

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Área Académica en Ingeniería en Computadores
CE4202 Taller de Diseño Analógico
Profesor: Luis Chavarría Zamora
Grupo 01

Proyecto 2:

Multímetro Digital

Estudiantes:
Kevin González Sanabria
Randy Martínez Sandí
Mariano Muñoz Masís

Verano 2021
Cartago

Introducción

El siguiente reporte es un documento de diseño del proyecto Multímetro Digital. El cual consiste en diseñar un componente que actúe como un multímetro digital capaz de medir de resistencia, capacitancia y tensión dado un elemento de circuitos conectado a él. Esto se logra mediante la aplicación de amplificadores operacionales presentes en convertidores analógico-digital (ADC o *Analog-Digital Converter*) y digital-analógico (DAC o *Digital-Analog Converter*).

De manera más detallada, el proyecto total es un único módulo compuesto por tres submódulos (el de resistencia u ohmímetro, el de capacitancia o medidor de capacitancia y el de tensión o voltímetro) encargados de leer los elementos o circuitos a medir. Por lo tanto, se realiza la medición, se obtiene el dato y se muestra visualmente en dos *displays* o siete segmentos. De acá, el propósito de utilizar conversores de analógicos a digitales.

Los diferentes submódulos aplican distintos análisis de circuitos para obtener la medición de manera analógica. Luego, mediante los convertidores digitales a analógicos se transforma el dato para una ilustración visual de mayor facilidad. Todo lo anterior se realiza mediante diseños teóricos y simulaciones utilizando la herramienta de simulación de circuitos *National Instruments Multisim*.

1. Requerimientos

El objetivo principal del proyecto es:

- a. Crear una simulación de circuito, que se comporte como un multímetro digital capaz de medir resistencia, capacitancia y tensiones aplicando circuitos amplificadores, conversores analógicos-digitales y digitales-análogos.

Entre los objetivos complementarios de se encuentran:

- a. Diseño, cálculo de componentes y simulación de un circuito capaz de realizar la medición de resistencia de un elemento o circuito.
- b. Diseño, cálculo de componentes y simulación de un circuito capaz de realizar la medición de capacitancia de un elemento o circuito.
- c. Diseño, cálculo de componentes y simulación de un circuito capaz de realizar la medición de capacitancia de un elemento o circuito.
- d. Aplicación¹ de un conversor analógico-digital para manipular los datos medidos en los puntos anteriores.
- e. Aplicación² de dos *displays* o siete segmentos para poder ilustrar de manera digital y visualmente fácil los datos.
- f. Crear un análisis y diseño modular de los circuitos anteriores con el propósito de conectarlos entre sí para poder obtener el diseño general del proyecto en su totalidad.
- g. Conectar los circuitos medidores (del punto a., b. y c.) entre sí para generar un único módulo que se pueda escoger mediante *switches* y así evitar diferentes circuitos por separado y tener un único circuito “manipulables”.
- h. Conectar el único circuito medidor (el punto f.) con el conversor digital-analógico (del punto f.) para poder obtener la salida de los datos medidos como *bits*.
- i. Conectar el circuito obtenido del punto g. con los *displays* o los dos siete segmentos del punto e. para poder activar o desactivar estos elementos y poder ilustrar los datos medidos.

Entre otros factores a tomar en cuenta:

- a. Utilizar el *software* NI Multisim (versión más reciente³) para la creación y simulación de los circuitos.
- b. Los modelos o tipos de los amplificadores, las magnitudes de los elementos pasivos y los cálculos a realizar quedan a libre elección de los autores.

¹ Utilización utilizar los conversores nativos que se ofrecen en las herramientas de simulación.

² Utilización utilizar los siete segmentos nativos que se ofrecen en las herramientas de simulación

³ Para la fecha del documento, la versión reciente es la v14.2

2. Evaluación de Posibles Soluciones

Según lo explicado en la sección anterior ([Requerimientos](#)), lo que se desea a construir a grandes rasgos se puede ilustrar en la Figura 1. Acá se muestra un bosquejo que ilustra el flujo del proyecto a construir.

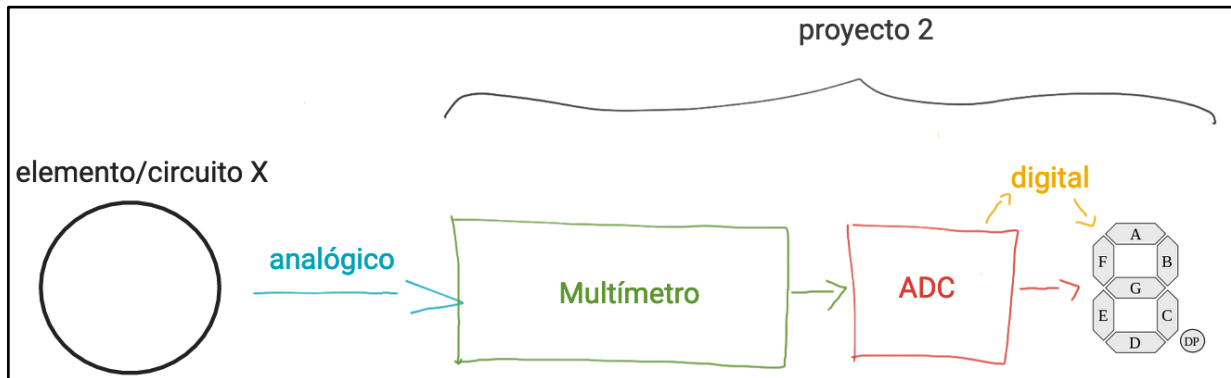


Figura 1. Bosquejo del proyecto a realizar.

Dentro del módulo multímetro, existen los tres submódulos encargados de realizar y obtener las mediciones de interés. Para cada circuito medidor se realizó una evaluación de las posibles soluciones que se consideraron a la hora de realizarlo.

a. Ohmímetro

Para la funcionalidad del ohmímetro se contó con dos posibles maneras de abarcar la solución, dado que determinar el rango de impedancia del elemento resistivo que se desea medir puede llevarse a cabo con circuitos lineales simples donde se utilicen topologías de amplificadores operacionales o bien técnicas de análisis de circuitos para el obtener el resultado deseado.

A continuación se muestran las dos estrategias investigadas que se podrían utilizar para realizar este módulo. El primer método utiliza un amplificador operacional en su topología de inversor tal y como se muestra en la Figura 2.

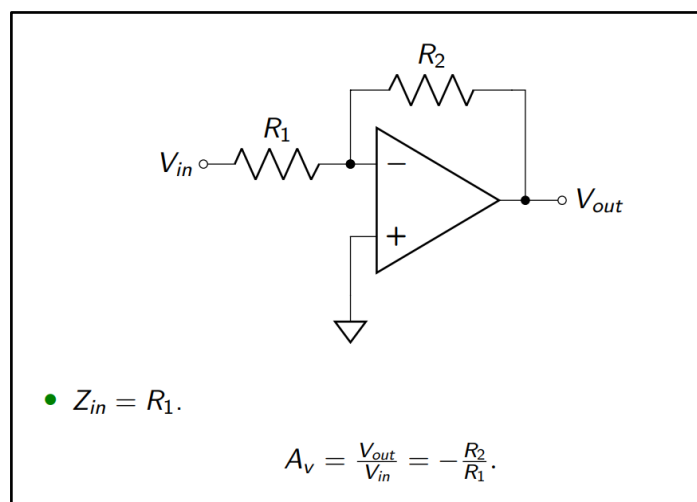


Figura 2. Amplificador operacional en su topología inversora. (Zamora, Diseño DAC - ADC, 2021)

Con este método se pretende utilizar la resistencia R1 como el elemento resistivo sobre el cual se desea realizar la medición mientras que la resistencia R2 se utiliza como referencia y toma un valor fijo para determinar el rango de resistencia posible para R1.

Esto se aprecia de mejor manera utilizando la fórmula: $R1 = - R2 * V_{in} / V_{out}$, Conociendo los valores de tensión de entrada y de salida es posible determinar el valor de impedancia que presenta la resistencia.

El segundo método implica el uso de un divisor de tensión para determinar el rango de impedancia del elemento resistivo que se desea medir, como se muestra en la Figura 3.

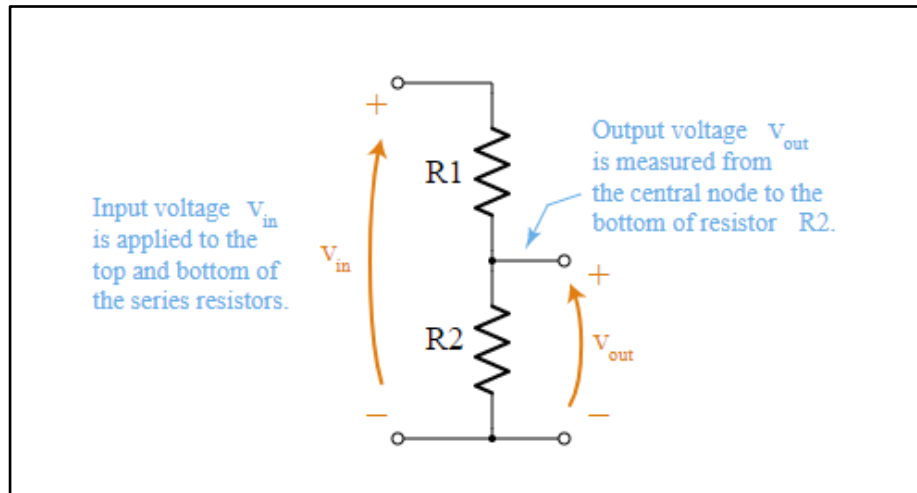


Figura 3. Divisor de tensión. Tomado de: Voltage divider - Khan Academy. (McAllister, s.f.)

Con este método se toma un valor fijo de tensión de entrada y una resistencia R1 fija de manera que se calcule el voltaje de salida del elemento al cual deseamos realizar la medición con la fórmula mostrada en la Figura 4.

$$v_{out} = v_{in} \frac{R2}{R1 + R2}$$

El diagrama incluye anotaciones que identifican los términos en la fórmula: "output voltage" apunta a v_{out} , "input voltage" apunta a v_{in} , y "resistor ratio" apunta a la fracción $\frac{R2}{R1 + R2}$.

Figura 4. Fórmula del divisor de tensión. Tomado de: Voltage divider - Khan Academy. (McAllister, s.f.)

Una vez calculado el voltaje de salida se definen los niveles de voltaje a utilizar que representan los rangos de impedancia que se desea medir, para esto se utilizan amplificadores operacionales en su topología de comparador para asignar los valores de fondo de escala y valor de cero según el rango en el que se esté operando.

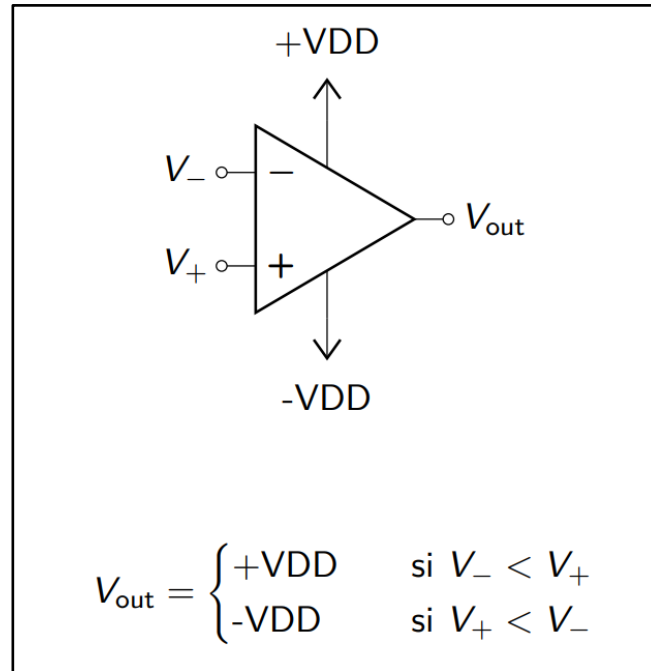


Figura 5. Amplificador operacional en su topología de comparador. (Zamora, Amplificador Operacional Básico, 2021)

b. Medidor de Capacitancia

Para esta funcionalidad se deseaba saber el rango de la capacitancia dada de un circuito. Este rango variaba entre 1n (nano) y un 1μ (micro). La intención es que se muestre en los *display* de los siete segmentos los valores hexadecimales 00 para los cercanos a nano y FF para los cercanos a micro. Esto así porque micro es una escala mayor a nano. Como posibles soluciones se evaluaron dos opciones. La primera consistía en medir la capacitancia real de un arreglo de capacitores. Esta idea se puede ilustrar en la Figura 6.

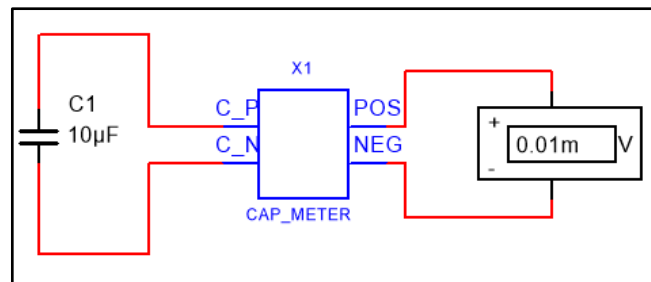


Figura 6. Primera solución considerada para la medición de capacitores. (Fernando, 2010)

Como se puede apreciar en la Figura 6, se conecta el arreglo de capacitores, se pasa por el medidor y posteriormente se muestra en el voltímetro un valor asociado a la capacitancia conectada. Es importante aclarar que en este ejemplo se conectó un capacitor de un 10μ y en la lectura se obtiene 0.01m, que es un equivalente. Además, la lectura de ese instrumento es en voltios, pero uno asume que la unidad es faradios.

El circuito interno del medidor es el que se muestra en la Figura 7. El cual consta de una fuente de corriente continua, un arreglo de resistencias, un circuito amplificador integrador y un circuito amplificador inversor.

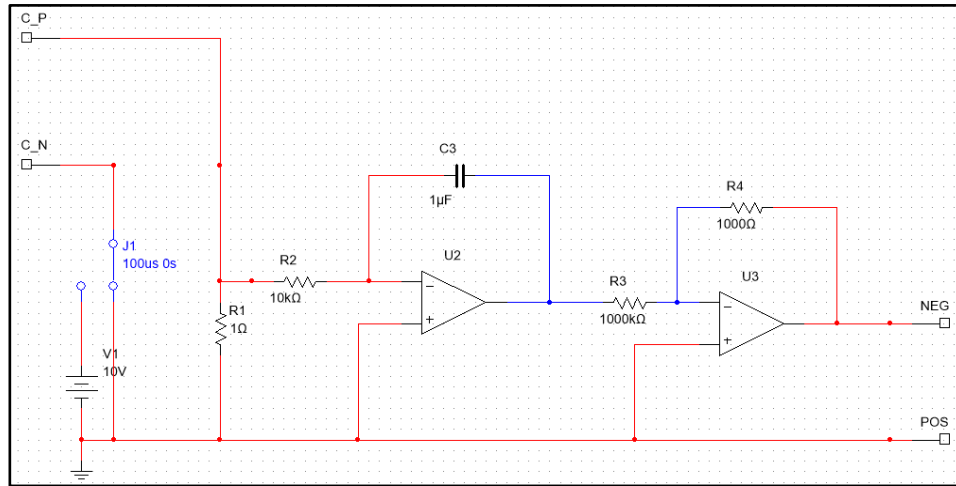


Figura 7. Circuito interno medidor de la primera solución.

El detalle con este circuito es que da una lectura exacta del o los capacitores a medir, y no un rango. En adición, la salida de tensión que da el circuito es muy baja. En concreto, la medición de la capacitancia es igual a la tensión equivalente del arreglo. De acá, se tiene la conexión al ADC y posteriormente a los *display* que indique el valor final.

La segunda posible solución consiste en crear un circuito RC, alimentado por una fuente en corriente alterna (esto así porque al utilizar una fuente corriente continua, un capacitor en el tiempo se vuelve un circuito abierto) y medir la tensión que cae en el capacitor, que en un momento dado, sería equivalente a su valor de capacitancia o su aproximados.

Al introducir un circuito RC, se deben considerar varios factores que deben ser etapas que el circuito:

1. Un amplificador seguidor, que toma la salida de la tensión del circuito RC. Esto es así, porque
2. Rectificar la onda de tensión proveniente del amplificador
3. Controlar el rizado de la misma.

Esto con el propósito de medir la tensión que cae en el capacitor, ya que, al igual que la primera solución se toma como variable la tensión y todo lo demás constante. El circuito en sí puede ilustrarse en la Figura 8.

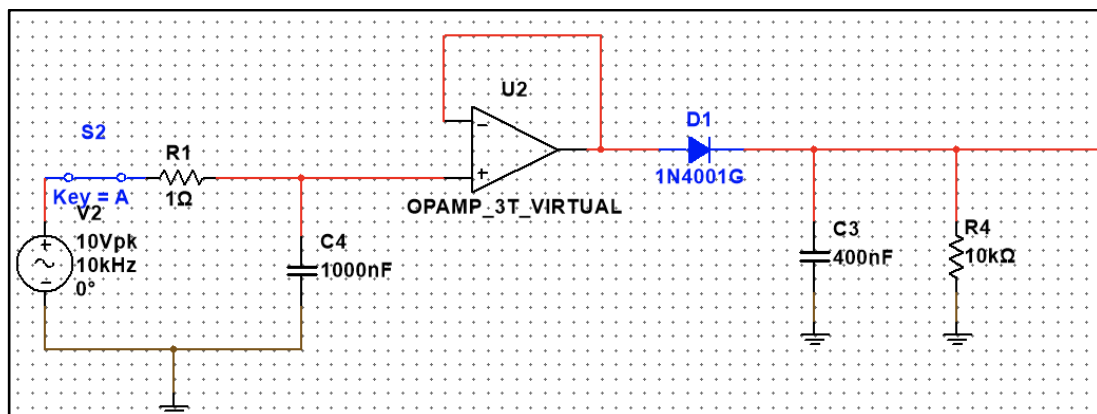


Figura 8. Circuito interno medidor de la primera solución.

El capacitor de interés sería el C4 (1000nF) y luego la salida, conectada al nodo R4, entra al ADC que activa los *display* en cada caso.

c. Voltímetro

Para realizar el voltímetro se requería estabilizar la señal AC a una DC, por lo que utilizar un puente de diodos era la opción más eficiente, se tenían dos opciones: (1) implementar un rectificador de media onda, o (2) uno de onda completa. Dada los requerimientos en la señal de salida se escogió el rectificador de onda completa, para conseguir una señal más estable, como se muestra en la Figura 9.

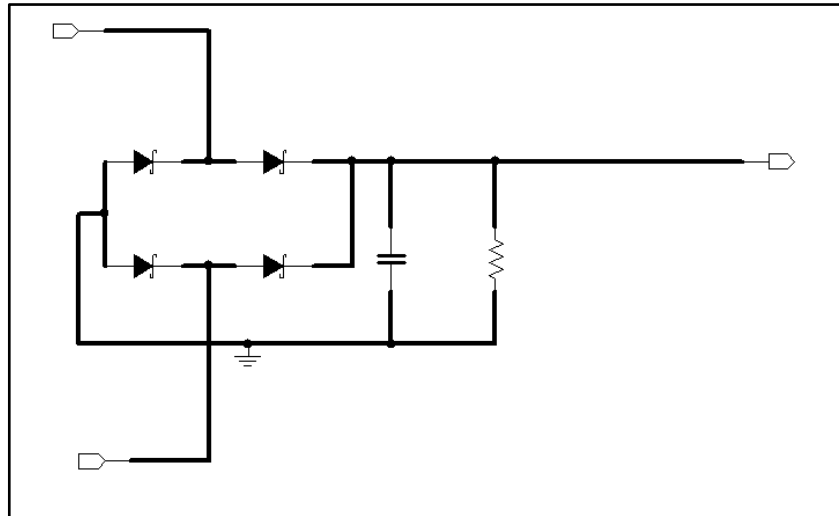


Figura 9. Rectificador de Onda Completa.

Como primera opción solo utilizar el rectificador de onda completa funcionaba, pero no es la solución más eficaz. Como segunda opción se tiene que implementar un rectificador de onda completa acompañado de un amplificador seguidor de voltaje, que termine de estabilizar la señal y un amplificador sumador que controle el voltaje de salida. De manera que la salida del amplificador seguidor esté por debajo del valor V_p de la señal original AC, como se puede apreciar en la Figura 10.

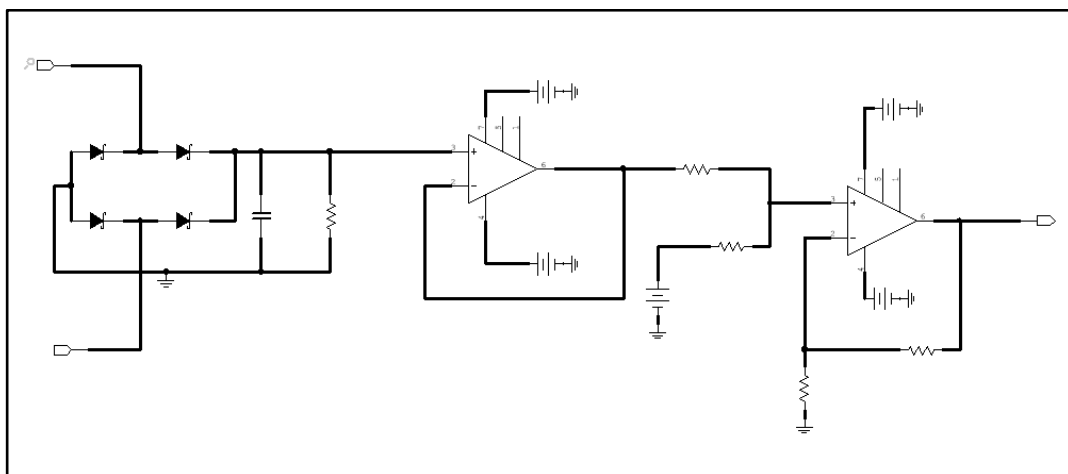


Figura 10. Rectificador de Onda Completa con Amplificadores Seguidor y Sumador.

i. PWM

Para la implementación de este módulo se utilizó el diseño visto en clase, como se muestra en la Figura 11.

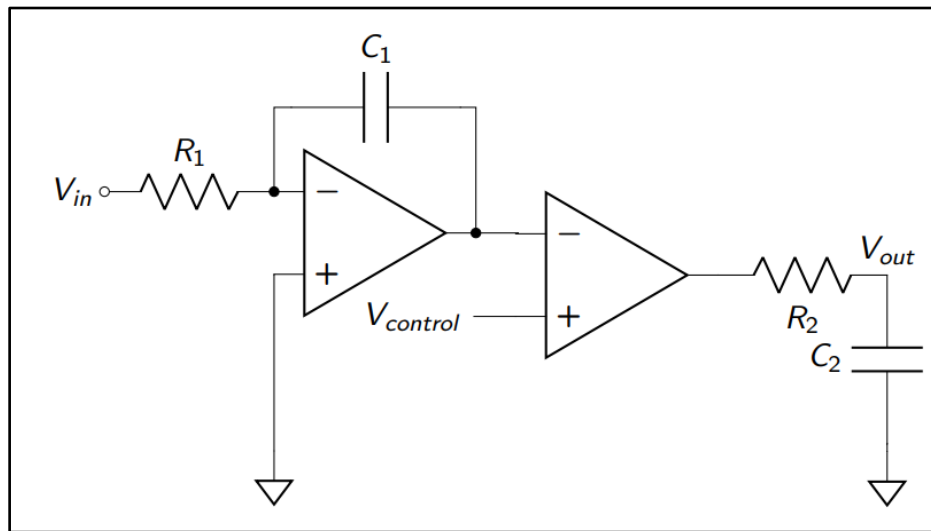


Figura 11. Circuito PWM. (Zamora, Diseño DAC - ADC, 2021)

Se hacen un par de modificaciones para poder modificar la señal de control y la señal de salida, agregando un potenciómetro, en la entrada V control y cambiando la R2 por un potenciómetro, como se muestra en la Figura 11.

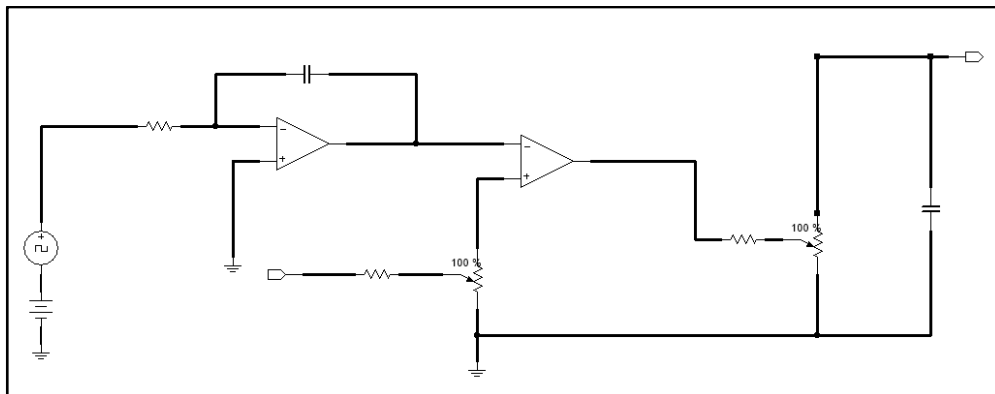


Figura 12. PWM modificado para la solución deseada.

Además, se tienen los módulos de ADC y el *display*.

a. ADC

Para el ADC se permitió el uso de convertidores nativos u ofertados por Multisim, el cual solo ofrece uno (con salida de ocho o 16 *bits*) que se acopla bien a lo que se requiere. Este es el que se muestra en la Figura 13.

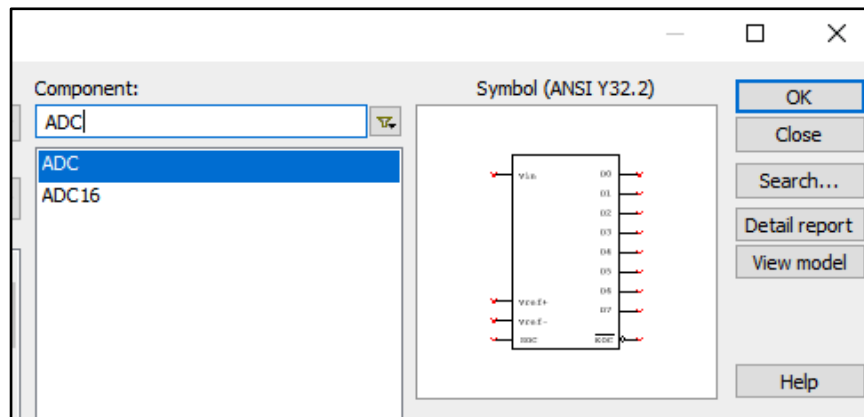


Figura 13. ADC de Multisim.

b. Display

Para los *display*, el conjunto de herramientas de Multisim ofrece una variada gama de siete segmentos, como se muestra en la Figura 14.

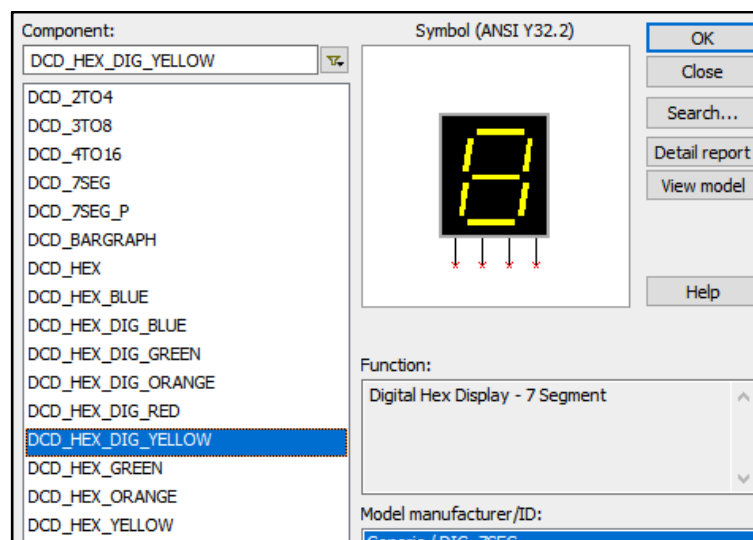


Figura 14. Display de Multisim.

De las opciones disponibles se escogió el *display* de color amarillo, por decisión subjetivo de los autores. Eso se debe a que, en comparación de todas las opciones todos tiene el mismo comportamiento variando únicamente el color de presentación.

3. Comparación de la Soluciones

a. Ohmímetro

Para implementar la funcionalidad del ohmímetro de nuestro multímetro digital decidimos utilizar la segunda opción que consiste en la elaboración de un divisor de tensión para determinar el rango de impedancia de una resistencia tal y como se menciona en la sección anterior. En la Figura 15 se muestra el circuito del diagrama completo.

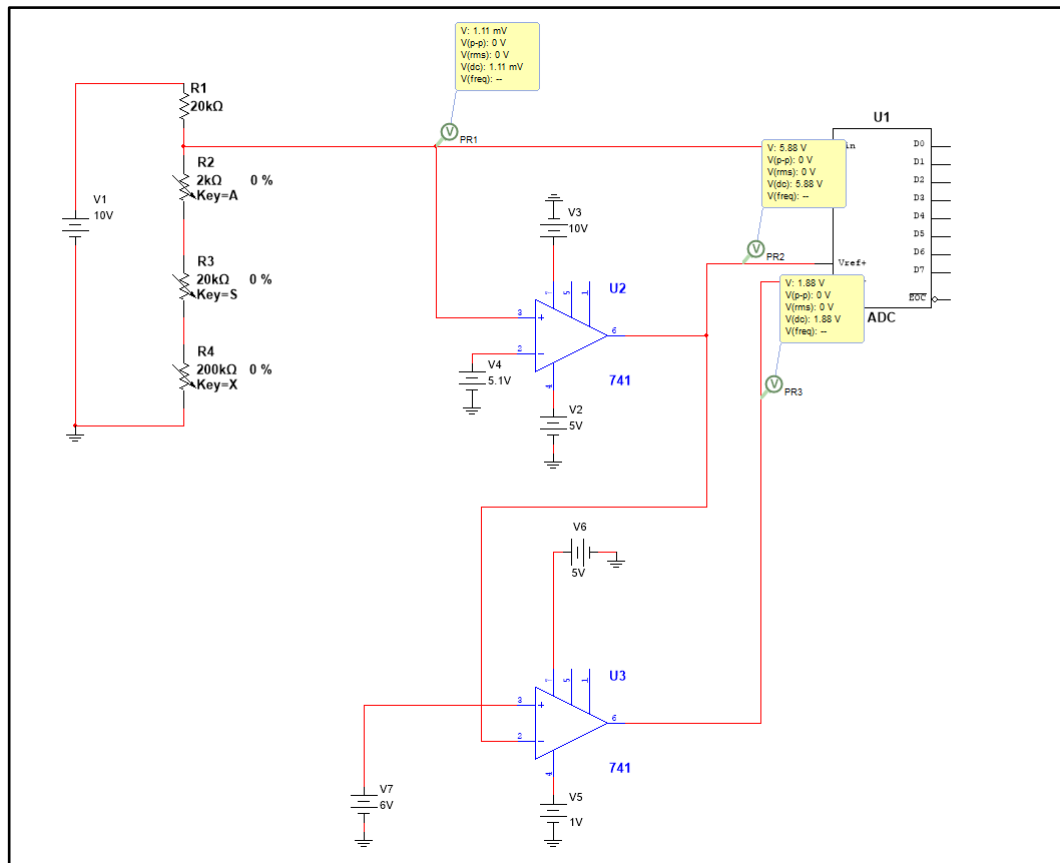


Figura 15. Diagrama del circuito completo del ohmímetro.

Con esta solución utilizando una fuente de tensión DC de 10 V y una resistencia fija de 20kΩ con el valor de tensión obtenido con el divisor de tensión se representan los rangos de resistencia deseados con los niveles presentados en la Tabla 1.

Tabla 1. Rangos de impedancia con los voltajes respectivos.

Rangos de impedancia	Niveles de tensión
2kΩ - 20kΩ	1V - 5V
20kΩ - 200kΩ	5V - 10V

Una vez obtenido el valor de tensión con el divisor este dato es utilizado por dos amplificadores operacionales en su topología de comparar los cuales determinan los valores de cero y fondo de escala que ingresan al convertidor analógico-digital para finalmente ser desplegado en las pantallas de los siete segmentos.

b. Medidor de Capacitancia

Para el caso del medidor de capacitancia, se optó por la segunda opción expuesta. Esto porque resultó más sencillo tener un circuito conectado a una fuente de tensión en corriente alterna o CA y realizar la medición.

Los detalles de descartar la primera opción es que, se estaba obteniendo un valor exacto del arreglo de capacitores conectados y la intención es tener un valor que pueda entrar en el rango deseado de 00 y FF, que sería 1n y 1 μ . Otra cuestión para tomar en cuenta es que al no tener ninguna alimentación es baja. Por lo que habría que introducir más elementos para poder activar correctamente el ADC y, por ende, los siete segmentos.

La solución final se construyó como se muestra en la Figura 16. En este ejemplo, se muestra un capacitor de 1 μ y como salida final se obtiene un F2 que es el comportamiento esperado. Además, se observa todo el circuito medidor, la conexión con el ADC y los *displays*. Los puntos de abajo son LEDs, funcionan únicamente como guía en esta ilustración.

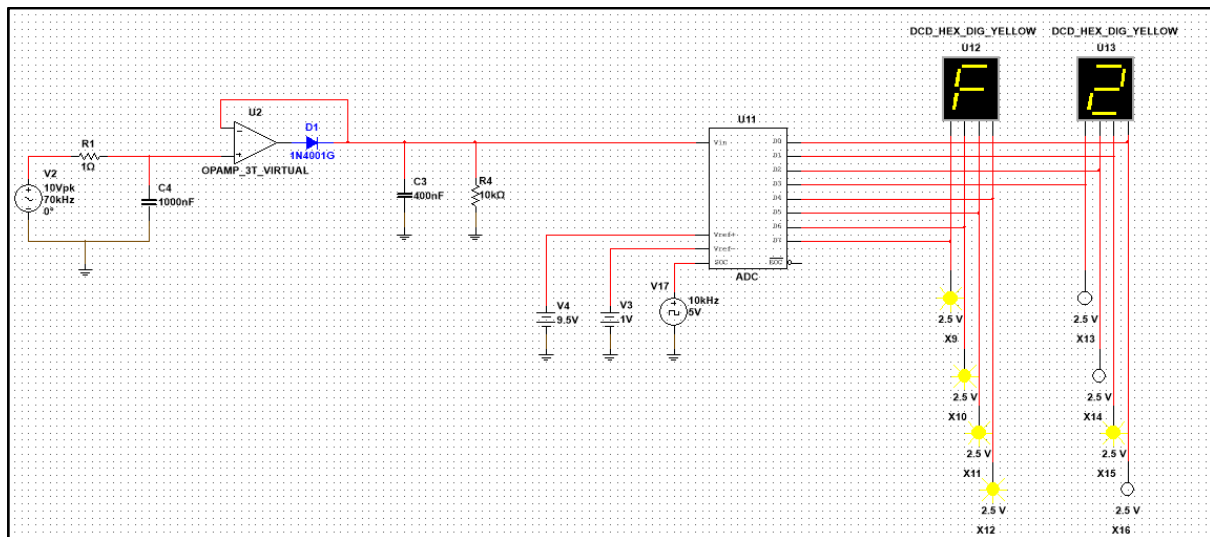


Figura 16. Diagrama del circuito completo del medidor de capacitancia.

c. Voltímetro

Para la implementación del voltímetro, ante las posibilidades expuestas en la sección 2.c del se determinó que la opción óptima era utilizar un rectificador de onda completa, junto con un par de amplificadores que ayudarán a estabilizar la señal, como se muestra en la Figura 10.

En la Figura 17 se puede apreciar el uso de un conjunto de diodos 1N5817 para la conformación del puente de diodos, y una carga compuesta entre el C_P y el C_R, con la carga y descarga del capacitor se garantiza un voltaje de rizado lo suficiente como para estabilizar la señal a DC, para el amplificador seguidor se utilizó un 741, esta etapa pretende generar una estabilidad mayor y proporcionar un aislamiento entre el rectificador de onda y la salida.

Para el amplificador sumador de igual manera se utilizó un 741, este amplificador se implementó para garantizar una señal de salida igual o muy similar a la señal de entrada V_p . La fuente V3 se utiliza para “promediar” la señal del seguidor y establecerla dentro del rango especificado. De igual manera las resistencias R_V1, R_V2, RS1 y RS2 se establecen con el mismo valor para no generar una ganancia que perturbe la señal de salida.

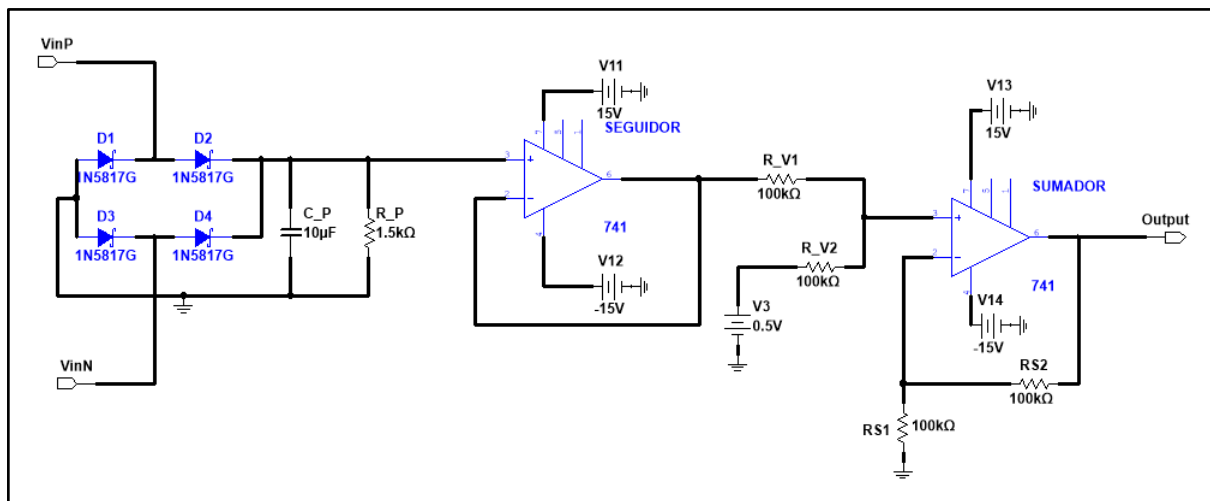


Figura 17. Rectificador de Onda completa para la medición de voltaje.

i. PWM

Para el desarrollo del PWM se implementó el circuito de la Figura 18. Se utiliza una topología de amplificador integrador, que transforma la señal de cuadrada en una triangular, se dimensiona el valor del C3 para desplazar la onda en dirección de V+, con el propósito que en el momento de compara esta onda con la señal de control del componente InPWM no incurran errores por ondas con valores negativos, esta comparación se realiza mediante el amplificador comparador. Para la salida del circuito se utiliza una carga compuesta de RC para generar una onda cuadrada. El pulso de la onda de salida es controlado mediante el potenciómetro R1. En la Figura 19 se puede observar la onda de salida (celeste) de un 100%, 50% y 0% de carga.

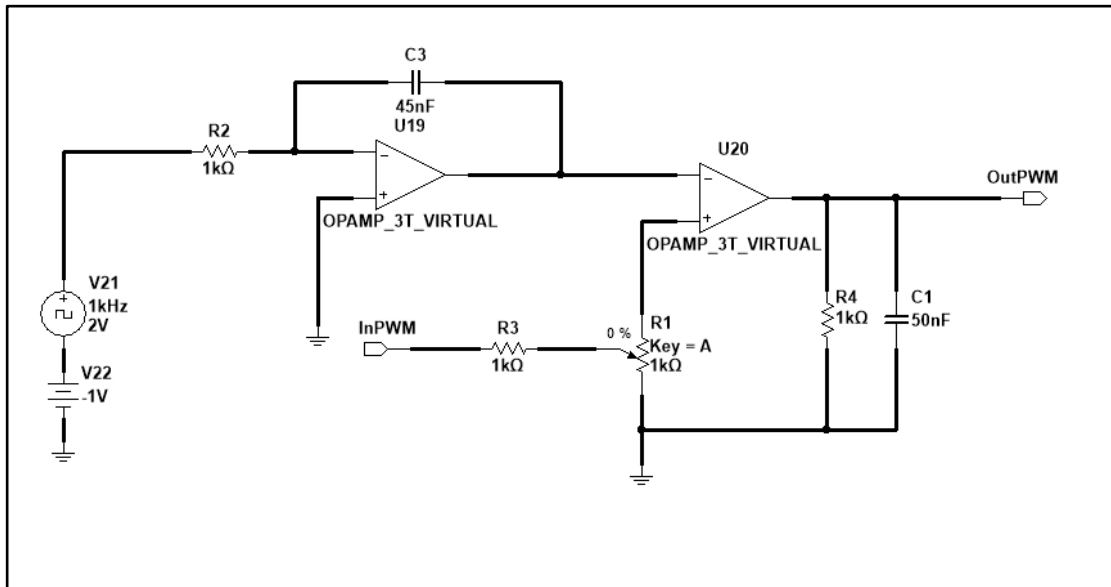


Figura 18. PWM desarrollado en Multisim

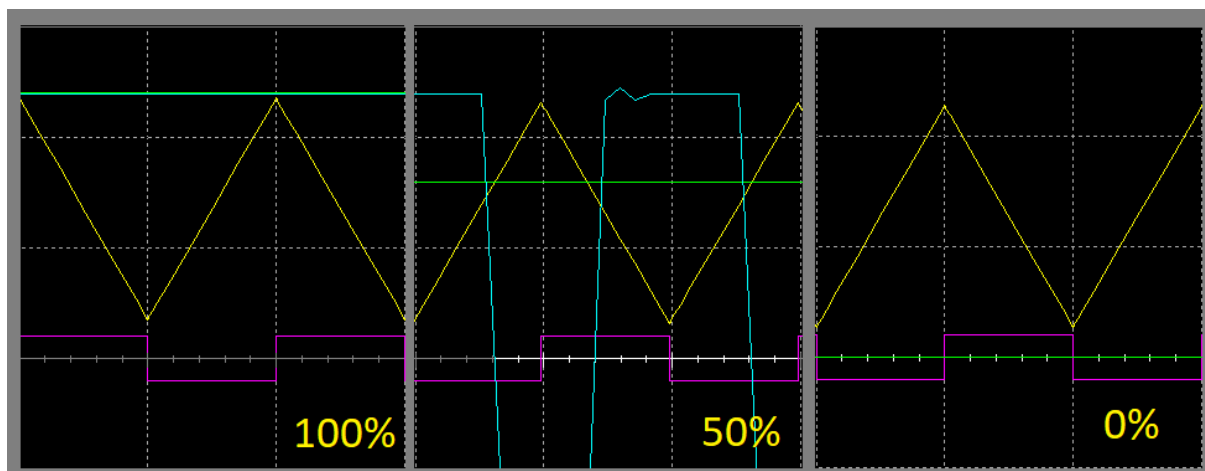


Figura 19. Onda de salida según porcentaje de trabajo.

d. ADC + Display

Para los módulos ADC y *Display*, se aplicó lo explicado y mostrado en la subsección de [ADC y Display](#), y esa única solución que se consideró y se desarrolló. De igual forma, se utilizaron los elementos previamente mostrados y se conectaron como se muestra en la Figura 20.

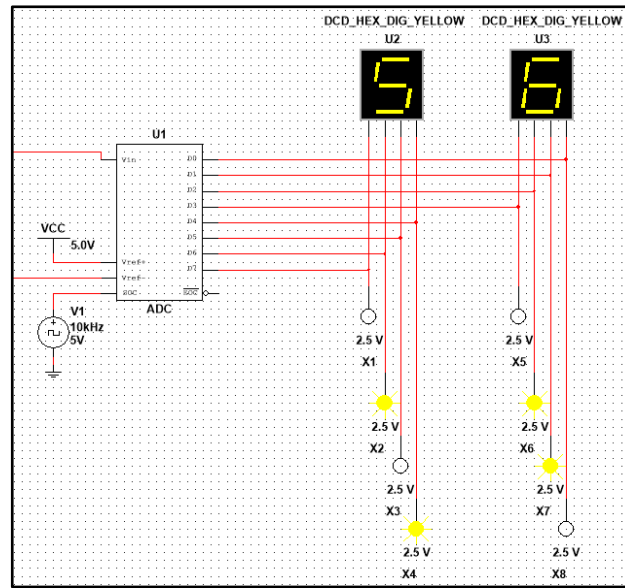


Figura 20. Rectificador de Onda completa para la medición de voltaje.

Como se puede observar en la Figura 20, se tiene el ADC, los siete segmentos de tono amarillo y en adición unos *probes* o sondas binarias. Estos últimos, son unos LEDs que se activan con un “1” y se desactivan con un “0”. El propósito de estos es ver la salida digital que retorna el ADC como salida. Estos mismos *bits* son lo que entran a los siete segmentos. Es importante que recordar que el número de que se muestra en los siete segmentos está en hexadecimal, por lo que, los *probes* indican el mismo número en binario.

El ADC tiene cuatro entradas:

1. Vin: la señal de entrada a procesar. Este va a provenir de cada señal que se quiera analizar, en este caso sería las señales de tensión, resistencia o capacitancia.
2. Vref +: Límite superior de escala. Va depender de cada caso para definir el límite superior.
3. Vref -: Límite inferior de escala. Va depender de cada caso para definir el límite mínimo.
4. SOC: Es el reloj para la activación del ADC, ya que, al ser un ente digital necesita de un frecuencia de reloj para su funcionamiento.

4. Propuesta Final

Con base en lo especificado anteriormente, se diseñó la propuesta final. Para esto creó, un diseño modular de tres niveles, como forma de guía para crear el circuito total. Posteriormente se generó el circuito en NI Multisim.

a. Diseño Modular

i. Primer Nivel

El Primer Nivel Modular se muestra en la Figura 21. Este consiste de un único módulo que se llama **Multímetro Digital**, donde recibe las tres señales que son de interés de analizar y muestra una única salida que sería la lectura en cada caso.

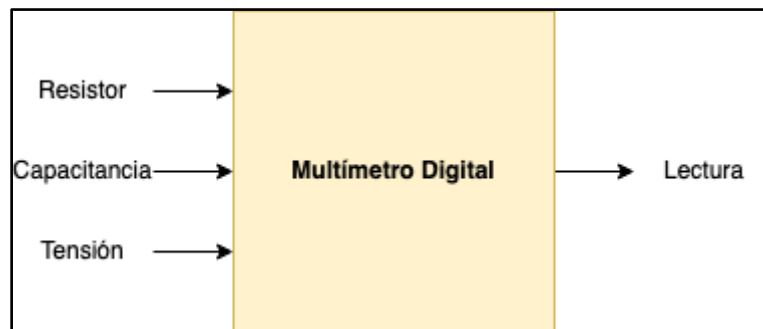


Figura 21. Diagrama de Primer Nivel del Multímetro Digital.

ii. Segundo Nivel

El Segundo Nivel Modular se muestra en la Figura 22. Dentro del módulo de **Multímetro Digital** existen tres submódulos: **Mediciones**, **ADC** y **Displays**. El primero es el submódulo encargado de realizar las mediciones en cada caso (resistencia, capacitancia y tensión), el segundo es el convertidor ADC que recibe la señal que proviene de **Mediciones** y retorna una señal hacia el submódulo **Displays**. Este último muestra la lectura mediante la activación de los siete segmentos.

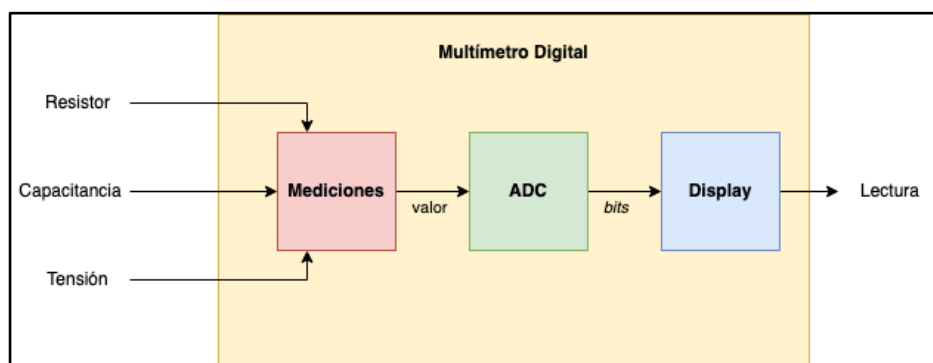


Figura 22. Diagrama de Segundo Nivel del Multímetro Digital.

iii. Tercer Nivel

El Segundo Nivel Modular se muestra en la Figura 23. Como se explicó en el nivel anterior, dentro del submódulo **Mediciones** existen tres submódulos que corresponden a los circuitos encargados de tomar las medidas para señal de resistencia, capacitancia y tensión. Los demás submódulos de **ADC** y **Displays** se conservan igual, ya que, al ser elementos propios de la herramienta de simulación son indivisibles.

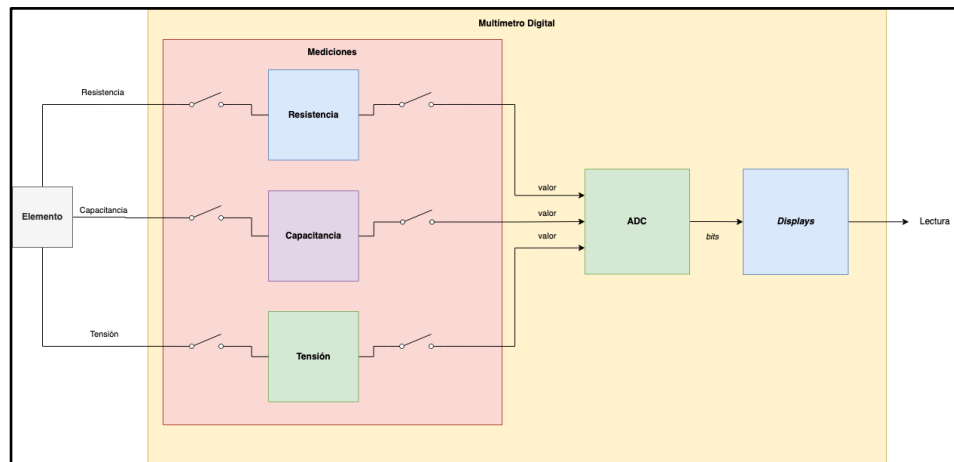


Figura 23. Diagrama de Tercer Nivel del Multímetro Digital.

b. Circuito NI Multisim:

Una vez construido el sistema en completitud, se toma la siguiente captura la cual corresponde a los circuitos acoplados en un único circuito general, basándose en el Tercer Nivel del Diseño Modular explicado previamente. Esta solución final se muestra en la Figura 24.

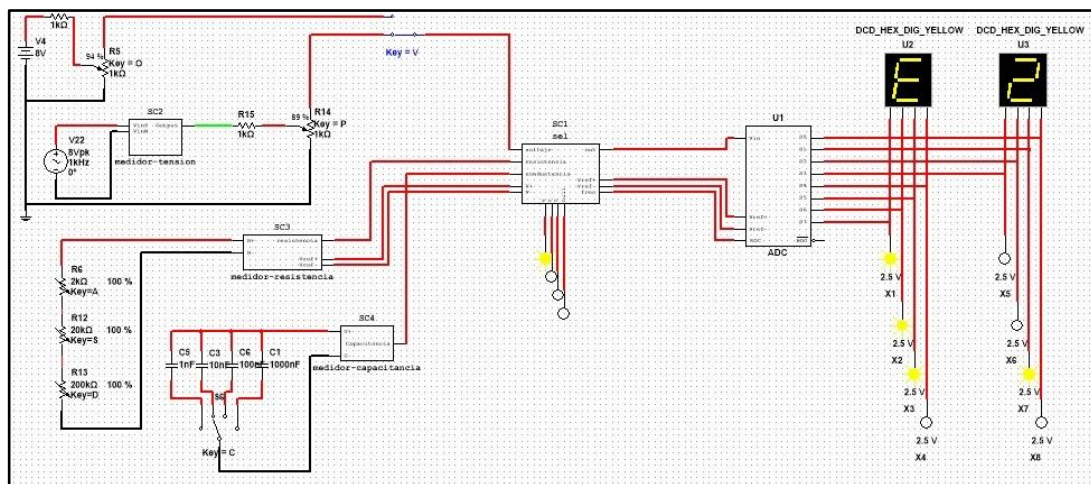


Figura 24. Circuito final diseñado en NI Multisim.

References

McAllister, W. (s.f.). *Voltage divider*. Obtenido de Khan Academy:

<https://www.khanacademy.org/science/electrical-engineering/ee-circuit-analysis-topic/ee-resistor-circuits/a/ee-voltage-divider>

Zamora, L. C. (2021). Amplificador Operacional Básico. *Taller de Diseño Analógico*.

Zamora, L. C. (2021). Diseño DAC - ADC. *Taller de Diseño Analógico*.