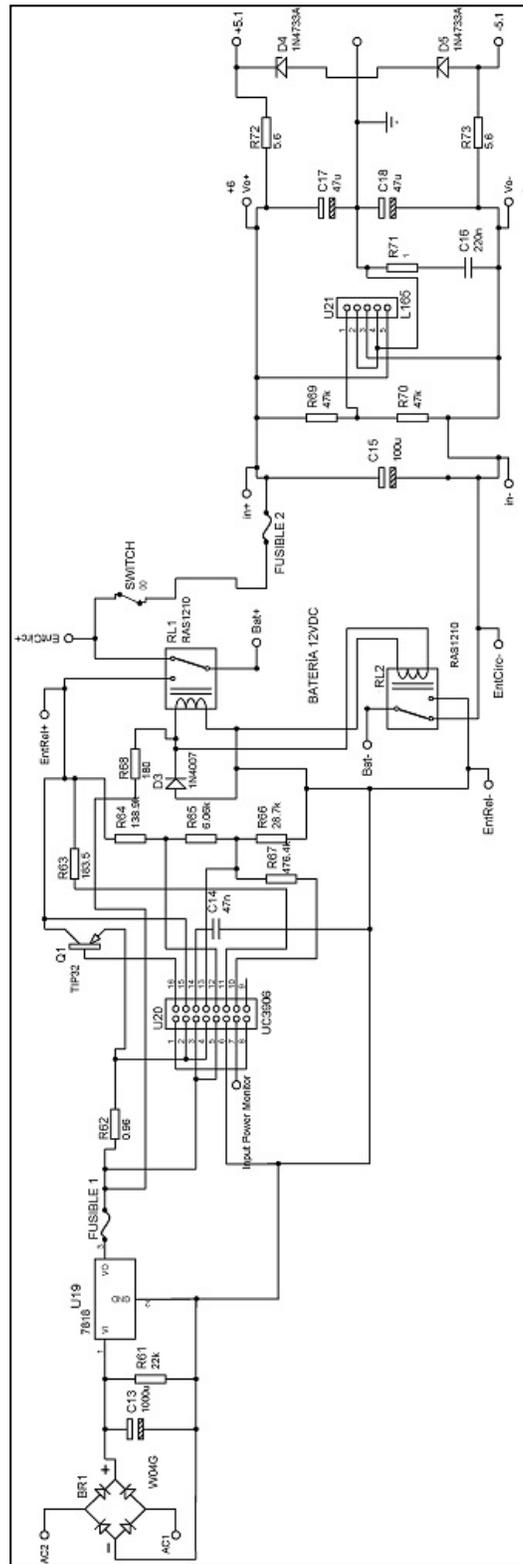


Figura 7.12 Diagrama eléctrico de la tarjeta de la fuente de alimentación completa.

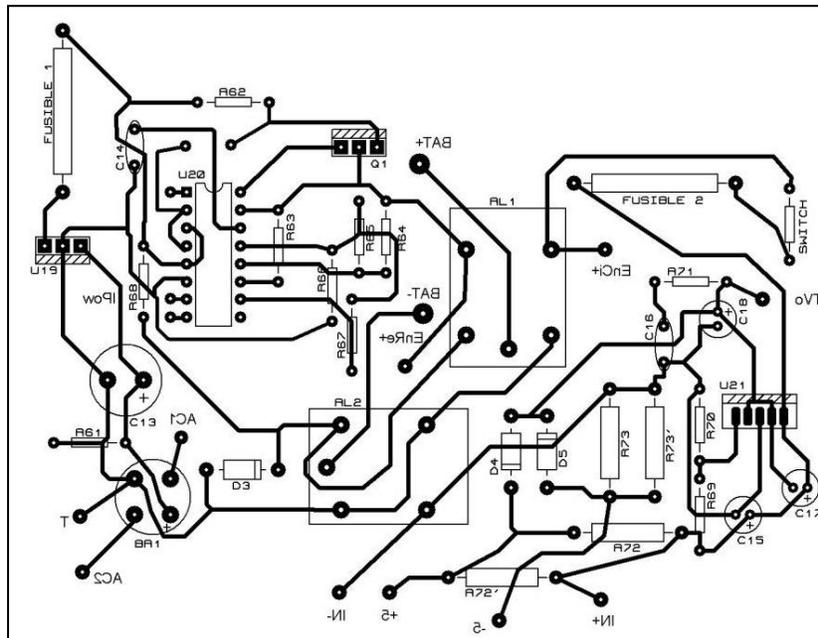


Figura 7.13 Circuito impreso de la tarjeta de la fuente de alimentación completa. Los bornes AC2 y AC1 del puente de diodos reciben las terminales del devanado secundario del transformador que por motivos de espacio se colocó fuera de la tarjeta.

Adicionalmente, como cortesía para el usuario se diseñó y construyó una tarjeta electrónica que controla el encendido/apagado de cuatro LED's con el objetivo de indicar información referente a la energía de la batería del electrocardiógrafo. Cada LED iluminado indica una cosa en particular: el encendido del electrocardiógrafo ("ON"), nivel bajo de energía en la batería ("Batería baja"), si el aparato está enchufado a la línea eléctrica ("Cargando batería") y por último si la batería está cargada totalmente ("Batería cargada"). Los colores de cada diodo luminoso y su ubicación en el chasis del aparato se observan a continuación:

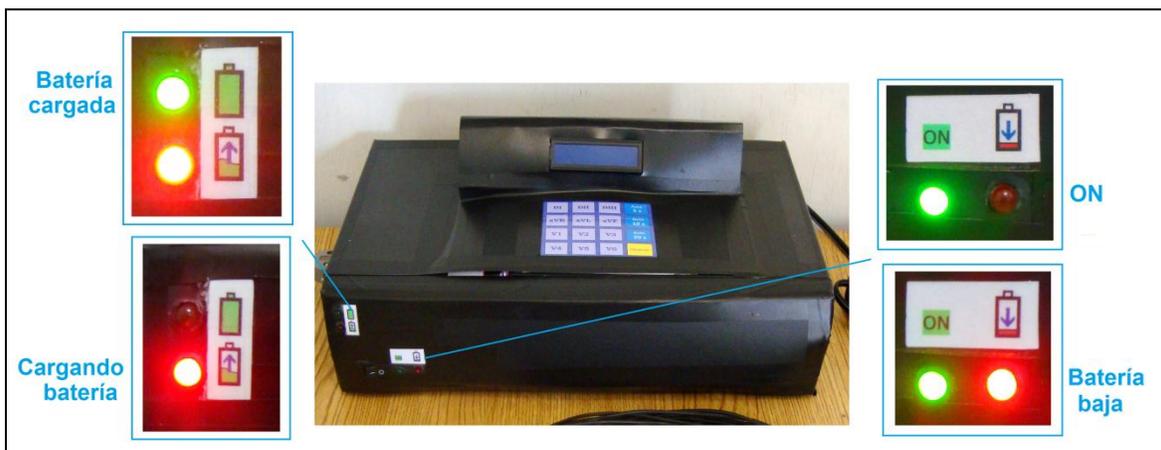


Figura 7.14 LED's indicadores de energía en el electrocardiógrafo.

El diagrama eléctrico de la tarjeta indicadora de energía y su circuito impreso son:

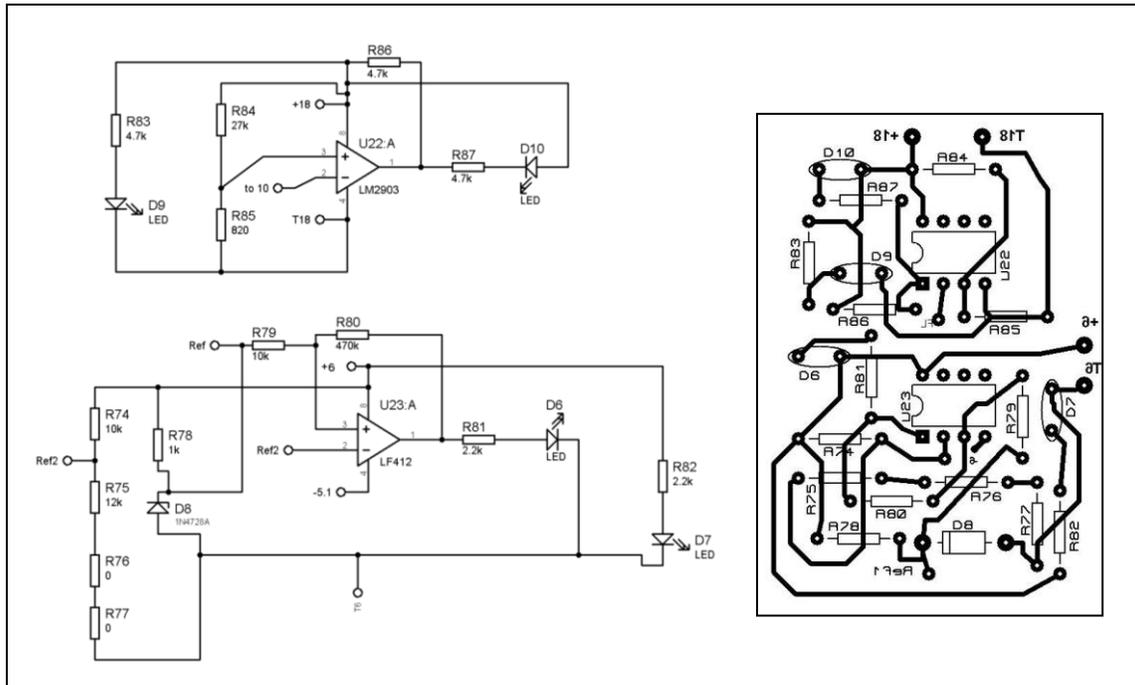


Figura 7.15 Diagrama eléctrico y circuito impreso de la tarjeta indicadora de energía.

Como se observa, en la tarjeta se tienen dos circuitos independientes que están asociados cada uno a dos LED's.

El circuito en la parte superior del diagrama eléctrico es un comparador de voltaje inversor sencillo que enciende al LED "D10" cuando se supera el voltaje del divisor de tensión. Vemos que la entrada negativa del operacional va conectada al pin 10 del UC3906 que registra aproximadamente 1 [V] cuando la batería está cargada completamente; por lo tanto para que el comparador funcione se debe tener un voltaje inferior a 1 [V] en el divisor. Con base en la experiencia sobre divisores de voltaje se eligió que $R85=820\ [\Omega]$ y $R86=27\ [k\Omega]$ resultando 0.53 [V] en la entrada positiva del comparador cumpliendo así el objetivo.

En este mismo circuito el LED "D9" está conectado al voltaje de alimentación del comparador (18 [V]) el cual es el mismo que alimenta al cargador de batería, por tal razón se enciende siempre que la batería se está cargando.

Por otra parte, el circuito de la parte inferior es un comparador de voltaje inversor con histéresis que trabaja cuando el electrocardiógrafo está encendido (registrando ECG). El LED marcado como "D7" simplemente se conectó a la alimentación del comparador (proveniente de la batería) por lo que siempre está iluminado mientras el aparato esté funcionando (indicación de "ON"); ahora bien, el LED "D6" está controlado por el comparador que toma un nivel de referencia de voltaje dado por el diodo zener y lo compara con el voltaje del divisor de tensión que varía dependiendo de la energía en la batería.

Para explicar la obtención de valores de los componentes que forman parte del comparador mencionado se usará la **figura 7.16** donde se tiene al comparador, gráficas de voltaje de entrada y salida, así como las expresiones matemáticas que determinan el comportamiento del circuito en función de algunos parámetros (cabe mencionar que por comodidad se cambió la nomenclatura de las resistencias).

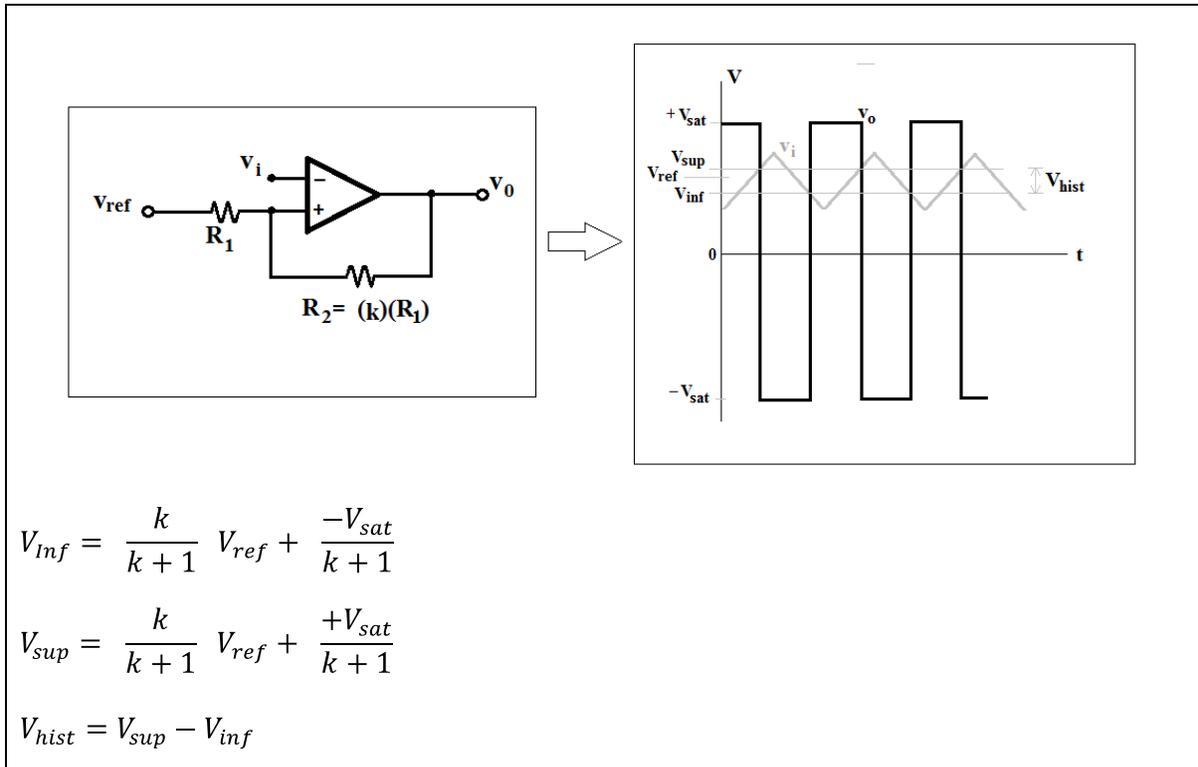


Figura 7.16 Diagrama eléctrico, señales y expresiones para un comparador de voltaje inversor con histéresis.

Fuente: Figura basada en diagramas y expresiones presentados por Coughlin, Robert F. y Frederick F. Driscoll, 1993, *Amplificadores Operacionales y circuitos integrados lineales*, p.91, 92.

En base a la anterior figura el valor de la resistencia de retroalimentación “ R_2 ” es “ k ” veces el valor de la resistencia de entrada “ R_1 ”, entonces el objetivo es encontrar un valor de “ k ” que satisfaga los valores de voltaje requeridos. Los valores de interés en este caso son los del voltaje inferior que es cuando la batería se descarga y el voltaje de referencia que corresponde al voltaje nominal de la batería.

Tenemos que en diodo zener hay un voltaje $V_{ref}=3.3$ [V] (a éste se asignó una correspondencia con los 12.1 [V] nominales de la batería, arrojando un factor de escalamiento de 3.67 veces) y considerando 11.6 [V] en la batería como un nivel de descarga (y aplicando el mismo factor de escalamiento) se obtuvo $V_{inf}=3.16$ [V]. Despejando a “ k ” y sustituyendo valores de la expresión para el voltaje inferior:

$$k = \frac{-V_{sat} - V_{inf}}{V_{inf} - V_{ref}}$$

$$k = \frac{-4 - 3.16}{3.16 - 3.3}$$

$$\boxed{k = 51.14}$$

conociendo a “k” se eligió que $R_2 = 470 \text{ [k}\Omega\text{]}$, entonces

$$R_1 = \frac{R_2}{k}$$

$$R_1 = \frac{470 \times 10^3}{51.14}$$

$$\boxed{R_1 = 9.19 \text{ k}\Omega}$$

en la tarjeta se colocó el resistor de valor comercial más cercano quedando

$$R_1 = 10 \text{ k}\Omega$$

Asimismo sustituyendo valores para conocer el voltaje superior y por lo tanto el de histéresis:

$$V_{sup} = \frac{51.14}{51.14 + 1} (3.3) + \frac{+4}{51.14 + 1}$$

$$\boxed{V_{sup} = 3.31 \text{ [V]}}$$

$$V_{hist} = V_{sup} - V_{inf}$$

$$\boxed{V_{hist} = 0.15 \text{ [V]}}$$

Siguiendo con los cálculos para el divisor de tensión de este circuito (parte inferior de la **figura 7.15**), y auxiliándonos en la **figura 7.17** se tiene que el voltaje v_i es el mismo de la fuente bipolar (antes del zener de 5.1 [V]) y por lo tanto éste cambia a la par que el voltaje de la batería. Se propuso que el v_{div} debería ser igual o mayor a $V_{sup} = 3.31$ [V] para que la batería fuera considerada con suficiente energía, por lo tanto los resistores se calcularon para un $v_i = 6.07$ [V] (resultado de multiplicar $(3.31 \text{ [V]})(3.67) = 12.14$ [V] y tomar la mitad dado que pasa por el L165 de la fuente bipolar).

El divisor se representa en la siguiente figura:

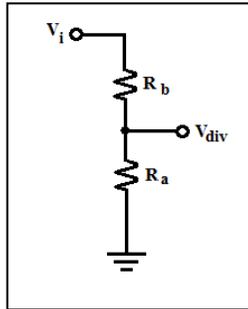


Figura 7.17 Divisor de voltaje utilizado en el comparador con histéresis de la figura 7.15.

y tenemos que

$$v_{div} = \frac{R_a}{R_a + R_b} v_i$$

al despejar a R_a se tiene

$$R_a = \frac{-(v_{div})(R_b)}{(v_{div} - v_i)}$$

proponiendo una $R_b = 10 \text{ [k}\Omega\text{]}$ y sustituyendo valores

$$R_a = \frac{-3.31 (10000)}{(3.31 - 6.07)}$$

$$\boxed{R_a = 11.99 \text{ [k}\Omega\text{]}}$$

por consiguiente se tomó el valor comercial más similar

$$R_a = 12 \text{ [k}\Omega\text{]}$$