

Diseño de un circuito para medición y supervisión de la frecuencia en sistemas de generación autónoma

Uriel A. Vera ^{a*}, Andrés K. Viera ^a, Juan P. Gross ^b, Guillermo A. Fernández ^b

^a *Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Oberá, Misiones, Argentina.*

^b *GID-IE, FI-UNaM, Oberá, Misiones, Argentina.*

Juan Manuel de Rosas 325, Oberá, Misiones, Argentina

uriel.vera.tec@gmail.com, andres.k.viera@hotmail.com, gross@fio.unam.edu.ar, fernandez@fio.unam.edu.ar

Resumen

El siguiente trabajo expone las tareas realizadas en una actividad integradora de la signatura Técnicas Digitales 1, correspondiente a la carrera Ingeniería Electrónica. En la misma se plantea como consigna el diseño un circuito electrónico digital para la medición y supervisión de frecuencia en sistemas de generación autónoma. El objetivo de la actividad es integrar los saberes abordados en la asignatura, articulándolos con temáticas de otras asignaturas anteriores de la carrera, para la resolución de una situación problemática real. La metodología planteada en la actividad, expuesta en este trabajo, se basa en el planteo de dos circuitos digitales tentativos como solución de la problemática sugerida, el análisis de pros/contras para seleccionar la mejor opción de implementación práctica, el diseño del circuito seleccionado y la validación de su funcionamiento mediante simulación. Los resultados obtenidos en esta última etapa de la actividad, demuestran que, mediante los conocimientos aplicados, se ha llegado a una solución que cumple con las especificaciones solicitadas. Esto comprueba que la realización de actividades integradoras como esta, resultan de suma importancia para el desarrollo de competencias orientadas al diseño de circuitos digitales, necesarias para la resolución de problemas que podrán abordar los estudiantes como futuros profesionales de la Ingeniería Electrónica.

Palabras Clave – *Generación autónoma, frecuencia, medición, supervisión, circuito digital.*

1. Introducción

El siguiente artículo expone los procedimientos, cálculos, estrategias y consideraciones utilizados durante el diseño de un circuito destinado a la medición de frecuencia de red, en sistemas de generación autónoma. Este circuito se desarrolló como trabajo integrador de la asignatura Técnicas Digitales 1, perteneciente a la carrera de Ingeniería Electrónica, de la Facultad de Ingeniería de Oberá.

La frecuencia de la red eléctrica es un parámetro de vital importancia para en la generación y uso de la energía eléctrica. Los diversos equipos conectados a la red, pueden utilizar la frecuencia como fuente de sincronismo además de permitir el correcto funcionamiento de las cargas de naturaleza inductiva y capacitiva.

La actividad integradora plantea el diseño de un circuito digital orientado a la medición y supervisión de la frecuencia correspondiente a la tensión entregada por un sistema de generación autónomo. La frecuencia debe mostrarse en un display de LEDs conformado por tres dígitos (uno de ellos para la parte decimal) mientras que, en la función de supervisión, el circuito debe detectar cuando la frecuencia se encuentra fuera del rango comprendido entre 48,5 Hz y 51,5Hz. Para dar solución a esta problemática, en el presente trabajo se proponen dos alternativas que resuelven el problema planteado. La primera de ellas se basa en la conversión frecuencia-tensión, utilizando el circuito integrado dedicado LM2907, mientras que la visualización de la frecuencia medida es realizada mediante displays de LEDs manejados por un conversor analógico-digital TC7107 que posee salida directa para manejar este tipo de visualizadores. La segunda solución es implementada a través de un circuito digital, cuyo funcionamiento se basa en el conteo de pulsos durante cada período de la tensión de red. Para esto, dicho circuito utiliza circuitos integrados contadores y comparadores de magnitud binarios.

En los siguientes apartados se detalla el funcionamiento de cada solución propuesta, explicándose el funcionamiento de ambas opciones y presentándose las consideraciones tomadas en cuenta para elegir la opción más adecuada de implementar en la práctica. Prosiguiendo van los cálculos requeridos en el procedimiento de diseño y los resultados de simulación que valida el funcionamiento del circuito seleccionado. Finalmente se expresan las conclusiones obtenidas a partir del desarrollo de la actividad integradora.

2. Circuitos propuestos

Para dar solución a la problemática indicada en la actividad integradora, seguidamente se describe el funcionamiento de los circuitos digitales propuestos que permiten medir y supervisar la frecuencia de la tensión entregada en un sistema de generación autónomo.

2.1. Circuito con técnica de conversión de frecuencia a tensión (CFT)

La Fig. 1 muestra el diagrama de bloques que representa a este circuito digital. En el mismo, la fuente de alimentación no solo provee de energía al circuito, sino que también a través de su transformador se obtiene una muestra de la tensión generada para utilizarla en la medición de frecuencia. Esto presenta la ventaja de proporcionar protección debido a la aislación galvánica entre

el circuito de potencia y el de medición. Dicha muestra de tensión se rectifica, aísla ópticamente y filtra antes de ingresar al circuito integrado LM2907, encargado de convertir la señal en un valor de tensión continua proporcional a la frecuencia [1].

Como se observa en la Fig. 1, la tensión continua obtenida a la salida del LM2907, es convertida en un valor digital binario decimal por medio del conversor analógico/digital TC7107 [2], cuya salida maneja directamente el display permitiendo visualizar la frecuencia medida en una pantalla de 3 dígitos (del tipo LED de 7 segmentos).

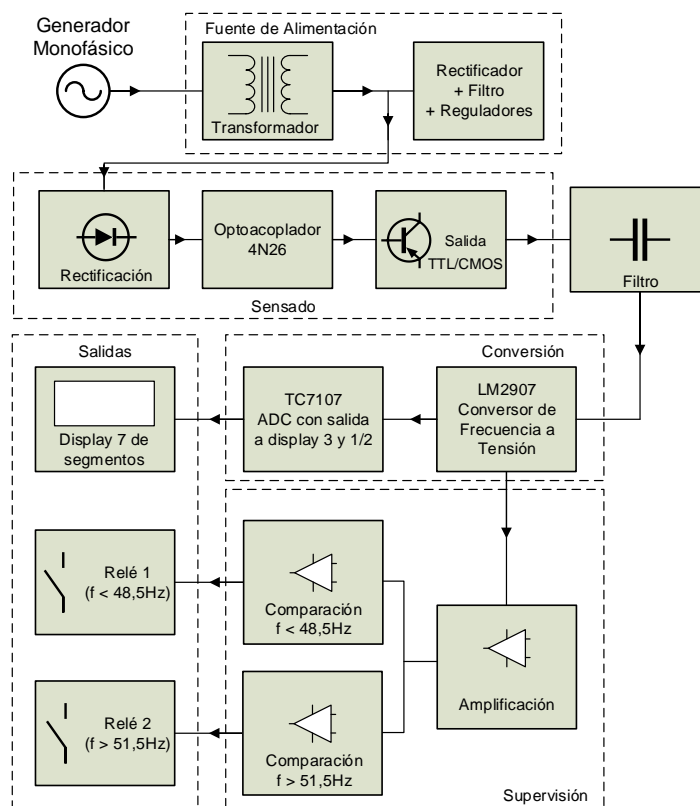


Fig. 1. Diagrama de bloques del circuito para medición y supervisión de frecuencia mediante conversión de frecuencia a tensión (FCFT).

Según puede observarse en el diagrama de la Fig. 1, la tensión continua que proporciona el convertidor de frecuencia a tensión, también es amplificada y procesada por medio de comparadores de tensión, para determinar si la frecuencia de red se encuentra fuera del rango establecido y actuar sobre las salidas de relé en consecuencia para que a través de los mismo pueda actuarse.

2.2. Circuito con técnica de conteo de pulsos (FCCP)

La Fig. 2 muestra el diagrama de bloques representativo de este circuito. La fuente de alimentación permite energizar todas las etapas del circuito a partir de la tensión generada. La etapa

de sensado toma una muestra de la tensión de generada para obtener el periodo de la misma. Esta etapa cuenta con protecciones y aislamiento eléctrico (en forma óptica) del resto del circuito.

La señal de período de la tensión generada que proviene del sensado, pasa por una etapa de procesamiento donde se determinada una cantidad de períodos por segundo habilita el conteo de pulsos provenientes de una señal de reloj utilizada como patrón, generada a partir de un multivibrador astable. De esta forma, la cantidad de pulsos contados en un segundo, es directamente proporcional a frecuencia de la tensión generada. A modo de ejemplo, para una frecuencia normal de 50 Hz en la tensión generada, el contador se habilita 50 veces dando una cuenta de 500 pulsos, que corresponde a una indicación de 50,0 Hz. Cabe mencionar que el contador está conformado por tres contadores de décadas con salida binaria codificada en decimal (BCD), conectados en cascada [3].

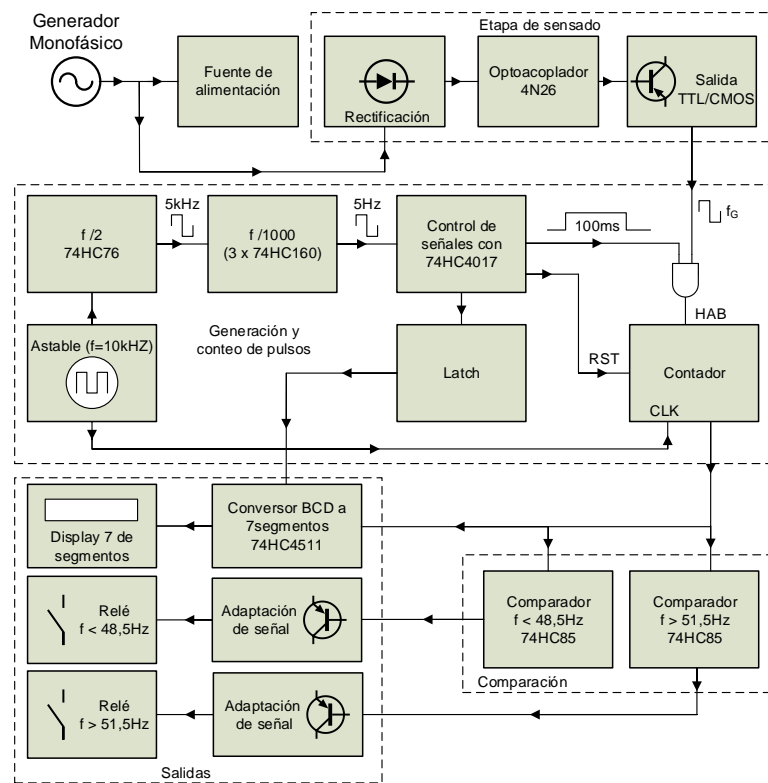


Fig. 2. Diagrama de bloques del circuito para medición y supervisión de frecuencia mediante conteo de pulsos (FCCP).

La supervisión de la frecuencia que posee la tensión generada, como se muestra en la Fig. 2, es implementada comparando la cuenta binaria entregada por el contador. Esta operación la efectúa dos comparadores digitales, los cuales permiten obtener las señales que activan los relés correspondientes a frecuencia menor a 48,5 Hz y mayor a 51,5 Hz. Por último, para visualizar la frecuencia medida, cada código BCD proporcionado por el contador, pasa a través de un decodificador que enciende los LEDs de cada display que posee el visualizador del circuito.

2.3. Selección de la propuesta

Las consideraciones correspondientes para realizar la elección del circuito con sus respectivas fundamentaciones son las siguientes:

- **Exactitud:** A partir de la simulación, se analiza la proximidad de la frecuencia medida con respecto al valor verdadero de frecuencia, tomando la frecuencia normal de 50 Hz. En este punto el primer circuito (FCFT) ofrece una mayor capacidad para efectuar la medición, debido a que posee una diferencia menor en la medición que el circuito FCCP. Este último posee una variación considerablemente mayor para las mediciones efectuadas. Entonces, en cuanto a exactitud, el circuito FCFT es el más apropiado.
- **Estabilidad en la indicación:** El circuito FCFT posee una indicación estable donde solamente varía el dígito decimal. En cuanto a la estabilidad en la indicación del circuito FCCP, la misma se aprecia inestable, debiéndose esto a la iteración que efectúa el circuito para realizar la medición.
- **Cantidad de componentes:** Se analiza que para todo circuito electrónico siempre es mejor que la cantidad de circuitos integrados (CIs) y componentes pasivos sea lo menor posible, siempre y cuando el funcionamiento del circuito sea el apropiado. Una menor cantidad de CIs y componentes implica menor cantidad de posibles puntos de falla. El circuito FCCP, al poseer componentes que trabajan solamente con cantidades digitales, utiliza una cantidad de dispositivos notablemente mayor que el circuito FCFT (en su mayoría circuitos integrados). Esto no solo incrementa la probabilidad de fallas en el circuito, sino que también incrementa la complejidad del mismo en su fabricación.
- **Consumo de energía:** Se busca que la aplicación seleccionada ofrezca un bajo consumo energético, el cual proviene de un circuito simple, con la menor cantidad de componentes posibles, disminuyendo así el consumo de corriente del mismo. Nuevamente en este punto, debido a lo analizado, circuito FCFT es más apropiado.

A partir de lo analizado en los puntos anteriores, es evidente que la mejor opción para la implementación práctica es el circuito que utiliza la técnica de conversión de frecuencia a tensión. Seguidamente se muestra el diseño de las etapas más importantes del mismo.

3. Diseño del circuito

3.1. Etapa de conversión frecuencia a tensión

Esta etapa del circuito se basa en el integrado LM2907, que es un convertidor de frecuencia a tensión. La Fig. 3 muestra el esquema de conexión que propone el fabricante para este dispositivo.

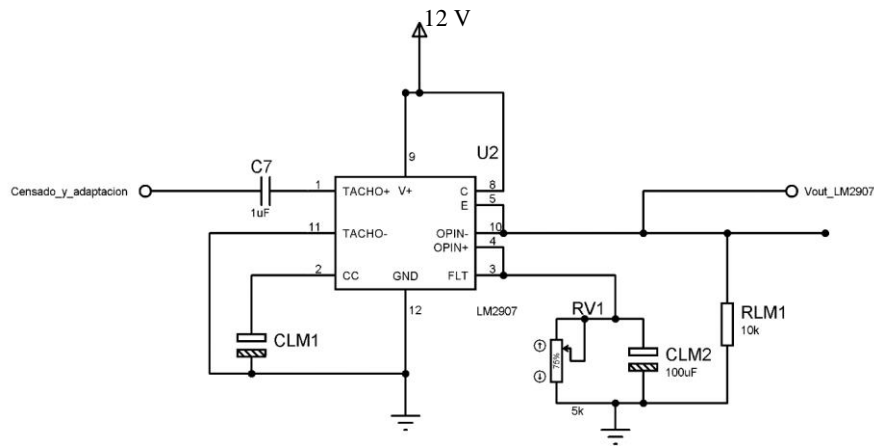


Fig.3. Diagrama de conexión para el LM2907.

Atendiendo a las consideraciones de operación requeridas, el fabricante dispone en la hoja de datos del LM2907 las siguientes ecuaciones de diseño, vinculadas los componentes mostrados en el diagrama de la Fig. 3 [4].

$$R_{VI} \leq \frac{0,6 V}{150 \mu A} ; C_{LMI} = \frac{V_{3Fs}}{R_{VI} \cdot V_{CC} \cdot F_{Fs}} \quad (1)$$

En (1) la tensión V_{3Fs} es el valor que se espera tener en la salida del integrado con la mayor frecuencia F_{Fs} en la señal de entrada. Considerando $V_{CC} = 12 V$ y $V_{3Fs} = 0,6 V$ para $F_{Fs} = 60 Hz$, se obtiene: $R_{VI} = 3,9 k\Omega/0,25 W$ y $C_{LMI} = 180 nF/50 V$ (cerámico).

Para el capacitor C_{LM2} , el fabricante propone un valor de $1 \mu F$. Debido a que esto implica un valor de rizado alto en la tensión de salida del LM2907, se selecciona $C_{LM2} = 100 \mu F/ 25 V$ (electrolítico). En el caso del resistor R_{LMI} el fabricante recomienda un valor de $10 k\Omega/0,25W$.

3.2. Etapa de supervisión de frecuencia

Esta etapa del circuito posee una amplificación de señal y la comparación para detectar los niveles de tensión asociados a los límites del rango de frecuencia. Como la tensión de salida del LM2907 posee niveles bajos para ser comparados, la señal proporcionada por este dispositivo es amplificada utilizándose un amplificador no inversor de ganancia $K = 10$. Este amplificador es implementado utilizando un amplificador operacional LM324, como lo muestra la Fig. 4. Considerando la ganancia mencionada, la relación entre los resistores del amplificador en configuración no inversora se calcula con (2) [5].

$$K = \left(\frac{R_f}{R_g} + 1 \right) \rightarrow R_f = 9 R_g \quad (2)$$

La tensión de salida de la etapa de amplificación, es comparada a través de dos comparadores de tensión con histéresis, uno inversor y otro no inversor. Estos comparadores generan las señales

encargadas de activar los relés usados para indicar cuando la frecuencia de la tensión generada se encuentra fuera del rango 48,5 Hz - 51,5 Hz.

La ecuación (3) corresponde al diseño del comparador inversor, la misma relaciona la ventana de histéresis ΔH en la comparación con la tensión de salida del comparador V_o (en alto) y los resistores R_1 y R_2 usados en la realimentación del amplificador (R_2 para realimentación) [6].

$$\frac{\Delta H}{V_o} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (3)$$

Considerando $V_o \approx V_{CC} = 12$ V, con una tensión de referencia de $V_{ref} = 4,9$ V y adoptando una histéresis del 2% y $R_1 = 1$ k Ω /0,25 W, resulta $R_2 = 68$ k Ω /0,25 W.

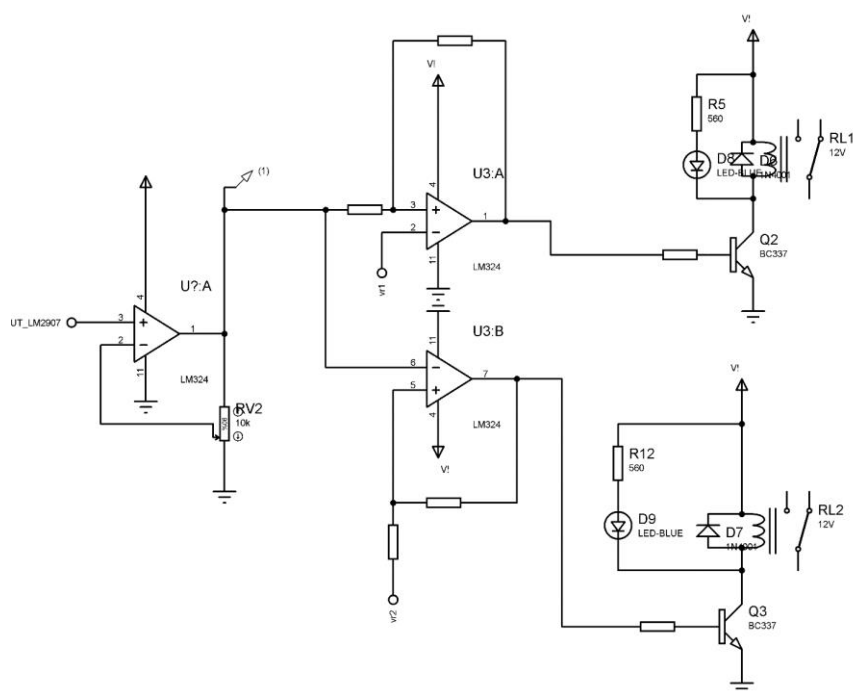


Fig. 4. Etapa de amplificación y detección de niveles de frecuencia.

La ecuación (4) corresponde al diseño del comparador no inversor, donde R_2 corresponde al resistor de realimentación [6].

$$\frac{\Delta H}{V_o} = \frac{R_1}{R_2} \quad (4)$$

Considerando $V_o \approx V_{CC} = 12$ V, con una tensión de referencia de $V_{ref} = 5,2$ V y adoptando una histéresis del 2% y $R_1 = 1$ k Ω /0,25 W, resulta $R_2 = 56$ k Ω /0,25 W.

3.3. Conversión analógico-digital:

La tensión proporcional a la frecuencia que entrega la etapa de conversión frecuencia-tensión implementada con el LM2907, es digitalizada mediante circuito integrado TC7107, que es un conversor analógico-digital (ADC) de doble rampa, que puede manejar directamente displays LEDs de siete segmentos. Este conversor proporciona 1999 cuentas para el fondo de escala con que opera [7]. En el diseño de esta etapa del circuito, a través de (5) se calcula el voltaje de referencia (fondo de escala) requerido por el ADC [7], para que el mismo realice las cuentas correspondientes y así reflejar en los displays la frecuencia transformada a tensión obtenida con el LM2907

$$V_{ref} = \frac{1000 \cdot V_{in}}{n} \quad (5)$$

En esta aplicación se precisa que cuando el LM2907 entrega en su salida 0,6 V, el display indique 600 cuentas, equivalente a $f = 60,0$ Hz. Entonces con $n = 600$ y $V_{in} = 0,6$ V, a partir de (5) se obtiene $V_{ref} = 1$ V. De esta manera, cuando la frecuencia medida sea 50 Hz, la salida del LM2907 será 0,5 V y el TC7107 indicará 500 cuentas, mostrándose 50,0 en los displays. La Fig. 5 muestra la configuración usada en el TC7107, donde la V_{ref} es obtenida mediante la referencia de voltaje TL431.

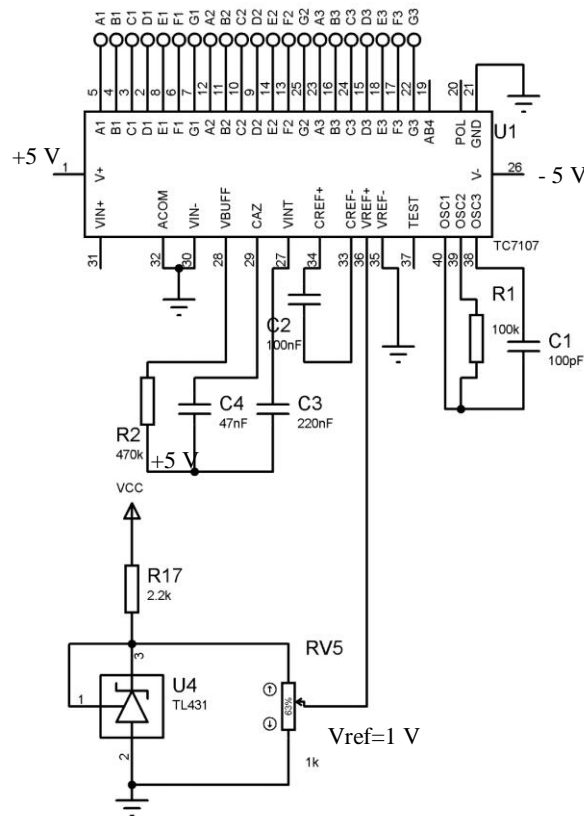


Fig. 5. Etapa de conversión analógico digital.

3.4. Fuente de alimentación:

La fuente de alimentación debe energizar a todo el circuito a partir de la tensión generada. El circuito requiere una tensiones de ± 5 V para energizar al conversor analógico-digital y displays, mientras que +12 V para energizar a las etapas de conversión frecuencia-tensión y amplificación y selección de frecuencia. Como los muestra la Fig. 6, las tensiones mencionadas son obtenida a partir de reguladores del tipo LM78xx y LM79xx con el fin de obtener tensiones reguladas que permitan una operación más precisa de las etapas del circuito, cada uno de estos con su correspondiente disipador de calor dimensionado a partir de su potencia de trabajo y la temperatura ambiente [8] [9]

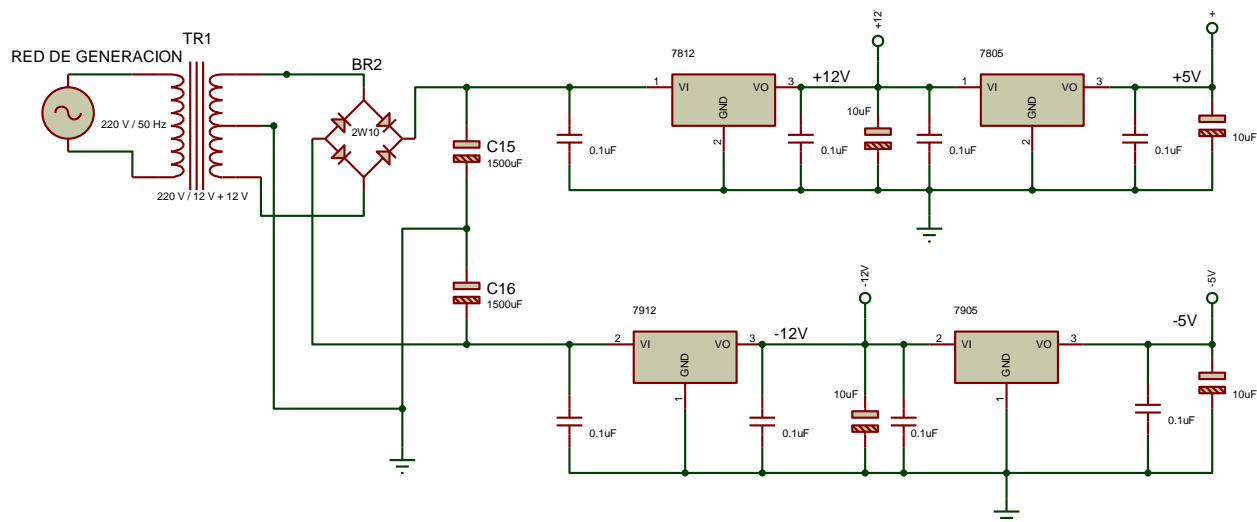


Fig. 6. Fuente de alimentación del circuito.

Para el diseño de la fuente de alimentación, se considera el consumo de corriente según las tensiones aplicadas en de las distintas etapas del circuito. Los valores correspondientes, están indicados en la Tabla 1.

Tabla 1. Consumo de corriente por tensión requerido.

Etapas/ Dispositivo	Corriente (mA)	Tensión (V)
Amplificación y comparación (LM324)	5	+12
Conversión analógica-digital (TC7107)	1,8	± 5
Indicación (displays)	225	+5
Etapas de potencia (relés)	120	+12
Conversión frecuencia-tensión (LM2907)	1,8	+12
Etapas de sensado	1	+12
Total	370	

En base al consumo de corriente, para la etapa de rectificación de la fuente es seleccionado un puente de diodos de 1 A.

Para el dimensionamiento de los capacitores del filtro que posee la fuente, se considera que la tensión a la salida de dicho filtro debe contar con un factor de rizado $F_r = 10\%$. El valor de estos capacitores se obtiene a través de las siguientes ecuaciones [10].

$$V_{max} = \sqrt{2} \cdot V_{ef} - 2 \cdot V_d \quad (6)$$

$$F_r = \frac{V_r}{V_{max}} \cdot 100 \quad (7)$$

$$V_r = \frac{V_{max} - V_{min}}{2 \cdot \sqrt{3}} \quad (8)$$

$$C = \frac{I_{sal}}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot f \cdot V_r} \quad (9)$$

En las ecuaciones anteriores V_{ef} es la tensión eficaz proporcionada por uno de los bobinados del transformador, V_d es la caída de tensión en cada diodo del rectificador, V_{max} es la tensión de pico obtenida a la salida del rectificador, V_r es la tensión eficaz del rizado a la salida del filtro, V_{min} es el valor mínimo que toma la tensión a la salida del filtro, f es la frecuencia de la tensión de salida del rectificador e I_{sal} la corriente entregada por el filtro. Considerando que $V_{ef} = 12\text{V}$; $f = 100\text{ Hz}$ (rectificador de onda completa); $V_d = 0,55\text{ V}$, $I_{sal} = 0,97\text{A}$; para el filtro de la fuente se obtiene dos capacitores electrolíticos de $1500\ \mu\text{F} / 35\text{ V}$.

4. Resultados

La Fig. 7 muestra el esquema completo del circuito diseñado. El mismo fue simulado en el software Proteus 8, analizando la indicación en los displays del circuito para distintos valores de frecuencia en la tensión de entrada. Los resultados de la simulación pueden apreciarse en la Fig. 8, 9 y 10.

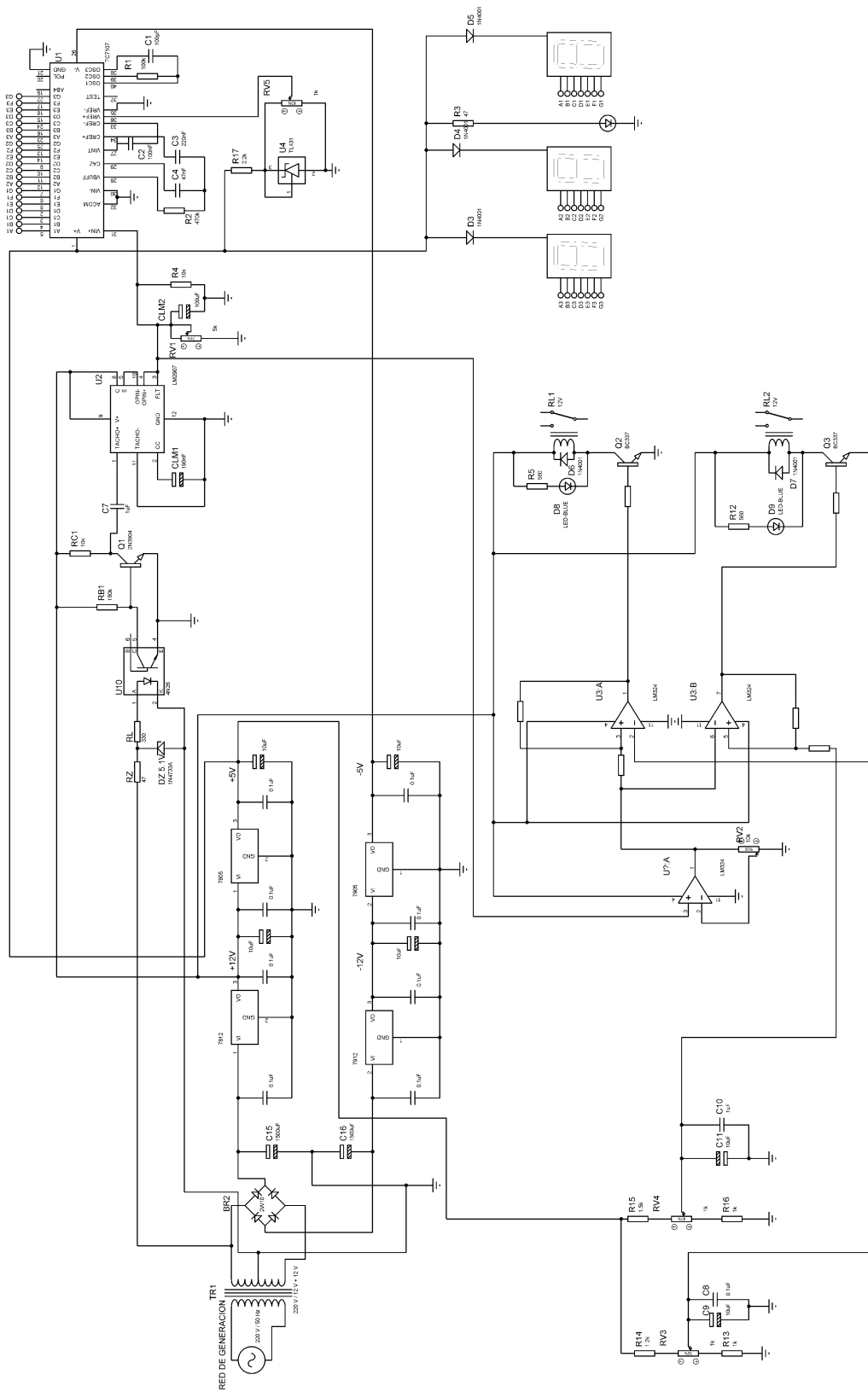


Fig. 7. Esquema del circuito para medición y supervisión de frecuencia FCFT.

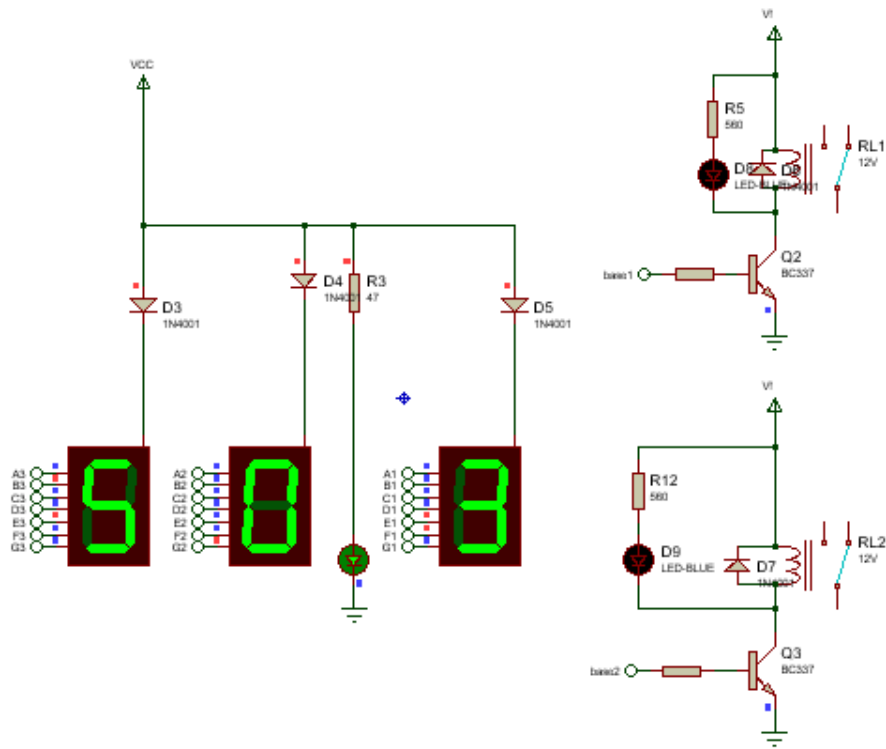


Fig. 8. Medición de frecuencia de 50 Hz.

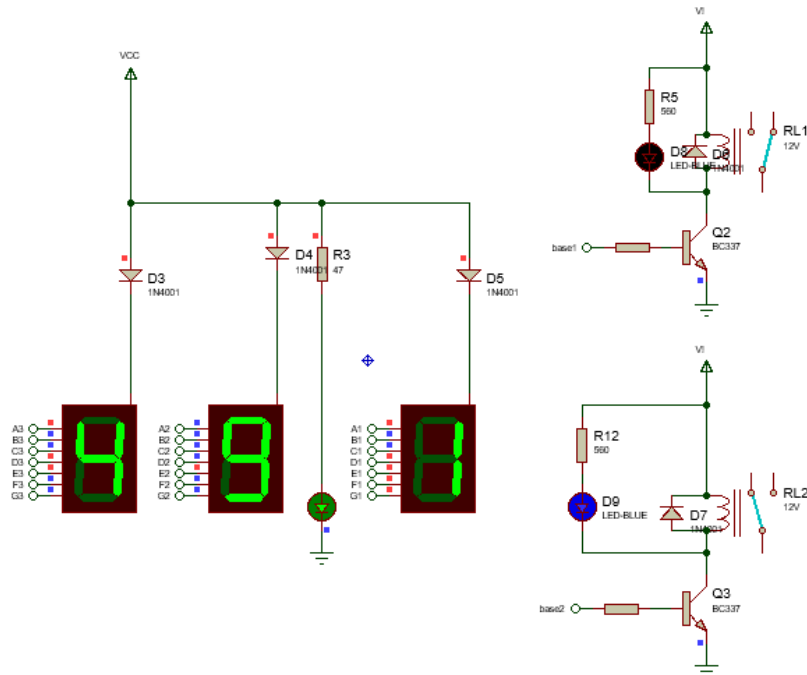


Fig. 9. Medición de frecuencia de 48,5 Hz.

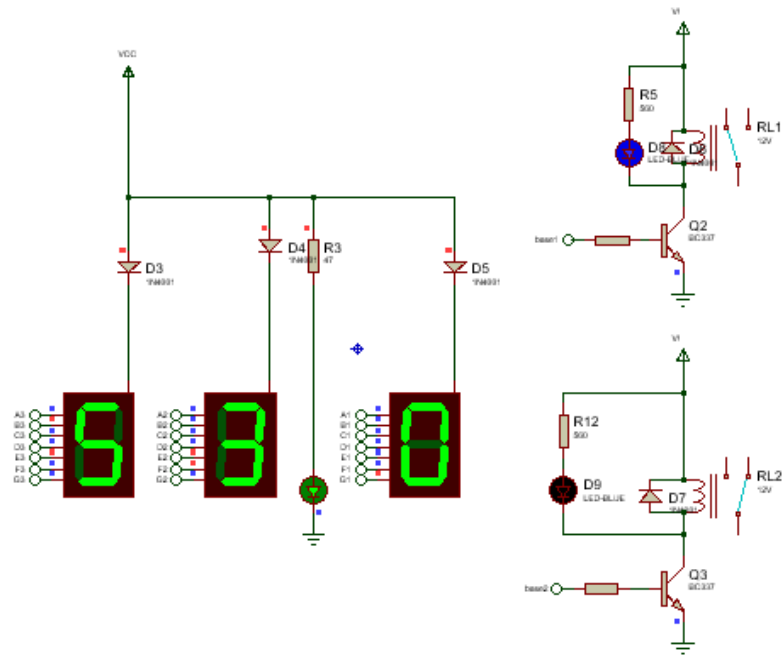


Fig. 10. Medición de frecuencia de 52 Hz.

La Tabla 2 muestra la lista de componentes utilizados en el circuito para medición y supervisión de frecuencia FCFT. A través de la misma se puede computar la cantidad de componentes y determinar el costo, siendo este último de USD 55,11, sin tener en cuenta la mano de obra y el circuito impreso. El valor indicado corresponde a la compra al por menor de los componentes.

Tabla 2. Lista de componentes.

Componentes	Cantidad
Resistores:	
Resistor 100 k Ω , 0,25 W	2
Resistor 10 k Ω , 0,25 W	4
Resistor 220 Ω , 0,25 W	1
Resistor 330 Ω , 0,25 W	1
Resistor 180 k Ω , 0,25 W	1
Resistor 470 k Ω , 0,25 W	1
Resistor 2,2 k Ω , 0,25 W	1
Resistor 1 k Ω , 0,25 W	3
Resistor 56 k Ω , 0,25 W	1
Resistor 68 k Ω , 0,25 W	1
Capacitores:	
Capacitor 100 pF , 50 V cerámico	10
Capacitor 1500 μ F , 35V electrolítico	2
Capacitor 10 μ F , 50V electrolítico	4
Capacitor 180 nF , 50V cerámico	1
Capacitor 220 nF , 50V cerámico	1

Tabla 2 (cont.). Lista de componentes.

Componentes	Cantidad
Capacitor 100 μ F , 50V electrolítico	2
Capacitor 47 nF , 50V cerámico	1
Capacitor 47 pF , 50V cerámico	1
Circuitos integrados	
Regulador de voltaje TL431	1
Regulador de voltaje LM7805 (con disipador)	1
Regulador de voltaje LM7812 (con disipador)	1
Regulador de voltaje LM7905	1
Regulador de voltaje LM7912	1
Convertor F-V, LM2907	1
Convertor AD, TC7107	1
Amplificador operacional, LM324	1
Dispositivos Semiconductores	
Diodo Zener 5,1 V, 1A4733A	1
Transistor BC337	3
Puente de diodos 1 A 2W1A	1
Opto-acoplador 4N26	1
Dispositivos varios	
Preset multivuelatas 5 k Ω	1
Preset multivuelatas 1 k Ω	3
Relé OMIH-SD-112	2
Transformador 220V/12V+12V 1A	1

Los resultados obtenidos permiten inferir que el circuito se comporta según lo pretendido en el diseño, pero presenta un error visible en el dígito decimal, cuando el dígito de la unidad cambia de valor. Para una frecuencia de 50 Hz el circuito muestra una medición de 50,4 Hz con una diferencia de 0,4 Hz. En este caso ninguno de los circuitos detectores de límites de frecuencia se activó, como se esperaba. Para una frecuencia de 48,5 Hz el resultado fue de 49,1 Hz activándose el detector de frecuencia inferior. La diferencia en este caso fue de 0,6 Hz. Para una medición de 52 Hz el resultado fue de 53 Hz, con una diferencia de 1 Hz. El detector de límite de frecuencia mayor se activó como se esperaba.

Un resultado apreciable de este trabajo, es la integración de los conocimientos de la asignatura Técnicas Digitales con los de varias asignaturas de la carrera Ingeniería Electrónica. En esta actividad integradora están presentes conocimientos de la asignatura Electrónica Analógica, como ser el diseño de los detectores de límites de frecuencia, donde se usan a los amplificadores operacionales como comparador con histéresis y como amplificador no inversor. También se utilizaron saberes de la asignatura Dispositivos Electrónicos, relacionados con el diseño de la fuente de alimentación y la polarización de diodos Zener. Cabe mencionar, que este trabajo también permitió investigar y aplicar conceptos asociados al campo de la medición de variables, tal es el caso de la conversión de frecuencia

a tensión realizada en el circuito seleccionado. Todos los conocimientos, bien aplicados, contribuyeron al correcto funcionamiento del circuito diseñado.

5. Conclusiones

Los resultados obtenidos en la simulación demuestran que el circuito elegido fue diseñado correctamente, teniendo una ligera diferencia, pero tolerable con la medición asignada. El objetivo del estudio no es buscar exactitud en la medición, sino implementar una lógica que esté de acuerdo con la consigna, objetivo que fue alcanzado mediante el cálculo e implementación en el simulador. De esta manera, el circuito propuesto cumple con las especificaciones de actividad integradora.

Como objeto de formación en la disciplina de la ingeniería, el estudio presente brinda las herramientas al estudiante para integrar no solo los conceptos de la asignatura Técnicas Digitales 1, sino conceptos de otras asignaturas, proceso necesario e importante para la formación del estudiante para su futura vida profesional, ya que en ésta se presentarán problemáticas similares a la que plantea la consigna, siendo el procedimiento de resolución e integración del presente trabajo el que le brinda las competencias al estudiante para desempeñarse profesionalmente.

6. Referencias

- [1] U. N. d. R. E. d. I. E. E. II, «Convertidores Frecuencia-Tension y Tension-Frecuencia,» pp. 11-15, 2010.
- [2] T. R. J., SISTEMAS DIGITALES Principios y Aplicaciones, PEARSON.
- [3] F. T. L., Fundamentos de Sistemas Digitales, Pearson.
- [4] Texas_Instruments, «LM2907 and LM2917 Frequency to Voltage Converter,» *Datasheet*.
- [5] F. Driscoll, Operational Amplifiers and Linear Integrated Circuits, 6 ed., 1990.
- [6] H. Anocibar, Comparadores con AOs y Circuitos Especificos, Obera, 2019.
- [7] TelCom_Semiconductors, «TC7107 3-1/2 DIGIT A/D CONVERTERS,» *DATASHEET*.
- [8] FARCHAILD_Semiconductor, «LM78XX Regulators Voltaje».
- [9] UNISONIC_Technologies, «UTC LM79XX Integrated linear circuit».
- [10] B. R. L., Electrónica: Teoría de Circuitos y Dispositivos Electronicos, vol. 10, Pearson.