



Universidad de Oriente
Facultad de Ingeniería Eléctrica
Departamento de Automática

Trabajo de Diploma

Título: Diseño y simulación de circuitos para las prácticas de laboratorio.

Tesis en Opción del Título de Ingeniero en Automática.

Autor: Gustavo Valdez Chacón.

Tutor: MSc. Ing. Enrique Castro Montero

Santiago de Cuba

2015-2016

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi madre, a toda mi familia, al tutor y a todos los que me han acompañado durante estos años y que han contribuido de una forma u otra a mi formación como persona y como profesional.

Agradecimientos

Agradezco a todas aquellas personas que han aportado su incondicional dedicación y entrega a lo largo de mi carrera, especialmente a:

Mi madre.

Mi familia.

Mi tutor y quienes han puesto todo su empeño para que pudiera realizar el presente trabajo y a todos mis compañeros que de una forma u otra han contribuido en la culminación de este trabajo y de mi carrera.

Resumen

En la actualidad en los procesos tecnológicos es de suma importancia la fiabilidad y precisión de las mediciones, así como el procesamiento de las mismas para la comprensión por el personal que labora en la industria. Por lo que se necesita de una buena preparación por parte de los futuros profesionales que se forman en nuestras universidades. El trabajo está relacionado con el diseño y la simulación de varias prácticas de laboratorio para la disciplina de Instrumentación de la carrera de Automática de la Facultad de Ingeniería Eléctrica en la Universidad de Oriente. Se analizan aspectos relacionados con los contenidos y la situación actual de los laboratorios, se estudian los fundamentos de algunos de los medios de medición que se utilizan en las prácticas de laboratorios. Finalmente se desarrollan tres propuestas relacionadas con : amplificador de instrumentación, convertidor de temperatura en tensión utilizando un RTD y el convertidor digita/analógico. Todos los esquemas fueron simulados mostrándose los resultados obtenidos.

Abstract

Trusty and precision in the measurement are of a great importance in the technological processes nowadays, thus, the processing of them for a better comprehension by the industry workers. That is why a good preparation of the future professionals who are being formed in our university is strongly required. This Diploma Work is closely related with the making of some lab practices in Oriente University, and as an objective, the design and simulation of a temperature conversor, an amplifier and an analogical-digital conversor providing new study materials and a better preparation of the measurement subjects students.

Índice

Introducción.....	1
1. Capítulo: Fundamentación teórica	4
1.2 Fundamentación de la disciplina de Instrumentación.	4
1.2.1 Sistema de habilidades que ayudan a la formación del estudiante se encuentran:.....	6
1.2.2 Contenido de la disciplina:	6
1.2.3Objetivos generales instructivos de la asignatura Mediciones II:.....	7
1.3 El laboratorio tradicional.....	7
1.4 La importancia de las prácticas en las ingenierías.	9
1.5 Análisis de la situación de los laboratorios en la actualidad.....	10
1.6 Equipos y sensores para la medición de temperatura	11
1.7 El Simulador Multisim.	21
1.7.1 Características.....	22
1.7.2 Herramientas.....	22
1.8 Ventajas de la utilización de simuladores electrónico.....	23
2 Capítulo: Propuesta de las prácticas de laboratorio.....	- 25 -
2.1.2 Laboratorio #1 “Estudio del amplificador de instrumentación.”	- 25 -
2.2.7 Aplicaciones.....	- 46 -
2.3.2 Fundamento teórico.....	- 65 -
2.3.3 El convertor D/A.....	- 65 -
2.3.5 El convertor D/A con resistencias ponderadas	- 68 -
2.3.6 El convertor D/A con red R-2R.....	- 70 -
2.3.7 Especificaciones de los convertidores D/A.	- 74 -
Conclusiones.....	84
Recomendaciones.....	85
Referencia bibliográfica.....	- 86 -

Introducción

En la actualidad las mediciones se han convertido en una necesidad de primer orden así como el eslabón esencial en el rendimiento y eficiencia de casi todos los procesos industriales que hoy en día se conocen, está presente en áreas tan disímiles como la industria, la agricultura, el turismo, la medicina, los servicios y otros sectores; y es que definitivamente las mediciones en los procesos de automatización independientemente de donde se ponga en práctica, siempre garantiza mayor calidad, eficiencia, aprovechamiento de recursos, entre otras ventajas.

Actualmente se lleva a cabo un proceso de perfeccionamiento de la enseñanza en el Ministerio de Educación Superior, en correspondencia con la evolución que han tenido las distintas versiones de los planes y programas de estudio, el Departamento de Control Automático, no escapa de ese desafío, realizándose esfuerzos para lograr que los medios de enseñanza respondan cada vez más al propósito de elevar la calidad de la docencia, se disponen de algunos medios y maquetas para el desarrollo de trabajos de laboratorios, pero es necesario desarrollar una concepción de laboratorios que permitan a los estudiantes articular trabajos de simulaciones de circuitos utilizados en las instrumentos de medición con los trabajos prácticos que realizan en los laboratorios de la disciplina de instrumentación.

Problema de la investigación: el insuficiente número de maquetas para el desarrollo de trabajos de laboratorios en la disciplina de instrumentación en la carrera de Automática de la Universidad de Oriente. El **objeto de la investigación:** las prácticas de laboratorios destinados al estudio de dispositivos electrónicos utilizados en instrumentos de medición.

El **objetivo:** el diseño y simulación para la posterior implantación de maquetas de laboratorio para el estudio de los siguientes temas:

- ❖ Convertidor de temperatura en tensión.
- ❖ Convertidor digital analógico.
- ❖ Amplificadores de instrumentación.

Campo de acción los medios de medición para el proceso de la enseñanza en la disciplina de Instrumentación, que permitan el estudio de las funciones de los acondicionadores de señales y los instrumentos electrónicos modernos.

Para garantizar y ampliar las potencialidades de uso de dichas prácticas se propuso como: **Hipótesis del trabajo** si se diseñaran y simularan circuitos que formaran parte de los instrumentos y medios de medición, permitirían el desarrollo de nuevas prácticas de laboratorios, se podría lograr una mayor calidad en proceso de enseñanza aprendizaje en las asignaturas de la disciplina de instrumentación. Para el cumplimiento del objetivo se han propuesto las siguientes tareas de investigación.

Tareas

1. Analizar los objetivos y habilidades en la disciplina de Instrumentación.
2. Analizar la situación de los laboratorios en la actualidad.
3. Definir aspectos teóricos respecto al software (Multisim12.0).
4. Diseñar las prácticas de laboratorio.
5. Simular las prácticas.

Técnicas y Métodos empleados en la investigación.

1. Análisis de fuentes documentales.
2. Técnicas y métodos empíricos: Observación y Entrevistas.
3. Método histórico-lógico.
4. Método de análisis y síntesis.
5. Métodos experimentales: Diseño, Simulación.

Para la realización de esta investigación se empleó el método histórico-lógico al utilizar los conocimientos plasmados en bibliografías para dar una aplicación lógica de los mismos al objeto en cuestión. Al mismo tiempo se emplearon métodos empíricos para el análisis, interpretación y transformación de la realidad apoyando la práctica con mediciones.

Aporte práctico

Con este trabajo de diploma se diseña y simula diferentes circuitos de medición así como proporcionarles a los estudiantes un material de estudio sobre diferentes medios acondicionadores de señales lo cual es importante para el proceso docente educativo.

Estructura del trabajo. La tesis consta de resumen, introducción, dos capítulos, conclusiones, recomendaciones, bibliografía y anexos.

1 Capítulo: Fundamentación teórica

1.1 Introducción.

En este capítulo se presenta un estudio del estado del arte sobre los fundamentos de la disciplina de instrumentación. Así como las características teóricas de la misma. Se hace una breve reseña sobre las habilidades que los estudiantes deben adquirir y desarrollar, así como la importancia de las prácticas de laboratorio. Valoración del laboratorio tradicional y la situación del laboratorio en la actualidad. Caracterización sobre los diferentes sensores, circuitos y acondicionadores de señal. Breve reseña histórica sobre los amplificadores operacionales y el simulador Multisim.

En la enseñanza de las ciencias las prácticas pasan a ocupar un lugar preferente en la formación del profesional. La educación científica no solo se centra en los conceptos y leyes, sino también en los procesos del aprendizaje científico de forma empírica donde los experimentos juegan un papel crucial. Por esta razón es que las instituciones técnicas deben estar equipadas de laboratorios para la consolidación de los conocimientos de sus estudiantes.

En los laboratorios de los centros estudiantiles son muchas las formas y las técnicas que se utilizan para realizar las prácticas. Pero sin lugar a dudas una de estas técnicas es el uso de la instrumentación virtual que está ampliamente difundida en el mundo. Esta permite que el usuario tenga la posibilidad de crear su propio instrumento de medición y definir sus propias funciones, y hasta modificarlas después de creada si así lo desea. Pero no solo crear sus propios instrumentos de medición, sino que también puede desarrollar sistemas más complejos.

1.2 Fundamentación de la disciplina de Instrumentación.

Ningún sistema de control independientemente del tipo y calidad del elemento de regulación y demás medios técnicos que se emplean puede ofrecer resultados en cuanto a exactitud que vayan más allá de los que brinda el sistema de medición empleado. Y es precisamente esa la esencia de la impartición de la disciplina instrumentación: capacitar científicamente al futuro egresado en cuanto a los métodos y principios de acuerdo a las características y exigencias de la aplicación concreta que se desee realizar.

Desde el punto de vista histórico la misma surge vinculada, inherentemente a la propia carrera de automática dada la evidente imposibilidad de regular o controlar un proceso automáticamente, sin los medios técnicos en general y en particular de un apropiado sistema de medición.

El objeto de esta disciplina radica en el estudio de la instrumentación básica y medios técnicos requeridos en la automatización de los procesos tecnológicos industriales incluyendo los métodos y principios de selección, montaje y explotación, así como las normas para su mantenimiento.

El sistema de habilidades y conocimientos, que el alumno adquiere en la disciplina lo preparan para que al culminar la carrera el mismo esté técnicamente dispuesto para abordar los problemas más comunes y frecuentes que se presentan en los sistemas de medición industrial incluyendo las técnicas modernas que en tal sentido se utilizan a nivel mundial.

La disciplina como tal posee una gran significación para el egresado de la carrera de Automática, dado que constituye prácticamente la base técnico material en que se apoya la ciencia del control automático para llevar a cabo desde el punto de vista ingenieril sus realizaciones prácticas.

La disciplina desempeña un papel preponderante en el plan de estudio que debe vencer este egresado, tanto en lo relativo a la componente académica como a la práctica laboral. La instrumentación es en sí la columna vertebral, el esqueleto del sistema de control con la cual se articulan y conjugan los principios teóricos y prácticos de funcionamiento, de los instrumentos y elementos de medición, así como las normas de explotación, que hacen que tales sistemas puedan funcionar en la práctica sin dificultades.

De ahí la importancia que se concede a la misma dentro del plan de estudios y el esfuerzo que es necesario desarrollar desde el punto de vista didáctico-metodológico para que los objetivos propuestos sean cumplidos de manera efectiva.

Esta disciplina, al igual que otras ramas de la ciencia y la técnica se desarrolla rápidamente en el marco de la revolución científico-técnica. La influencia de la microelectrónica en el desarrollo de sensores e instrumentos de medición hace factible la medición práctica de

cualquier magnitud física de interés. El conjunto de asignaturas que conforman esta disciplina, auxiliados por la de electrotecnia y electrónica fundamentalmente, permitirán al estudiante apropiarse gradualmente de los métodos y procedimientos más confiables que le permitan captar la magnitud física, tratarla adecuadamente de forma que se pueda extraer de ella la información realmente necesaria, transmitirla de la manera más efectiva donde debe ser indicada, registrada y/o utilizada como señal a controlar (analógica o digitalmente) en el sistema de control automático.

En la disciplina se produce una necesaria y armónica integración entre los componentes académico, laboral e investigativo del Proceso Docente Educativo, pues prepara al futuro egresado con los conocimientos y habilidades que les permitirán investigar y enfrentar los problemas más apremiantes que se presentan en la práctica.

1.2.1 Sistema de habilidades que ayudan a la formación del estudiante se encuentran:

- Seleccionar los sensores y medios de medición necesarios para la realización de una medición con un mínimo de error.
- Obtener las ecuaciones de trabajo de los métodos clásicos de medición industrial.
- Calcular los errores inherentes en los sensores y los medios de medición.
- Seleccionar y proponer los esquemas adecuados de instalación de los sensores y medios de medición con vistas a reducir los errores metodológicos.
- Determinar las características estáticas y dinámicas de los sensores y medios de medición.

1.2.2 Contenido de la disciplina:

Métodos y técnicas para las mediciones de magnitudes eléctricas, mecánicas y las mediciones de presión, temperatura y flujo.

Sensores de temperatura en base a la unión PN. Circuitos electrónicos para sensores utilizados en mediciones industriales. Amplificadores de instrumentación, convertidores tensión/corriente y corriente /tensión. Circuitos Programables y Microsensores. Sensores inteligentes, Principio de funcionamiento, Generaciones tecnológicas y Características

principales. Comparación entre sensor analógico y sensor inteligente. Métodos de compensación de errores. Ventajas del uso de un microcontrolador y configuraciones típicas. Transductores y transmisores inteligentes, características, generalidades y aplicaciones en algunas magnitudes de interés.

1.2.3 Objetivos generales instructivos de la asignatura Mediciones II:¹

Como objetivos generales instructivos para la asignatura Mediciones se tienen: el estudiante debe ser capaz de aplicar de forma productiva los conceptos básicos de la instrumentación industrial electrónica, ya que esto le permitirá determinar y conocer el funcionamiento de los instrumentos, además de evaluar el error en los esquemas e instrumentos de las mediciones industriales.

Por otro lado debe tener criterios para la selección adecuada de los convertidores primarios utilizados en las mediciones de magnitudes no eléctricas, así como dominar los conceptos básicos del funcionamiento de los modernos sensores y transmisores inteligentes utilizados en las mediciones industriales.

Por último y como vía para lograr el cumplimiento de estos, el estudiantado debe consultar la Literatura Docente, los diferentes manuales en idioma Inglés y Español además del auxilio de Programas de Computación.

1.3 El laboratorio tradicional.

El laboratorio tradicional, ha sido el único lugar de experimentación, durante mucho tiempo, tanto de estudiantes como de profesores. Está demostrada en el ámbito académico, la enorme importancia que tiene para el aprendizaje, la experimentación directa del alumno en el laboratorio tradicional. En el aula el profesor transmite al alumno gran cantidad de información en poco tiempo, por lo que es necesario fortalecer el estudio en otro espacio donde el proceso de aprendizaje sea eficiente. El laboratorio tradicional es lento en la transmisión de la información, sin embargo facilita el planteamiento de problemas que

¹ Tomado del Programa de la Disciplina de Instrumentación.

permitan al estudiante aplicar sus conocimientos, entrenándose en la aplicación del método científico

Un laboratorio tradicional para el estudio de la electrónica está básicamente equipado con la instrumentación más común que pueden ser equipos para la medición, como el multímetro analógico o digital, el osciloscopio (Figura 1.5); para la generación de señales como las fuentes de energía, los osciladores, etcétera. La Figura muestra un osciloscopio.



Figura 1 Osciloscopio.

Una de las limitaciones que implica el laboratorio tradicional es que muchos de estos instrumentos son difíciles de adquirir por su elevado precio en el mercado o porque ya no se producen con fines docentes, por lo que se debe tener extremo cuidado al utilizarlo o al transportarlos cuidando de no romperlos.

La principal ventaja del laboratorio tradicional es su alta interactividad, al tomar contacto el alumno con el experimento real, la motivación que supone observar el experimento, el desarrollo de habilidades cognitivas que se ponen de práctica en el mismo.

Aunque el laboratorio tradicional es un lugar idóneo de experimentación, también presenta inconvenientes, entre los que destacamos:

- a) El material de instrumentación es excepcionalmente caro, lo que hace difícil que cada alumno pueda realizar todos los experimentos que necesite.
- b) Los instrumentos debido a que son fabricados para un fin específico no pueden ser utilizados para tareas generalizadas, y esto trae el inconveniente de usar muchos instrumentos cuando se requieren tareas diferentes.
- c) Los recursos en personas y espacios son restringidos, debido a la masificación y problemas presupuestarios.

- d) Las practicas necesitan de una supervisión más directa de parte del profesor y que cada alumno experimente por sí mismo, por lo que estas no se pueden impartir por un gran número de personas.
- e) El laboratorio tradicional requiere de la presencia física del estudiante.
- f) Los alumnos suelen estar en contacto con dispositivos y técnicas con las que no están familiarizados.

Debido a la necesidad de recursos, a la robustez de las herramientas tradicionales y al desarrollo de las Tecnologías de la Informática y las Comunicaciones, en la actualidad se fusionan las formas de realizar las prácticas en los laboratorios tradicionales para la enseñanza con las técnicas computacionales.

1.4 La importancia de las prácticas en las ingenierías.

En las carreras de ingeniería muchas asignaturas, en especial las de carácter técnico, demandan una actividad práctica que refleje toda la teoría trabajada en el aula de manera que los estudiantes asimilen mejor los conocimientos. Esta actividad debe ser el espacio ideal donde se ponga a prueba el sentido crítico, la observación del fenómeno, la capacidad de resolver problemas en el acto mismo.

La práctica es la mejor oportunidad para comprobar si los conceptos han sido bien enseñados y, por ende, comprendidos, porque es algo mucho más complejo y dinámico. La práctica es el primer contacto con la realidad que no se ve en las aulas. El ingeniero en el mundo profesional aprende haciendo. En esta dinámica es necesario que la universidad tome la iniciativa de crear un ambiente de aprendizaje donde la formación práctica adquiera un papel preponderante y no dejar esta acción y responsabilidad a las empresas del sector productivo.

La práctica de laboratorio es el tipo de clase que tiene como objetivos instructivos fundamentales que los estudiantes adquieran las habilidades propias de los métodos de la investigación científica, amplíen, profundicen, consoliden, generalicen y comprueben los fundamentos teóricos de la disciplina mediante la experimentación, empleando los medios de enseñanza necesarios.

Son diversas las formas que, debido al desarrollo de la computación y a las Tecnologías de la Informática y las Comunicaciones (TIC), se emplean para desarrollar las practicas de laboratorios para fortalecer el aprendizaje de los estudiantes. Entre ellas podemos citar a la implementación de los laboratorios virtuales y los laboratorios remotos, que no por ser más actuales le restan importancia al empleo del laboratorio tradicional.

1.5 Análisis de la situación de los laboratorios en la actualidad.

Con el transcurso de los años los circuitos acondicionadores de señal han sufrido modernos avances. Hoy es posible convertir un valor de temperatura en una señal de corriente, convertir un valor de voltaje en corriente y solo con un circuito integrado de diminuto tamaño.

Por la carencia de estos modernos circuitos en los laboratorios hace dos años atrás estos no se estaban realizando, limitando al estudiante el aprendizaje acerca de su funcionamiento en la práctica.

Esta carencia técnica, que no depende de la Universidad y teniendo en cuenta los cambios sustanciales y acelerados que están ocurriendo en las industrias cubanas, le imposibilita al egresado de la carrera de Automática estar a la par de estos modernos avances técnicos al no tener la preparación necesaria para enfrentarse a ellos. Por lo que se necesita cuanto antes diseñar una estrategia que permita a los estudiantes de la especialidad tener un conocimiento básico acerca de los avances de los circuitos acondicionadores de señal llevados a cabo en algunas industrias, y a los que tendrán que enfrentarse una vez terminados sus estudios.

Pero persisten una serie de problemáticas que limitan el aprendizaje de los estudiantes, como son la existencia de un solo puesto de trabajo, el montaje de las prácticas en una protoboard, lo cual podría provocar fácilmente la ruptura de los circuitos utilizados, esto influye además en que los estudiantes no puedan participar directamente en el montaje y puesta en marcha de estos.

A partir de las situaciones anteriormente descritas nos propusimos realizar el diseño y simulación de las prácticas de laboratorio sobre un convertidor de temperatura en tensión, convertidor digital analógico y amplificadores. Además se realizaron las mediciones

pertinentes para la comprobación del funcionamiento de la simulación de dichos circuitos y el procesamiento de los resultados obtenidos en cada uno de estos laboratorios.

1.6 Equipos y sensores para la medición de temperatura

Para la medición de temperatura existen varios tipos de instrumentos cuyo principio de trabajo se fundamentan en la dilación de un líquido o metal sólido, en la variación de la resistencia de un conductor metálico o semiconductor, en la generación de fem entre conductores metálicos unidos por sus extremos y otros, por variación de temperatura. Los metales se caracterizan por poseer coeficientes térmicos positivos de variación de la resistencia eléctrica; ello es producto de que al aumentar en los mismos la energía interna aumenta su resistividad. Esta propiedad se utiliza desde hace mucho tiempo en el diseño y construcción de sensores de temperatura de resistencia metálica, que se designan con la siglas RTD (*Resistance Temperature Detector*). La relación buscada entre la magnitud que se desea medir, y la propiedad eléctrica del sensor, debe ser, idealmente, de carácter lineal y abarcar un amplio rango de valores. En la realidad, esta linealidad sólo se da dentro de un cierto límite y, por otra parte, los sensores trabajan sólo dentro de un limitado rango de valores. La carencia de linealidad se puede corregir ampliando un circuito dado o, también, se puede calcular matemáticamente a partir de los valores obtenidos tras una medición de calibración (adaptación de característica) [1]

En la figura 2, se muestra los rangos de temperatura de algunos de estos sensores muy utilizados en las industrias.

Tabla 1 Dispositivos y rangos de temperaturas.

Sistema	Rango en °C
Termopares	-200 a 2800
Termorresistencias	-250 a 850
Termistores	-195 a 450

1.6.1 Termopares

Los termopares son los sensores de temperatura eléctricos más utilizados en la industria. Están constituidos por dos metales diferentes cuya característica principal es que genera una fem ante una diferencia de temperaturas entre los puntos de unión de ambos metales. La fem, generada por diferencia de temperatura en los extremos de termopares, es muy pequeño, del orden de los mV. En la figura 1.5 se muestra el esquema de un termopar cualquiera.

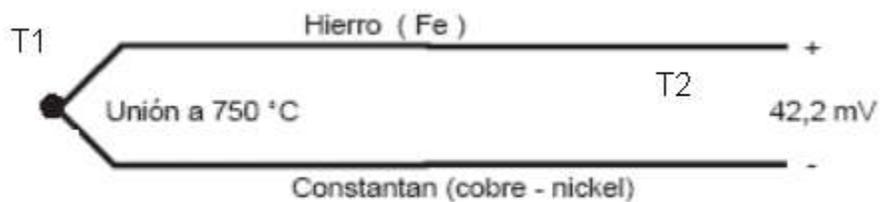


Figura1. 2: Esquema de un termopar.

La expresión matemática que relaciona la fem del termopar con las temperaturas en sus extremos viene dada por

$$E_T = f_1(T_1) - f_2(T_2). \quad (1.0)$$

Donde, T1 es la temperatura del extremo de trabajo del termopar y T2 la temperatura del extremo libre o frío del termopar

Estos dispositivos suelen ir encapsulados en vainas, para protegerlos de las condiciones extremas en ocasiones del proceso industrial que tratan de ayudar a controlar, por ejemplo suele utilizarse acero inoxidable para la vaina, de manera que en un extremo está la unión

y en el otro el terminal eléctrico de los cables, protegido dentro de una caja redonda de aluminio (cabezal).

Las características ideales que deben tener los metales empleados para la construcción de un termopar son:

- producir una f.e.m. elevada → alta sensibilidad.
- variación lineal de la f.e.m. con la temperatura.
- el mayor rango posible de temperatura de funcionamiento.
- estabilidad frente a distintos medios (humo, gases, resistencia a la oxidación, etc.), lo que permite mayor tiempo de duración.
- Tiempo de respuesta pequeño (depende de los materiales utilizados, de sus dimensiones y del medio cuya temperatura se quiere medir)

Comparativamente con los otros transductores de temperatura, los termopares se destacan por su amplio margen de medida, globalmente de - 270 a +3300 °C, y en particular por las características siguientes:

Ventajas:

- Dimensiones reducidas.
- Estabilidad a largo plazo.
- Robustos, versátiles y fiables.
- Económicos.
- Transductores activos (no requieren excitación externa).
-

Desventajas:

- Baja sensibilidad.
- Baja linealidad.
- Requieren unión de referencia.

1.6.2 Termorresistencias

Los detectores de temperatura de resistencia (RTD), denominados también sondas de resistencias o sondas termométricas, se basan en la variación de resistencia que experimentan los metales ante variaciones de temperatura, fenómeno descubierto por Humphrey Davy. La explicación física es: en un conductor, el número de electrones disponibles para la conducción no cambia apreciablemente con la temperatura, pero si esta aumenta, las vibraciones de los átomos alrededor de sus posiciones de equilibrio son mayores; dispersando más eficazmente a los electrones y reduciendo así su velocidad media. Todo esto se traduce en un aumento de la resistencia al aumentar la temperatura, de ahí que las RTD´s tengan un coeficiente de temperatura positivo. [2]

En la figura 1.3 podemos ver el símbolo general empleado para estos sensores

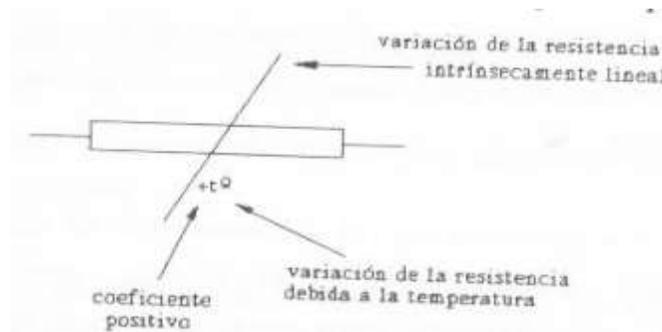


Figura 1.3: Símbolo del RTD.

El valor de la resistencia de un RTD en función de la temperatura T, se puede expresar por medio de la expresión

$$R(T)=R_0*(1+\alpha_1*T+\alpha_2*T^2+\alpha_3*T^3+...) \quad (1.1)$$

donde :

R₀: resistencia a 0°C.

T: temperatura en °C.

α: coeficientes de temperatura de resistencia.

La variación de resistencia del conductor se produce tanto por el cambio de resistividad, como por el cambio de dimensiones del RTD.

Normalmente, esta variación es bastante lineal en márgenes pequeños de temperatura, por lo que la expresión anterior para muchas aplicaciones se suele considerar mediante una expresión lineal:

$$R(t) = R_0(1 + \alpha \cdot T) \quad (1.2)$$

Donde el coeficiente α , es de interés que sea de valor grande para aumentar la sensibilidad, y constante con la temperatura para aumentar la linealidad. El fabricante proporciona este parámetro para 0°C.

La resistencia R_0 , la cual viene determinada por las dimensiones del RTD y la resistividad del metal. Se desea que esta sea alta y de pequeño tamaño. Como consecuencia a esto ocurre una disminución del tiempo de respuesta y una disminución del error producido por los efectos de las resistencias de los hilos de conexión.

A la hora de construir un RTD se buscan metales cuyas características se aproximen lo más posible al comportamiento ideal. Esas características son:

- ❖ alto coeficiente de temperatura de resistencia (alta sensibilidad).
- ❖ alta resistividad (alta velocidad de respuesta y menor error).
- ❖ relación lineal entre coeficiente y temperatura.
- ❖ estabilidad de las características durante el tiempo de vida útil del material conductor.

Atendiendo a lo antes expuesto podemos decir que los metales más usados en la construcción de RTD son el cobre, el níquel y el platino, cuyas características se muestran más adelante en la Figura 1.3.

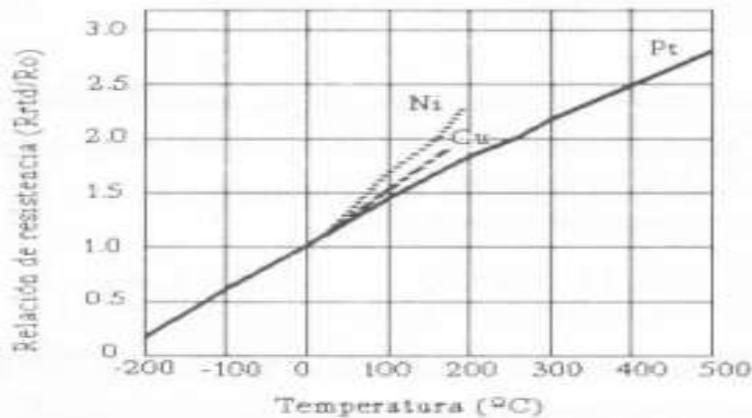


Figura 1.4: Características de los RTD de cobre, níquel y platino.

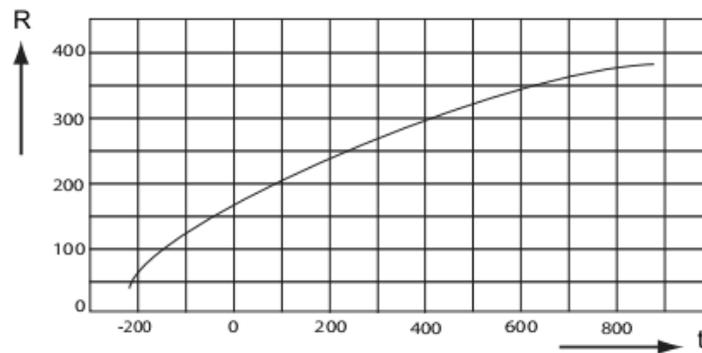


Figura 1.5: Curva característica de una Pt100.

1.6.3 Termistores

El termistor es esencialmente un semiconductor que se comporta como un "resistor - térmico", compuesto de una mezcla sintetizada de óxidos metálicos. Se pueden encontrar en el mercado con la denominación NTC (*Negative Temperature Coefficient*) habiendo casos especiales de coeficiente positivo cuando su resistencia aumenta con la temperatura y se los denomina PTC (*Positive Temperature Coefficient*). Posee elevada sensibilidad a variaciones de temperatura lo que hace que el termistor resulte muy adecuado para mediciones precisas de esta magnitud, utilizándose ampliamente para aplicaciones de control y compensación. Su desventaja es la falta de estabilidad en el tiempo y su gran dispersión en comparación con las termorresistencias, que pueden fabricarse con valores de resistencia superiores, mayores exactitudes y valores normalizados universalmente que

garantizan su intercambio sin calibración previa. La ventaja más importante es su pequeña masa, lo que permite velocidades de respuesta muy altas.

La relación entre la resistencia del termistor y la temperatura viene dada por la expresión siguiente

$$R_t = R_o e^{\beta \left(\frac{1}{T_t} - \frac{1}{T_o} \right)} \quad (1.3)$$

Donde:

R_t : resistencia en Ω a la temperatura absoluta T_t .

R_o : resistencia en ohmios a la temperatura absoluta de referencia T_o .

β = constante dentro de un intervalo moderado de temperaturas.

1.6.4 Algunas consideraciones acerca de los Amplificadores Operacionales:²

En una época tan temprana como los años 40, se empezaron a usar técnicas operacionales en los computadores analógicos. El nombre de amplificador operacional deriva del concepto de un amplificador dc (amplificador acoplado en continua) con una entrada diferencial y ganancia extremadamente alta.

Un amplificador operacional es un dispositivo electrónico activo capaz de ofrecer una tensión de salida en función de una tensión de entrada. Estos presentan cinco patas. Dos de ellas son las entradas del dispositivo; la primera de ellas llamada entrada inversora se halla indicada en los esquemas con un signo menos, la otra denominada entrada no inversora se indica mediante un signo más. Otra de las patas del amplificador operacional corresponde a la salida del dispositivo mientras que los dos restantes corresponden a la alimentación requerida por el dispositivo ($\pm V_{cc}$).

² Tomado de Internet.

Con él se pueden amplificar señales, atenuarlas, filtrarlas y son muy utilizados para el ajuste del cero. Unos pocos años más tarde los amplificadores operacionales se convirtieron en una herramienta estándar de diseño, abarcando aplicaciones mucho más allá del ámbito original de los computadores analógicos. El desarrollo gradual de los amplificadores operacionales dio lugar al surgimiento de una nueva era en los conceptos de diseño de circuitos, dando paso entre otras cosas a la construcción de los Amplificadores de Instrumentación.

En el trabajo se utilizaron diferentes circuitos únicamente para amplificar, por lo que en el siguiente epígrafe se procederá a dar una caracterización de ellos.

1.6.4.1 Amplificador Operacional TL081.

El TL081 es un amplificador diferencial (A.D) de bajo costo que posee en sus entradas dos JFET de alta velocidad. El dispositivo tiene a la entrada una baja corriente al igual que el offset.

El TL081 es compatible pata a pata con el estándar LM741 y usa la misma circuitería de compensación de voltaje, este puede ser usado en aplicaciones tales como: integrados de alta velocidad, convertidores D/A de alta velocidad, circuitos de barrido y muestreo (sample-and-hold), entre otros circuitos que requieran un bajo voltaje de offset de entrada, una corriente de polarización baja, alta impedancia de entrada y un amplio ancho de banda.

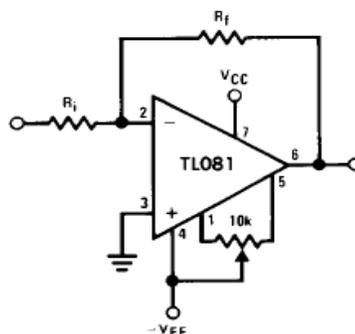


Figura1.6: Esquema eléctrico del AO TL081

1.6.4.2 Amplificador de instrumentación integrado INA 110

La figura 2 muestra el diagrama en bloques correspondiente a su estructura interna y su representación esquemática. Este amplificador está basado en una configuración de tres amplificadores operacionales. Dos de los cuales actúan de seguidores de tensión con entrada FET de forma que se obtiene una muy alta impedancia de entrada (del orden del teraohmio).

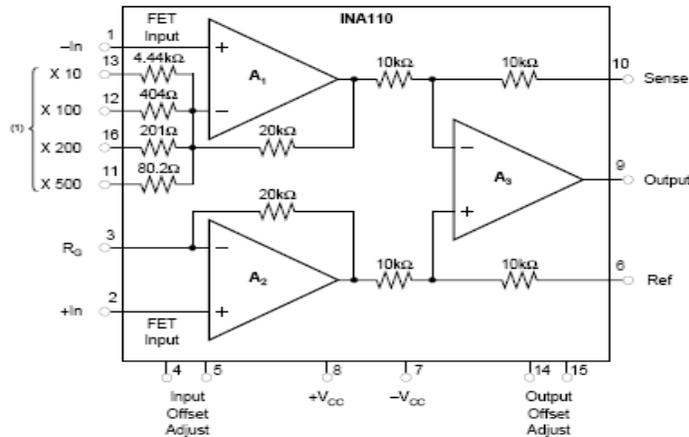


Figura 1.7: Diagrama en bloques del A.I. INA110

Aparecen además en la etapa de entrada tres resistencias internas que permiten seleccionar la ganancia del amplificador. La etapa de salida es un amplificador diferencial de ganancia unidad con cuatro resistencias de precisión equilibradas para proporcionar un elevado factor de rechazo a modo común (CMRR). El CMRR oscila entre 104 y 110 dB dependiendo de la ganancia que se seleccione. Está provisto también de terminales de censado remoto de tensión y de ajuste del offset de salida (pines 10 y 6 respectivamente).

La selección de la ganancia se efectúa mediante la conexión del terminal 3 a los terminales de selección de ganancia según la tabla que se adjunta. Otros valores de ganancia son posibles obtenerlos mediante la conexión de una resistencia entre el terminal 3 y los terminales 11, 12 y 16 conectados entre sí.

Tabla 1.2: Selección de ganancia INA110

GAIN	CONNECT PIN 3 TO PIN	GAIN ACCURACY (%)	GAIN DRIFT (ppm/°C)
The following gains have guaranteed accuracy:			
1	none	0.02	10
10	13	0.05	10
100	12	0.1	20
200	18	0.2	30
500	11	0.5	50
The following gains have typical accuracy as shown:			
300	12, 18	0.25	10
600	11, 12	0.25	40
700	11, 18	2	40
800	11, 12, 18	2	80

1.6.4.3 Compensación del ajuste.

La figura 4 muestra el circuito de ajuste de ganancia para el INA110. Ambos offset (de la fase de entrada y la fase de salida) pueden ser ajustados por separado. Destacando que el offset que se refirió a la entrada del INA110 (RTI) es el offset de la fase de la entrada más el offset de la fase del salida dividido por la ganancia del de la fase de entrada. Esto permite especificación del offset independiente de la ganancia.

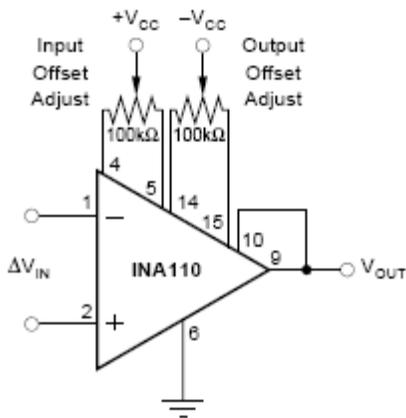


Figura 1.8: Circuito para el ajuste de offset en el INA110.

1.7 *El Simulador Multisim.*

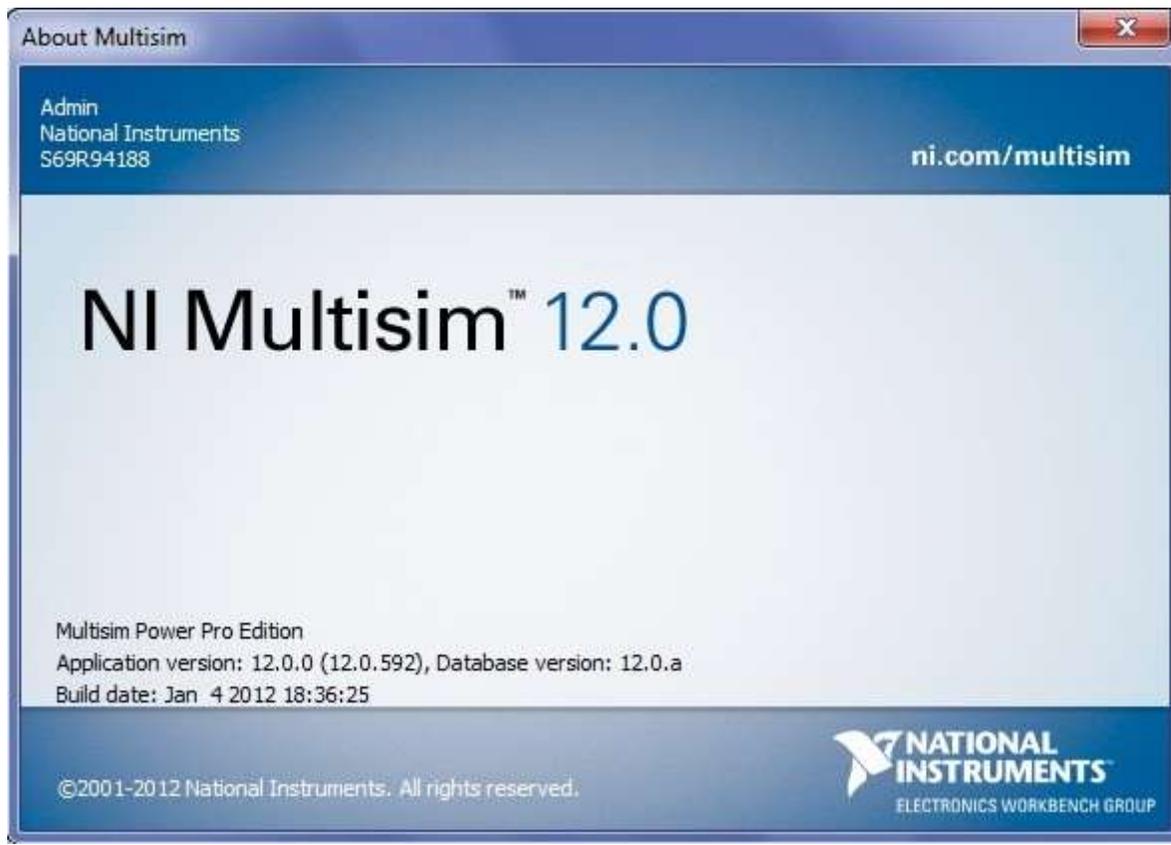


Figura1.9: Ventana de inicio de NI Multisim

NI Multisim12.0 (anteriormente *MultiSIM*) y previamente conocido como *Electronics Workbench*, es un entorno gráfico para diseñar circuitos electrónicos y un programa de simulación que es parte de un juego de programas de diseño de circuitos, junto a *NI Ultiboard*.

Este programa es además, un simulador interactivo de circuitos electrónicos muy utilizado en el entorno industrial para la simulación de circuitos electrónicos, tanto analógicos como digitales. La utilización de este programa es un buen comienzo para el aprendizaje de la electrónica por parte del alumno, debido a las ventajas que posteriormente se exponen.

1.7.1 Características

La utilización de este programa es un buen comienzo para el aprendizaje de la electrónica por parte del alumno, debido a dos cuestiones básicas. Por un lado, *Multisim* cuenta con las ventajas de los simuladores clásicos a la hora de extraer resultados del comportamiento de los circuitos, en diferentes regímenes de operación (simulaciones *DC*, *AC*, transitorios, etc.). Por otro lado, dicho *software* dispone de un entorno gráfico óptimo desde el punto de vista del aprendizaje del alumno. Entre sus características más destacadas se pueden mencionar las siguientes:

- Posee potencia gráfica y una capacidad multitarea.
- Posee esquemas predefinidos, módulos de simulación *Spice* y *VHDL*.
- Consta de soporte para circuitos de radiofrecuencia y generador de placas *PCB*, entre otras.
- Incluye la simulación de micro controlador (anteriormente conocida como *MultiMCU*), así como características integradas exportadas e importadas.
- Posibilita ejecutar las simulaciones manipulando un instrumento virtual con el mismo aspecto que el instrumento de medida del que se dispone físicamente.
- Dispone de librerías de componentes y de instrumentación (generadores de señal, osciloscopios, analizadores de espectros, etc.) cuyas interfaces gráficas son idénticas al instrumental del laboratorio.

1.7.2 Herramientas.

Varias son las herramientas con que cuenta este programa, se exponen las más utilizadas como son:

- ***MultiCap***: Se utiliza para la captura de diseño y simulación.
- ***Rename/Renumber Components***: Permite renombrar y reenumerar los componentes.
- ***Update Circuit Components***: Se usa para actualizar datos de los componentes.
- ***Symbol Editor***: Se utiliza para editar los símbolos.
- ***Description Box Editor***: Herramienta de anotación de circuitos que permite añadir notas de diseño/comentarios del revisor en cualquier sitio del esquemático.

- **Database Wizard:** Permite salvar componentes en la base de datos.
- **Component Wizard:** Se utiliza para la creación de componentes y librerías.

1.8 Ventajas de la utilización de simuladores electrónico.

Utilizar simuladores en las aulas permite y colabora en la transmisión de conocimiento de forma interactiva, pues el estudiante, en lugar de la actitud un tanto pasiva de las clases magistrales, se implicaría activamente en el proceso, y se beneficiaría, además, de un conjunto de ventajas que presentan como las siguientes:

- Eliminan riesgos que se presentan en la interacción con la realidad tanto para los estudiantes como para los dispositivos, lo que permite centrarse en el aspecto de la realidad que se va a estudiar.
- Producen retroalimentación rápida debido a los resultados inmediatos ocasionados por los cambios introducidos en ciertos parámetros de la simulación. Esto permite corregir o confirmar la acción del estudiante. En relación con ello, el aprendizaje se da por esta posibilidad de modificar valores de variables para inferir el comportamiento del modelo, o para ensayar o experimentar hipótesis.
- Permite mantener el interés de los estudiantes. Este beneficio se presenta gracias a que la información de los applets es de tipo dinámico, interactivo y multimedia, lo que no es posible que se presente en el papel, pizarrón, diapositivas, entre otros que involucran al estudiante en su aprendizaje, ya que es él, el que tendrá que manejar el simulador, observar los resultados y actuar en consecuencia.
- Único software que provee una variedad de Instrumentación virtual que son cableados dentro del esquemático así como si se conectara un instrumento real al circuito.
- Los instrumentos que se utilizan en la simulación son completamente interactivos, por lo tanto puedes cambiar su configuración mientras la simulación está corriendo e inmediatamente ver los nuevos resultados y es el único que permite modificar su esquemático.

1.9 Conclusiones del capítulo.

- Las condiciones actuales de las maquetas y medios necesarios para la realización de los trabajos de laboratorios, condicionan la necesidad de nuevos diseños acordes con las exigencias de creación de habilidades en los estudiantes .
- Por la carencias materiales, una solución es el empleo de programas de simulación, que permitan desarrollar las prácticas en un ambiente de simulación que acerquen al estudiantes a sus condiciones de trabajo, en ese sentido el programa Multisim reúne las condiciones para ese tipo de simulaciones.

2 Capítulo: Propuesta de las prácticas de laboratorio

2.1.1 Introducción.

En este capítulo se procede a confeccionar el informe de las diferentes prácticas de laboratorio, así como brindar los resultados de las diferentes mediciones y sus respectivos análisis.

2.1.2 Laboratorio #1 “Estudio del amplificador de instrumentación.”

Objetivos:

Al acabar esta práctica el alumno debe ser capaz de:

- Decidir cuándo emplear un A.I. en lugar de un amplificador inversor o no inversor.
- Describir qué condiciones causan que la tensión en modo común sea mayor que cero.
- Comprender las ventajas de un amplificador de instrumentación frente al diferencial.
- Familiarizarse con las características de un amplificador de instrumentación comercial.

2.1.3 Fundamentos teóricos.

2.1.4 Amplificador diferencial.

El amplificador diferencial ideal es un tipo de amplificador que proporciona directamente a su salida una señal en tensión que es proporcional a la diferencia de tensiones existentes a sus entradas. La configuración típica del amplificador diferencial está representada en la siguiente figura 2.1.

$$U_{0_1} = -\frac{R_2}{R_1} E_1 \quad (2.1)$$

$$U_{0_2} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) E_2 \quad (2.2)$$

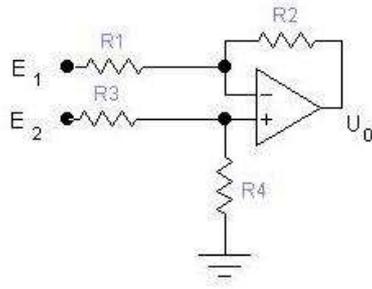


Figura 2.1: Esquema de Amplificador diferencial.

$$U_0 = U_{0_1} + U_{0_2} = -\frac{R_2}{R_1} E_1 + \frac{R_4}{R_3 + R_4} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) E_2 \quad (2.3)$$

Si consideramos

$$E_d = E_2 - E_1 \quad E_{mc} = (E_2 + E_1)/2$$

Entonces

$$E_1 = E_{mc} - E_d/2 \quad (2.4)$$

$$E_2 = E_{mc} + E_d/2 \quad (2.5)$$

(2.4) y (2.5) en (2.3)

$$U_0 = U_{0_1} + U_{0_2} = -\frac{R_2}{R_1} \left(E_{mc} - \frac{E_d}{2}\right) + \frac{R_4}{R_3 + R_4} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \left(E_{mc} + \frac{E_d}{2}\right) \quad (2.6)$$

$$U_0 = -\frac{R_2}{R_1} E_{mc} + \frac{R_2}{R_1} \frac{E_d}{2} + \frac{R_4}{R_3 + R_4} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) E_{mc} + \frac{R_4}{R_3 + R_4} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{E_d}{2} \quad (2.7)$$

$$U_0 = E_{mc} \left[-\frac{R_2}{R_1} + \frac{R_4}{R_3 + R_4} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \right] + \frac{E_d}{2} \left[\frac{R_2}{R_1} + \frac{R_4}{R_3 + R_4} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \right] \quad (2.8)$$

Es necesario eliminar E_{mc} para amplificar solamente E_d :

$$E_{mc} \left[-\frac{R_2}{R_1} + \frac{R_4}{R_3 + R_4} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \right] = E_{mc} \left[\frac{-R_2(R_3 + R_4) + R_4(R_1 + R_2)}{R_1(R_3 + R_4)} \right] = E_{mc} \left[\frac{R_4 R_1 - R_2 R_3}{R_1(R_3 + R_4)} \right] \quad (2.9)$$

Por lo que la Ganancia del Modo Común es

$$G_{mc} = \frac{R_4 R_1 - R_2 R_3}{R_1 (R_3 + R_4)} \quad (2.10)$$

Para buscar el cero $R_4 R_1 = R_2 R_3$ por lo que $R_2 / R_1 = R_4 / R_3$

Según lo expuesto anteriormente si se pusieran ambas señales de entrada conectadas a una tensión común, la salida del amplificador diferencial sería nula. Esto sólo ocurre para el caso ideal. La tensión común recibe el nombre de tensión en modo común V_{CM} . Sin embargo, en el amplificador diferencial real esto no ocurre. En la práctica no es posible fabricar las entradas del operacional idénticamente iguales y por otro lado no se da tampoco una igualdad total entre las resistencias que hay conectadas al A.O. En consecuencia, aparece una tensión a la salida procedente del modo común de la entrada. La relación entre las tensiones de modo común a la salida y en la entrada se denomina ganancia en modo común A_{CM} .

$$A_{cm} = \frac{V_{ocm}}{V_{icm}} \quad (2.11)$$

Siendo V_{icm} y V_{ocm} las tensiones en modo común a la entrada y salida del amplificador diferencial respectivamente. Una técnica sencilla para minimizar la tensión de salida en modo común consiste en añadir convenientemente una pequeña resistencia variable con el fin de equilibrar el valor de las distintas resistencias que intervienen.

La ganancia a Modo Diferencial es

$$G_d = \frac{1}{2} \left[\frac{R_2}{R_1} + \frac{R_4}{R_3 + R_4} \frac{R_2 + R_1}{R_1} \right] = \frac{1}{2} \frac{R_2 (R_3 + R_4) + R_4 (R_2 + R_1)}{R_1 (R_3 + R_4)} \quad (2.12)$$

$$G_d = \frac{1}{2} \frac{R_2 R_3 + R_4 R_1 + 2R_4 R_2}{R_1 (R_3 + R_4)} \quad (2.13)$$

Si se logra cumplir con $R_4 R_1 = R_2 R_3$

$$G_{MC} = 0$$

$$G_d = \frac{1}{2} \frac{R_2 R_3 + R_4 R_1 + 2R_4 R_2}{R_1 (R_3 + R_4)} = \frac{R_2 (R_3 + R_4)}{R_1 (R_3 + R_4)} = \frac{R_2}{R_1}$$

Por lo que:

$$\boxed{U_0 = \frac{R_2}{R_1} (E_d) = \frac{R_2}{R_1} (E_2 - E_1)} \quad (2.14)$$

El éxito de la amplificación de las señales diferenciales respecto a las de modo común radica en la igualdad entre sí de las resistencias que tiene conectadas, así como en la calidad del amplificador operacional.

En la práctica es muy difícil cumplir con $R_4 R_1 = R_2 R_3$ que es lo que determina el nivel de rechazo a modo común. Los valores de los cuatro resistores dependen:

- La tolerancia de los resistores.
- Coeficientes térmicos.

Para describir la calidad de un amplificador operacional o de un montaje de un amplificador, en particular se define la cantidad llamada Factor de Rechazo en Modo Común (CMRR). Esta cantidad es igual al cociente de las ganancias diferencial y modo común

$$CMRR = \frac{G_D}{G_{MC}} = \frac{\frac{1}{2} \frac{R_2 R_3 + R_4 R_1 + 2R_4 R_2}{R_1 (R_3 + R_4)}}{\frac{R_4 R_1 - R_2 R_3}{R_1 (R_3 + R_4)}} \quad (2.15)$$

$$CMRR_R = \frac{1}{2} \frac{R_2 R_3 + R_4 R_1 + 2R_4 R_2}{R_4 R_1 - R_2 R_3} \quad (2.16)$$

Con este parámetro definido un amplificador diferencial estará más cerca de su comportamiento ideal cuando presente un CMRR lo más elevado posible. El caso ideal corresponderá a un CMRR infinito ($A_{cm}=0$).

Es muy normal que se exprese en dB

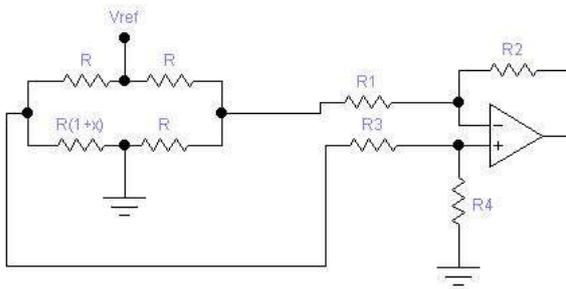
$$CMRR_{dB} = 20 \log CMRR$$

Si se satisface $R_4 R_1 = R_2 R_3$ el CMRR es infinito.

Si no se considera ideal el AO, la expresión del CMRR total del amplificador diferencial es

$$\frac{1}{CMRR_T} = \frac{1}{CMRR_{AO}} + \frac{1}{CMRR_R} \quad (2.17)$$

El siguiente circuito es muy frecuente utilizarlo como acondicionador.



Pero ahora

$$R_1' = R_1 + \frac{R}{2}$$

Si $X \ll 1$

$$R_3' = R_3 + \frac{R}{2}$$

Figura 2.2: Esquema de circuito acondicionador.

En la práctica se tiene que a medida que se disequilibra el puente se deterioran los valores R_1' y R_3' alterando la condición $R_4 R_1 = R_2 R_3$ hay que buscar R_1 y R_3 altos para buscar alta impedancia de entrada.

2.1.5 Amplificador de Instrumentación.

La amplificación de una señal diferencial mediante una ganancia ajustable es un requerimiento muy común en un sistema de medida. El amplificador diferencial efectúa dicha labor, pero con exactitud moderada. El amplificador diferencial presenta varias limitaciones entre las que cabe citar:

- la impedancia de entrada que ven las señales de entrada es finita obligando a que las fuentes de señal externas estén muy próximas al modelo de fuente de tensión ideal.
- la impedancia de entrada no es la misma según sea la entrada inversora o la no inversora.
- el CMRR es un parámetro que depende en gran medida de las resistencias externas que se conecten al amplificador diferencial. Su variación térmica o temporal degrada el CMRR.

- para ajustar la ganancia del circuito es preciso variar dos resistencias, siendo necesario que se siga manteniendo el balanceo de todas ellas.

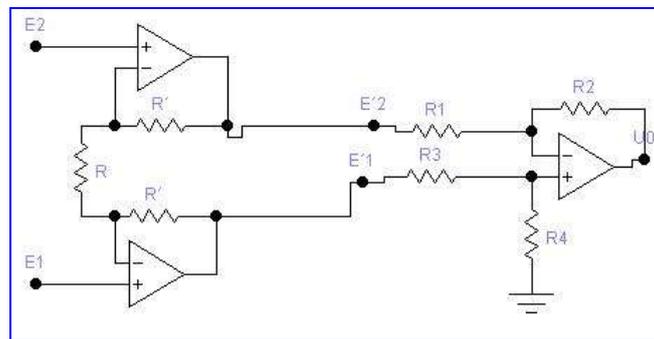


Figura 2.3: Esquema eléctrico de un amplificador de instrumentación.

Un circuito que minimiza los anteriores inconvenientes es el llamado amplificador de instrumentación. La configuración típica de un amplificador de instrumentación se muestra en la figura.

Esta estructura consta de dos etapas. La primera emplea dos amplificadores operacionales en configuración de seguidor junto con tres resistencias. Proporciona tanto alta impedancia de entrada como un ajuste de la ganancia mediante una sola resistencia (R_x). El hecho de conectar directamente la señal de entrada a las entradas no inversoras de los A.O. hace posible que no influya la impedancia de la fuente que se conecte y que se obtenga un mayor CMRR. La segunda etapa consiste en un amplificador diferencial de ganancia unidad y cuatro resistencias iguales. Es muy importante que las resistencias sean de gran precisión para producir el adecuado apareamiento y obtener un elevado CMRR (valores típicos son los de 120 dB o mayor).

Debido a la necesidad de producir un elevado apareamiento y exactitud entre los componentes que se conectan alrededor de los A.O. esto ha llevado a los fabricantes de amplificadores de instrumentación a encapsular en un mismo circuito integrado todos los componentes y etapas que conforman este amplificador de forma que en apariencia todo el sistema actúa como si se tratara de un único componente. Para asegurar la precisión requerida en las resistencias, estas son obtenidas mediante técnicas láser de fabricación. Esta técnica de integración permite conseguir amplificadores de instrumentación de alta calidad.

$$E^\circ 2 = E_2 \left(1 + \frac{R^\circ}{R}\right) - E_1 \frac{R^\circ}{R} = \left(E_{mc} + \frac{E_d}{2}\right) \left(1 + \frac{R^\circ}{R}\right) - \left(E_{mc} - \frac{E_d}{2}\right) \frac{R^\circ}{R}$$

$$\boxed{E^\circ 2 = E_{mc} + E_d \left(\frac{1}{2} + \frac{R^\circ}{R}\right)} \quad (2.18)$$

$$E^\circ 1 = E_1 \left(1 + \frac{R^\circ}{R}\right) - E_2 \frac{R^\circ}{R} = \left(E_{mc} - \frac{E_d}{2}\right) \left(1 + \frac{R^\circ}{R}\right) - \left(E_{mc} + \frac{E_d}{2}\right) \frac{R^\circ}{R}$$

$$\boxed{E^\circ 1 = E_{mc} - E_d \left(\frac{1}{2} + \frac{R^\circ}{R}\right)} \quad (2.19)$$

$$U_0 = -E^\circ 2 \frac{R_2}{R_1} + E^\circ 1 \frac{R_4}{(R_3 + R_4)} \frac{R_1 + R_2}{R_2} \quad (2.20)$$

La primera etapa deja bajar la señal de modo común con ganancia 1 amplificando el modo diferencial $\left(\frac{1}{2} + \frac{R^\circ}{R}\right)$ lo que permite ajustar la ganancia en una sola R lo que no de forma lineal.

$$U_0 = \left(-E_{mc} - E_d \left(\frac{1}{2} + \frac{R^\circ}{R}\right)\right) \frac{R_2}{R_1} + \left(E_{mc} - E_d \left(\frac{1}{2} + \frac{R^\circ}{R}\right)\right) \frac{R_4}{R_3 + R_4} \frac{R_1 + R_2}{R_2} \quad (2.21)$$

$$\boxed{U_0 = -E_D \left(\frac{1}{2} + \frac{R^\circ}{R}\right) \frac{R_2 R_3 + R_4 R_1 + 2R_4 R_2}{R_1 (R_3 + R_4)} + E_C \frac{R_4 R_1 - R_2 R_3}{R_1 (R_3 + R_4)}} \quad (2.22)$$

Variar R no afecta el Rechazo a Modo Común. Arreglando (2.20) tenemos que

$$U_0 = -E_D \left(1 + 2 \frac{R^\circ}{R}\right) \frac{1}{2} \frac{R_2 R_3 + R_4 R_1 + 2R_4 R_2}{R_1 (R_3 + R_4)} + E_C \frac{R_4 R_1 - R_2 R_3}{R_1 (R_3 + R_4)} \quad (2.23)$$

$$G_{DAI} = \left(1 + 2 \frac{R^\circ}{R}\right) \frac{1}{2} \frac{R_2 R_3 + R_4 R_1 + 2R_4 R_2}{R_1 (R_3 + R_4)} \quad (2.24)$$

$$G_{MCAI} = \frac{R_4 R_1 - R_2 R_3}{R_1 (R_3 + R_4)} \quad (2.25)$$

$$CMRR_{AI} = \frac{G_{DAI}}{G_{MCAI}} = \left(1 + 2 \frac{R^\circ}{R}\right) \frac{1}{2} \frac{\frac{R_2 R_3 + R_4 R_1 + 2R_4 R_2}{R_1 (R_3 + R_4)}}{\frac{R_4 R_1 - R_2 R_3}{R_1 (R_3 + R_4)}} \quad (2.26)$$

$$CMRR_{AI} = \left(1 + 2 \frac{R^\circ}{R}\right) \frac{1}{2} \frac{R_2 R_3 + R_4 R_1 + 2R_4 R_2}{R_4 R_1 - R_2 R_3} \quad (2.27)$$

Sustituyendo (14) en (28)

$$CMRR_{AI} = \left(1 + 2 \frac{R^\circ}{R}\right) CMRR_R \quad (2.28)$$

Si se consideran ideales los A.O.

$$\frac{1}{CMRR_T} = \frac{1}{CMRR_{A1}} + \frac{1}{CMRR_{A2}} + \left(1 + 2 \frac{R^\circ}{R}\right) \left[\frac{1}{CMRR_3} + \frac{1}{CMRR_R} \right] \quad (2.29)$$

Integrados en A1 y A2 en el mismo chip y aumentan el CMRR

Luego $R_4 R_1 = R_2 R_3$

$$U_0 = -E_D \left(1 + 2 \frac{R^\circ}{R}\right) \frac{R_2}{R_1} \quad (2.30)$$

Influencias de las tensiones de offset.

$$U_{0of} = \left(1 + 2 \frac{R^\circ}{R}\right) \frac{R_2}{R_1} (e_{D2} - e_{D1}) + e_{D3} \quad \text{- es referido a la salida (RTO)} \quad (2.31)$$

$$\delta_{ED} = \frac{U_{0of}}{U_0} = \frac{\left(1 + 2 \frac{R^\circ}{R}\right) \frac{R_2}{R_1} (e_{D2} - e_{D1}) + e_{D3}}{E_D \left(1 + 2 \frac{R^\circ}{R}\right) \frac{R_2}{R_1}} \quad (2.32)$$

$$\delta_{ED} = \frac{(e_{D2} - e_{D1})}{E_D} + \frac{e_{D3}}{\left(1 + 2 \frac{R^\circ}{R}\right) \frac{R_2}{R_1} E_D} \quad (2.33)$$

La primera etapa llega completa a la salida.

2.1.6 Actividades y procedimiento experimental.

1. Diseñar el divisor para obtener 10mV.
2. Diseñar el amplificador diferencial para obtener ganancia 10.
3. Con las dos entradas conectadas a tierra medir la tensión de salida. Puede hacerse necesario realizar un ajuste de offset del A.D.
4. Conectar las dos entradas a una misma tensión en el divisor y medir la tensión a la salida. Realizar el ajuste de la ganancia a modo común.
5. Conectar las dos entradas a los puntos con 10 mV de tensión diferencial, medir la tensión de salida, invertir los cables de conexión y medir nuevamente la salida. Argumentar los resultados obtenidos.
6. Preparar el amplificador INA110 para obtener ganancia 1.
7. Con las dos entradas conectadas a tierra medir la tensión de salida. Puede hacerse necesario realizar un ajuste de offset del A.I. Analizar en cual etapa es conveniente realizar el ajuste.
8. Conectar las dos entradas del INA110 a una misma tensión en el divisor.
9. Preparar el amplificador INA110 para obtener ganancia 10. Conectar las dos entradas del INA110 a los puntos con 10 mV de tensión diferencial, medir la tensión de salida, invertir los cables de conexión y medir nuevamente la salida. Argumentar los resultados obtenidos.
10. Conectar las dos entradas del INA110 a una misma tensión en el divisor, medir la tensión a la salida y comprobar el rechazo al modo común. Conectar una caja de

resistencia variable entre el Terminal 6 y tierra, variar la resistencia en 10Ω y 100Ω analizar los resultados.

11. Con las dos entradas conectadas a tierra medir la tensión de salida, para cada una de las diferentes ganancias posibles. Analizar los resultados. Para el INA110.

2.1.7 Desarrollo de las actividades y procedimiento experimental.

2.1.8 Calculo de los valores de resistencia del divisor de tensión (10mV).

En este caso el divisor de tensión está formado por cuatro resistencias una de las cuales es variable para así poder ajustar diferentes valores de voltaje.

A continuación, se representa lo que será el divisor:

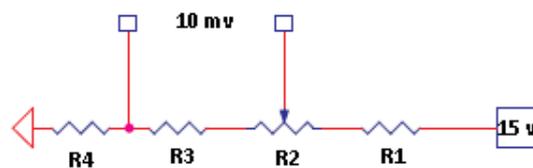
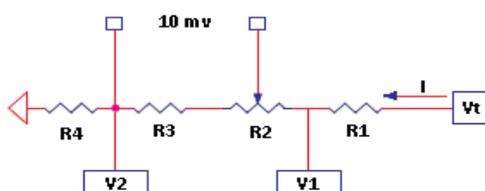


Figura 2.4: Divisor de tensión(a).

En este caso se desea obtener 10 mV entre los puntos representados, con un voltaje de alimentación de 15 V.

Para el cálculo de las resistencias se tuvieron en cuenta algunas consideraciones:

- La corriente que debe circular por el divisor es de 1 mA.
- El voltaje entre las resistencias R1 y R2 debe ser de 13 V.
- El voltaje entre las resistencias R3 y R4 debe ser de 2 V.



$$I = 1 \text{ mA} = 0,001 \text{ A.}$$

$$V1 = 13 \text{ V.}$$

$$V2 = 2 \text{ V.}$$

Figura 2.4: Divisor de tensión(b).

Una vez realizadas estas consideraciones se procede a calcular las diferentes resistencias:

$$R4 = \frac{V2}{I}$$

$$R1 = \frac{Vt - V1}{I}$$

$$R2 + R3 = \frac{V1 - V2}{I}$$

$$R4 = \frac{2V}{0,001A}$$

$$R1 = \frac{15V-13V}{0,001A}$$

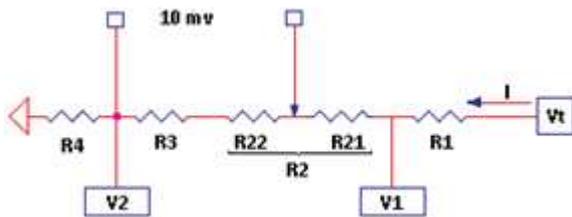
$$R2+R3 = \frac{13V-2V}{0,001A}$$

$$R4 = 2 K$$

$$R1 = 2 K$$

$$R2 + R3 = 11K$$

Para el cálculo definitivo de los 10 mV se procede a dividir la resistencia R2 en dos resistencias y se fija un valor de R3.



$$R3 = 5 \Omega$$

$$R2 = R21 + R22 = 10.995 K\Omega$$

Figura 2.4: Divisor de tensión(c).

$$10mV = \frac{(R2_2 + R3) * Vt}{R1 + R2 + R3 + R4}$$

Despejando queda:

$$(R2_2 + R3) * Vt = (R1 + R2 + R3 + R4) * 10mV$$

$$R2_2 = 5 \Omega$$

Una vez calculado el valor de R2₂ se obtiene el valor de R2₁, ya que:

$$R2 = R2_1 + R2_2$$

$$R2_1 = R2 - R2_2$$

$$R2_1 = 10,99 K\Omega$$

Para la medición, los valores de resistencias utilizados fueron los siguientes:

$$R1 = 2K$$

$$R2 = 11K \text{ (resistencia de ajuste fino)}$$

$$R3 = 5\Omega$$

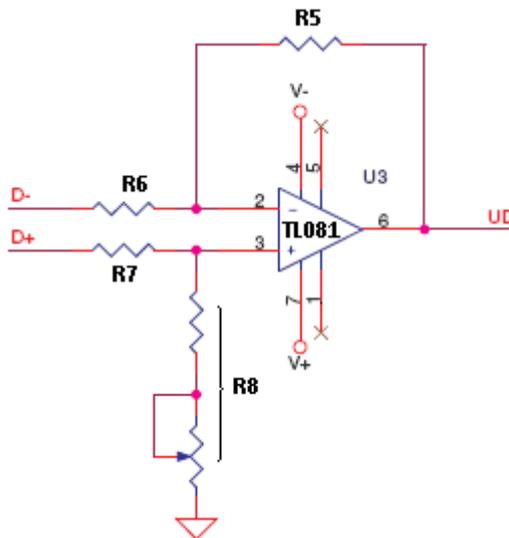
R4=2K

Para lograr los 10mV se tuvo que ajustar el potenciómetro R2 y los valores de resistencia obtenidos fueron:

R2₁= 10,74K

R2₂=200Ω

2.1.9 Diseñar el amplificador diferencial para obtener ganancia 10.



R8 está conformada por dos resistencias, una fija y la otra variable, facilitando el ajuste de offset ya que en la realidad no existen valores exactos de resistencias. Para las fórmulas se va a trabajar como una sola resistencia porque se hace mucho más fácil de calcular.

Figura 2.5: Amplificador diferencial.

Fórmula de la ganancia del amplificador diferencial (Ecuación 2.14)

$$U_0 = \frac{R_5}{R_6} (E_d) = \frac{R_5}{R_6} (E_2 - E_1)$$

Considerando que $R_6=R_7$ y $R_5=R_8$

Para el circuito resulta

$$\frac{R_5}{R_6} = 10 \quad \text{Si } R_5 = 100 \text{ K}\Omega \text{ resulta } R_6 = 10 \text{ K}\Omega$$

3. La tensión de salida con las dos entradas conectadas a tierra es igual a 0.135 mV, el Multisim no permite el ajuste de offset.

4. Conectar las dos entradas a una misma tensión en el divisor y medir la tensión a la salida. Realizar el ajuste de la ganancia a modo común véase Tabla 2.3.

Tabla 2.3:Tensión a la salida.

Voltaje de entrada	Voltaje de salida
2.012 V	-0.24 mV
12,589 V	-168 mV

Luego del ajuste los resultados se muestran en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4: Tensión a la salida después del ajuste.

Voltaje de entrada	Voltaje de salida
12,589 V	-0.08 mV

5. Conectar las dos entradas a los puntos con 10 mV de tensión diferencial, medir la tensión de salida, invertir los cables de conexión y medir nuevamente la salida. Argumentar los resultados obtenidos véase **Tabla 2.5**.

Primeramente se ajusta el divisor para obtener una salida de 10 mV de diferencia.

Resultando 2.007 V y 2.017 V

Tabla2.5: Salida de tensión al intercambiar los conductores.

Entrada	Variante 1	Variante 2
10mV	107.03 mV	-106.79 mV

Como se puede evidenciar al intercambiar los conductores se invierte el signo y hubo una variación en la tensión de salida debido al efecto que tiene la resistencia de entrada sobre el divisor.

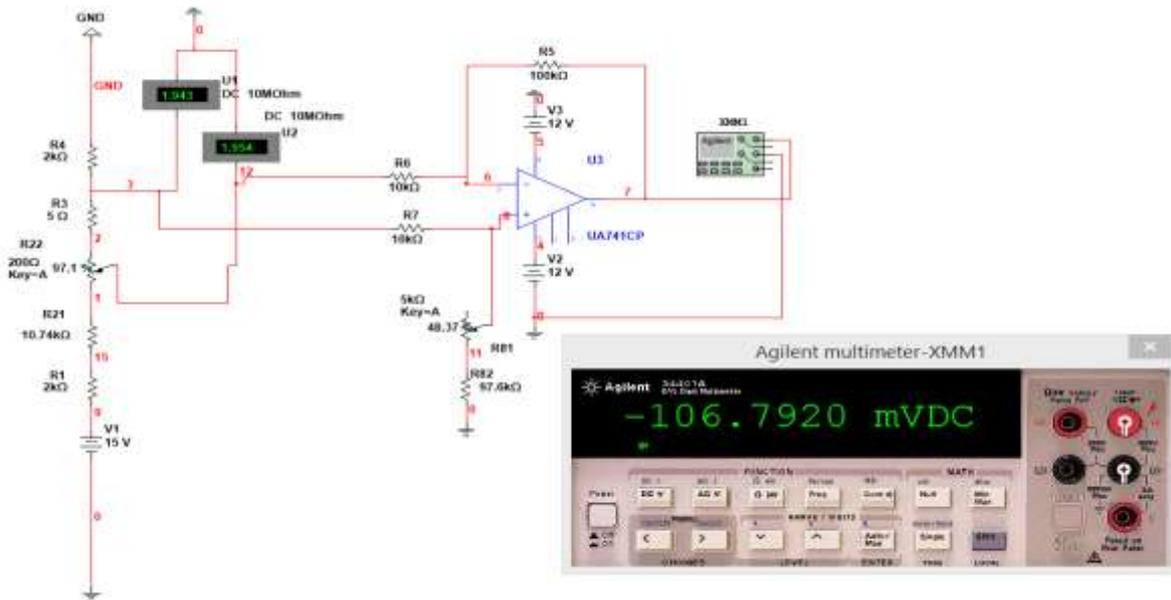


Figura 2.6: Esquema de conexión del Amplificador diferencial al divisor.

6. Preparar el amplificador INA110 para obtener ganancia 1.
 Para obtener ganancia 1, se debe dejar el pin 3 suelto y se conecta el amplificador a los pines 1 y 2 .
7. Con las dos entradas conectadas a tierra la tensión de salida es igual a 0.03465 mV.
8. Conectar las dos entradas del INA110 a una misma tensión en el divisor, determinar teóricamente en correspondencia con los datos del fabricante el valor de tensión a la salida. Medir la tensión a la salida véase Tabla2.6.

Tabla 2.6 Resultado para la conexión de una misma tensión.

Voltaje de entrada (V)	2.017	12.99
Voltaje de salida (V)	0.00000843	0.00019669

Como se puede observar al realizar la medición del voltaje de salida con los dos pines conectados a una misma tensión en el divisor se coincidió con el resultado del fabricante.

9. Preparar el amplificador INA110 para obtener ganancia 10. Conectar las dos entradas del INA110 a los puntos con 10 mV de tensión diferencial, medir la tensión de salida,

invertir los cables de conexión y medir nuevamente la salida. Argumentar los resultados obtenidos.

Para obtener ganancia 10 fue necesario conectar el pin 3 con el pin 13 (ver tabla para la selección de la ganancia epígrafe 1.8.6, Tabla 1.2).

Tabla: 2.7 Que muestra la tensión a la salida con una ganancia 10.

Voltaje de entrada (V)	0,01	0,055	0,137	0.201
Voltaje de salida (V)	0,1083	0.552	1.305	2.018

Para la tensión de 0.201 mV se invierten las entradas y el resultado es -2.018V.

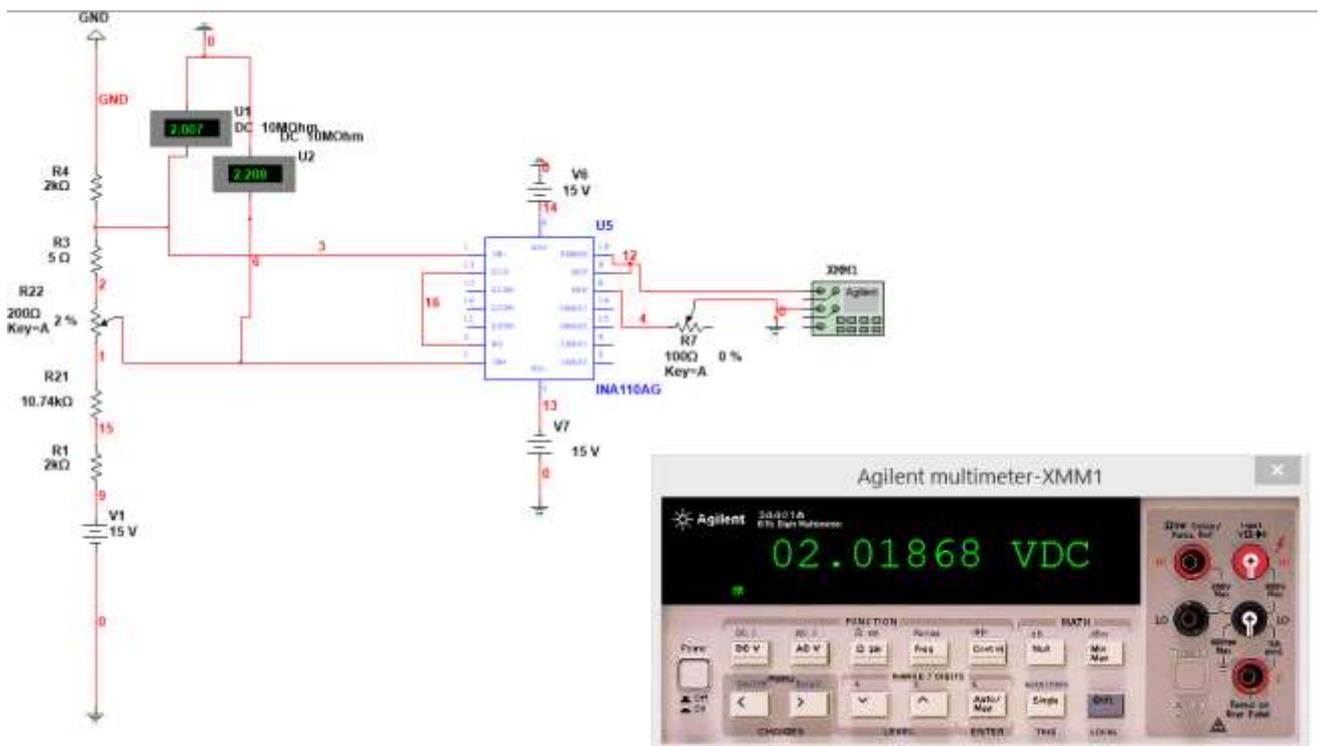


Figura 2.7: Esquema de conexión del Amplificador de instrumentación al divisor.

10. Conectar las dos entradas del INA110 a una misma tensión en el divisor, medir la tensión a la salida y comprobar el rechazo al modo común. Conectar una caja de resistencia variable entre el Terminal 6 y tierra, variar la resistencia en 10Ω analizar los resultados.

Con las entradas conectadas a una tensión de 10 mV y ganancia 10 los resultados de variar la resistencia entre el pin 6 y tierra fueron los de la siguiente Tabla.

Tabla: 2.8 Resultados de variar la resistencia entre el pin 6 y tierra.

Valor de Resistencia (Ω)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Voltaje de salida (mV)	100.84	101.10	101.89	102.41	102.93	103,45	103,97	104.49	105.01	105.53

Este resultado evidencia que a medida que se altera la red de resistencias en el interior del C.I. INA110 se degrada el rechazo a modo común, por lo que a medida que aumenta el valor de resistencia aumenta el valor del voltaje a la salida.

12. Con las dos entradas conectadas a tierra medir la tensión de salida, para cada una de las diferentes ganancias posibles. Analizar los resultados. Para el INA110.

Tabla: 2.9 Resultado de la medición de la tensión de salida, para cada una de las diferentes ganancias posibles.

Valor de la ganancia.	10	100	200	500
Valor de las tensiones de salida (mV)	- 0.1859	-1.6974	-3.3766	-8.4104

Los resultados demuestran que a medida que aumenta la ganancia aumenta el valor de la tensión de salida.

Después de haber analizado las características de ambos amplificadores se puede concluir que el amplificador diferencial posee varias limitaciones como por ejemplo debe modificarse dos componentes para variar la ganancia diferencial. Es difícil de conseguir factores de rechazo de modo común (CMRR) altos. Mientras con el amplificador de instrumentación posee bajo offset de DC, muy alta relación de rechazo de modo común, muy alta impedancia de entrada por lo que se utiliza en aplicaciones en las que se requiera de gran precisión y estabilidad.

Laboratorio #2 “Convertidor de temperatura en tensión.”

2.2 Estudio de un convertidor de Temperatura en Tensión con termorresistencia.

La temperatura es una de las magnitudes más medidas en aplicaciones científicas, industriales, docentes y del hogar; los detectores de temperatura resistivos (RTD) a diferencia de los de semiconductores tienen valores de resistencia relativamente bajos, por lo que en su utilización hay que tener en cuenta la influencia que pueden tener los conductores de unión del detector en el circuito acondicionador.

2.2.1 Objetivos.

- Familiarizarse con un esquema para la conversión temperatura/tensión.
- Conocer las ventajas e inconvenientes que presenta esta forma de acondicionamiento de la señal en un sistema de medida.
- Comprobar adecuadamente la importancia de los ajustes de offset y sensibilidad.
- Comprobar experimentalmente la linealidad entre la temperatura y la tensión de salida.

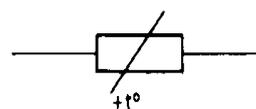
2.2.2 Fundamentos teóricos.

2.2.3 Detectores de temperatura resistivos (RTD)

En este tipo de sensores la resistencia eléctrica que ofrecen cambia con la temperatura. Sus siglas identificativas son RTD (Resistance Temperature Detectors) y su símbolo electrónico es el que recoge la figura 7.4.



(a)



(b)

Figura. 2.8. Sensor de temperatura resistivo.

a) Símbolo electrónico de un sensor de temperatura resistivo (RTD).

b) RTD comerciales

La línea oblicua indica que se trata de un sensor lineal con la temperatura y el signo positivo que presenta un coeficiente positivo con la temperatura. El fundamento de los detectores de temperatura resistivos está en el cambio de la velocidad media de tipo térmico de los electrones que forman parte del material del sensor RTD. Al aumentar la temperatura los átomos adquieren más vibración térmica alrededor de sus posiciones de equilibrio, ello interfiere el movimiento caótico de los electrones de forma que su velocidad media térmica disminuye. Por lo tanto aumenta su resistencia eléctrica con la temperatura con lo que el coeficiente térmico será positivo. Desde un punto de vista formal la resistencia de un sensor RTD puede expresarse mediante la expresión

$$R = R_o \cdot (1 + \alpha_1 \cdot T + \alpha_2 \cdot T^2 + \dots + \alpha_{n1} \cdot T^n) \quad (2.34)$$

siendo R_o la resistencia del sensor a una temperatura de referencia T_o y T el incremento de temperatura respecto a T_o . Para el hilo de platino, $\alpha_1 \approx 3,90 \cdot 10^{-3}/K$ y $\alpha_2 = (-)5,83 \cdot 10^{-7}/K^2$ y para el platino en película fina, $\alpha_1 \approx 3,912 \cdot 10^{-3}/K$, $\alpha_2 = -6,179 \cdot 10^{-7}/K^2$ y $\alpha_3 = 1,92 \cdot 10^{-7}/K^3$.

2.2.4 Análisis de algunos metales utilizados en la fabricación de termómetros.

Platino: es el metal más conveniente para termómetros de resistencia y se usa mucho. Frecuentemente los termómetros de platino tienen una resistencia R_o igual a 100Ω y se fabrican de un hilo (alambre) con diámetro de $0,05\text{mm}$ aproximadamente.

En este caso para obtener la resistencia de 100Ω se necesitan 2m de hilo, la resistividad del platino a 32°F es $9,83\mu\Omega/\text{cm}$.

Su punto de fusión es de 3224°F , el límite de medición es 1200°F .

Cobre: tiene una desventaja: a temperaturas altas se cubre con óxido y por tanto se puede usar solamente para temperaturas bajas (no mayor de 250°F). Muchas veces se construyen resistencias de cobre para compensar las influencias de la temperatura variable en distintos circuitos eléctricos. Su resistividad es 32°F a $1,56\mu\Omega/\text{cm}$ y su punto de fusión 1981°F .

2.2.5 Limitaciones

En primer lugar, se ha de considerar la temperatura impuesta por la fusión del material que constituya el sensor RTD. No se podrán medir temperaturas iguales o superiores a la de fusión del sensor. En segundo lugar, habrá que eliminar la existencia de posibles deformaciones del sensor debido a la posibilidad de cambiar su valor de resistencia por efecto piezorresistivo y no termorresistivo dando lugar, por tanto, a un error en las lecturas. Finalmente, la conveniencia de encontrar un intervalo de temperaturas en el que el sensor sea perfectamente lineal hace que el rango de temperaturas útil sea muy estrecho.

2.2.6 Ventajas

La primera de ellas es su elevada sensibilidad unas diez veces mayor que la de los termopares. En el caso del platino se consigue una alta repetitividad y exactitud mientras que para el cobre y níquel su precio es muy reducido. Por todo ello, en el intervalo de temperaturas en los que se pueden considerar lineales la fórmula anterior se puede aproximar por la expresión:

$$R = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot T) \quad (2.35)$$

La figura 7.6 permite comparar la linealidad de varios sensores RTD (níquel y platino) con la temperatura. Se observa un comportamiento lineal más amplio para el caso del platino.

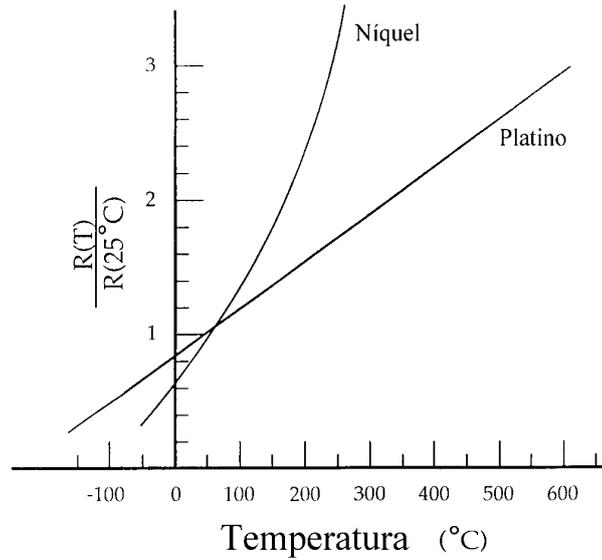


Figura. 2.9.- Resistencia DC de varios metales en función de la temperatura.

En la Tabla 2.10 se recogen algunas de las características eléctricas más comunes de este tipo de sensores.

Tabla 2.10 Especificaciones de algunos RTD.

Parámetros	Platino	Cobre	Níquel
Resistividad a 20 °C, $\mu\Omega\cdot\text{cm}$	10,6	1,673	68,44
α , $\Omega/\Omega/K$	0.00385	0.0043	0.00681
R0, Ω a 0 °C	25,50,100,200,500	10 (20 °C)	50,100,120
Margen	-200 a + 850 °C	-200 a + 260 °C	-200 a +320 °C

Son diversos los encapsulados y formatos de presentación de los sensores RTD. En la figura 7.8 se recogen diferentes opciones de presentación según el entorno en el que se vaya a aplicar el sensor. Así podemos encontrarnos por ejemplo, una disposición plana en forma de película de resistencia dispuesta sobre un soporte cerámico.

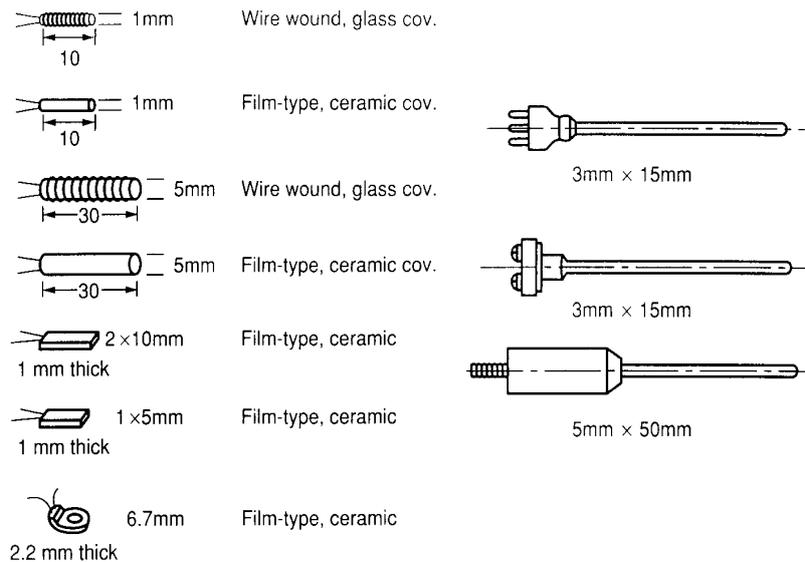


Figura .2.10.- Aspecto físico de algunos sensores RTD.

Este formato se utiliza en la medida de temperatura en superficies. En otras ocasiones la resistencia está bobinada alrededor de un núcleo cerámico o de vidrio, todo ello protegido por una carcasa. Este formato se emplea en la medida de líquidos.

2.2.7 Aplicaciones

La aplicación fundamental es la medida de temperatura. El sensor RTD de platino ha de considerarse como un sensor estable, de tal manera que se utiliza como patrón en el intervalo de temperaturas comprendido entre 182,96°C y 630,74 °C. Como metal noble que es, el platino no es propenso a la contaminación. No obstante, su precio es relativamente elevado y en algunas aplicaciones se sustituye por otros sensores más económicos tales como el níquel y el cobre, con la consiguiente pérdida de linealidad. A temperaturas muy elevadas se utiliza el wolframio.

Sus aplicaciones son múltiples. En automoción, en la industria, en electrodomésticos, en el control del consumo de agua caliente en edificios, la emisión de gases en las fábricas, etc. El sensor RTD más popular es el de platino llamado Pt100 que se caracteriza por tener 100Ω a 0°C y un coeficiente de temperatura de 0,39%/°C.

2.2.8 Actividades y procedimientos experimentales.

Partimos del esquema del amplificador no inversor mostrado en la figura 2.10.

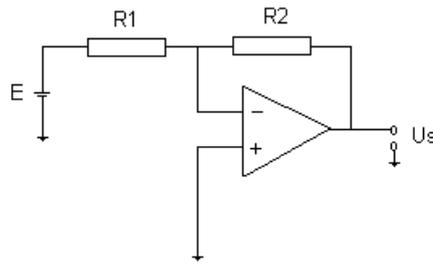


Figura 2.11. Amplificador Inversor.

La tensión de salida es,

$$U_s = -\frac{R_2}{R_1} E \quad (2.36)$$

Si consideramos a R_2 como el detector de temperatura resistivo se obtiene un convertidor temperatura/tensión y podemos realizar las siguientes consideraciones:

- De conectarlo por el esquema de dos hilos $R_2 = R_t(t) + 2r$ (2.37) donde r es la resistencia de los conductores de unión, aquí se repiten los problemas analizados anteriormente.
- Por el esquema de tres hilos como se analiza en [3], se elimina la influencia del conductor en serie con la resistencia de entrada del amplificador operacional, pero se mantiene la ecuación (2) y ahora

$$R_1' = R_1 + r \quad (2.38)$$

pero tenemos la ventaja que en dependencia del valor de R_1 podemos lograr $R_1 \gg r$ y hay mejoría con respecto al esquema de dos hilos.

Analizando la ecuación (1) podemos plantear que

$$U_s = R_t(t) I_0 \quad (2.39)$$

$$\text{donde } I_0 = -\frac{E}{R_1} \quad (2.40)$$

Si se sustituye E y R_1 por una fuente de corriente de valor I_0 , la resistencia del conductor en serie con ella no tendría ninguna influencia en la tensión de salida, de esta forma solo resulta la influencia de un conductor.

Al conectar por el esquema de 4 hilos se obtiene el circuito mostrado en la figura 2 y su correspondiente diagrama de flujo de señales para obtener la ecuación de salida

teniendo en cuenta la influencia de todos los conductores para obtener la ecuación de salida teniendo en cuenta la influencia de todos los conductores.

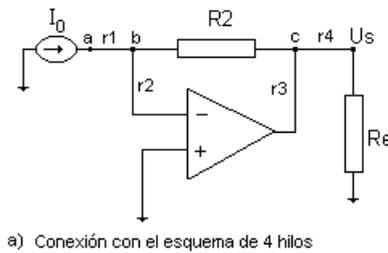


Figura 2.12. Conexión del RTD por el esquema de 4 hilos.

$$U_s = -I_0 R_t(t) \frac{R_e}{R_e + r_4} \tag{2.41}$$

Lo que demuestra que si logramos $R_e \gg r_4$

$$U_s = -I_0 R_t(t) \tag{2.42}$$

Colocando una segunda etapa con un amplificador de alta resistencia de entrada se garantiza esta condición.

En los acondicionadores de señales para termómetros de resistencia se busca que la salida para la temperatura de referencia sea igual a cero cuando se utiliza doble fuente o igual a la referencia central para el caso de simple fuente, lo que recomienda la utilización de un amplificador de instrumentación en la segunda etapa garantizando de esta forma eliminar la influencia de r_4 y permitir el ajuste del circuito para la temperatura de referencia.

El esquema en bloque del circuito que se propone se muestra en la figura 3.

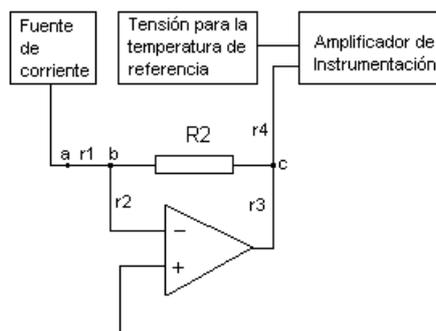


Figura 2.13. Esquema en bloque del acondicionador de señales.

2.2.9 Fuente de corriente.

Como fuente de corriente se utiliza el circuito mostrado en la figura 4, donde cumpliendo con la condición

$$R_2 R_3 = R_4 R_1 \tag{2.43}$$

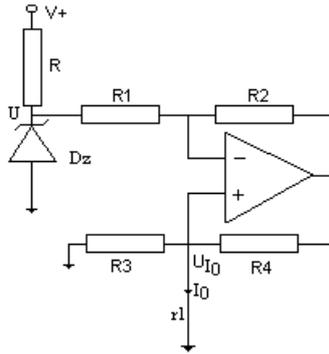


Figura 2.14. Fuente de Corriente.

La tensión en U_{I0}

$$U_{I0} = -\frac{R_2 r_1}{R_4 R_1} U \tag{2.44}$$

Con $R_2=R_4$ la corriente lo queda determinada por

$$I_0 = \frac{U_{I0}}{r1} = -\frac{U}{R_1} \tag{2.45}$$

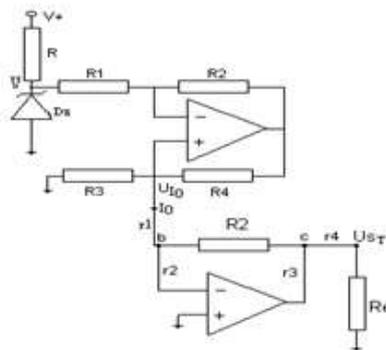


Figura 2.15 Convertidor temperatura tensión.

Y la tensión de salida se determina según

$$U_{ST} = I_0 R_t(t) \quad (2.46)$$

Tensión para la temperatura de referencia.

El bloque consiste en un divisor de tensión con coeficiente variable lo que permite ajustar la tensión de salida del divisor hasta lograr el valor deseado.

2.2.10 Amplificador de instrumentación.

Está formado por dos etapas como se muestra en la figura 6, en la primera utilizamos un amplificador de instrumentación integrado, el cual permite obtener el coeficiente de amplificación conectándole una resistencia externa, la segunda etapa consistente de un amplificador no inversor.

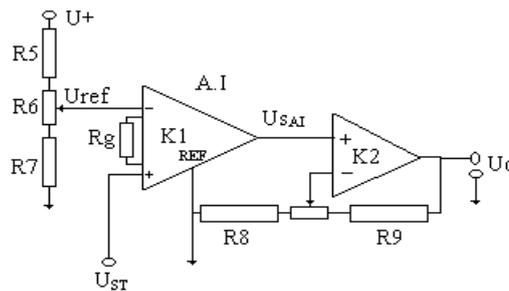


Figura2. 16 amplificador de instrumentación.

Aquí se cumple que

$$U_{SAI} = (U_{ST} - U_{ref}) G_1 \quad (2.47)$$

La tensión de salida Uo

$$U_0 = U_{SAI} \left(1 + \frac{R_9}{R_8} \right) \quad (2.48)$$

Al sustituir ((2.47) en ((2.48)

$$U_0 = (U_{ST} - U_{ref}) G_1 \left(1 + \frac{R_9}{R_8} \right) \quad (2.49)$$

La ecuación (2.49) muestra claramente los pasos en el ajuste del circuito, para lo cual es necesario conectar en serie con R9 una resistencia variable.

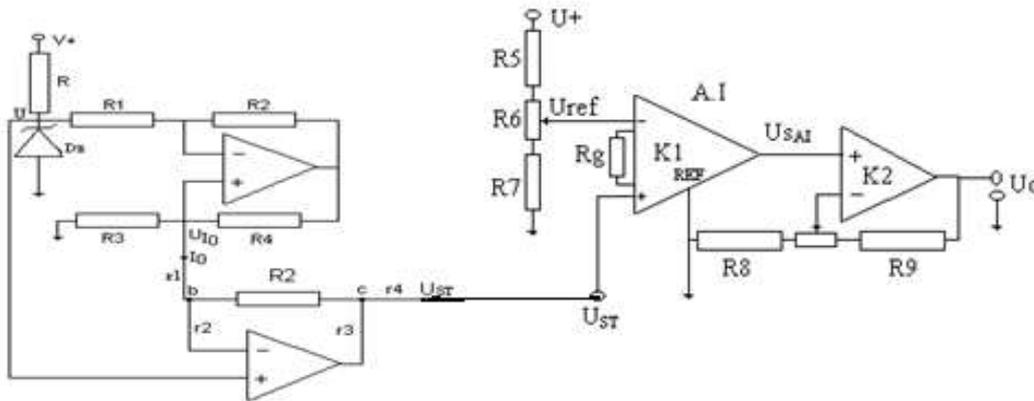


Figura 2.17. Convertidor de temperatura en tensión con termorresistencia.

Actividades y procedimiento experimental.

2.2.11 Tarea N° 1. Comprobación del efecto de los conductores de unión.

Para nuestro trabajo utilizaremos un termómetro de cobre que tiene la característica de la ecuación 9.

$$R_T(t) = R_0(1 + \alpha \cdot \Delta t)$$

con $R_0 = 100 \Omega$, $\alpha = 4.26 \cdot 10^{-3} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$ y Δt la variación de temperatura con respecto a t_0

Para simular el termómetro utilizaremos el siguiente esquema.

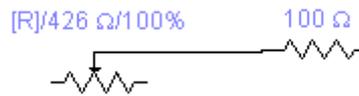


Figura 2.18 Esquema de termómetro de resistencia.

con la resistencia variable en set= 0 e incrementos de 1% se logra un $\Delta R = 4.26 \Omega$ lo que corresponde a un

$\Delta t = 10 \text{ } ^{\circ}\text{C}$.

Tabla

2.11

T (°C)	R (Ω)
0	100.00
10	104.26
20	108.52
40	117.04
70	129.82
80	134.08
90	138.34
100	142.60

Características temperatura/tensión de un RTD de Cobre.

Variar la resistencia r en 10Ω y obtener la característica temperatura / tensión variando la resistencia DR. **Construir una tabla en Excel con los datos, calcular el error relativo.**

Tabla 2.13 Característica temperatura / tensión variando la resistencia DR.

T (°C)	(V)	(V)	ΔU (V)	Error relativo (%)
0	0,100	0,099	0,001	0,23
10	0,104	0,103	0,001	0,23
20	0,109	0,108	0,001	0,23
30	0,113	0,112	0,001	0,23
40	0,117	0,116	0,001	0,23
50	0,121	0,12	0,001	0,23
60	0,126	0,125	0,001	0,23
70	0,130	0,129	0,001	0,23
80	0,134	0,133	0,001	0,23
90	0,139	0,137	0,002	0,46
100	0,143	0,141	0,002	0,46

Variar la resistencia r_1 en 50Ω y obtener la característica temperatura / tensión variando la resistencia DR. **Construir una tabla en Excel con los datos, calcular el error relativo.**

Tabla 2.14 Característica temperatura / tensión variando la resistencia DR para una variación del resistor r_1 en 50Ω .

T (°C)	(V)	(V)	ΔU (V)	Error relativo (%)
0	0,100	0,100	0,000	0,00
10	0,104	0,104	0,000	0,00
20	0,109	0,109	0,000	0,00
30	0,113	0,113	0,000	0,00
40	0,117	0,117	0,000	0,00
50	0,121	0,121	0,000	0,00
60	0,126	0,126	0,000	0,00
70	0,130	0,130	0,000	0,00
80	0,134	0,134	0,000	0,00
90	0,139	0,139	0,000	0,00

100	0,143	0,143	0,000	0,00
-----	-------	-------	-------	------

Variar la resistencia r_3 en 10Ω y obtener la característica temperatura / tensión variando la resistencia DR. **Construir una tabla en Excel con los datos, calcular el error relativo.**

Tabla 2.15 Característica temperatura / tensión variando la resistencia DR.

T (°C)	(V)	(V)	ΔU (V)	Error relativo (%)
0	0,100	0,110	-0,010	2,3
10	0,104	0,114	-0,010	2,3
20	0,109	0,119	-0,010	2,3
30	0,113	0,123	-0,010	2,3
40	0,117	0,127	-0,010	2,3
50	0,121	0,132	-0,011	2,5
60	0,126	0,136	-0,010	2,3
70	0,130	0,140	-0,010	2,3
80	0,134	0,144	-0,010	2,3
90	0,139	0,149	-0,010	2,3
100	0,143	0,153	-0,010	2,3

2.2.12 Tarea N° 2. Diseño de la fuente de corriente

La figura muestra el esquema de una fuente de corriente, para limitar el efecto del autocalentamiento de la termorresistencia la corriente suministrada por la fuente no debe ser mayor de 4mA.

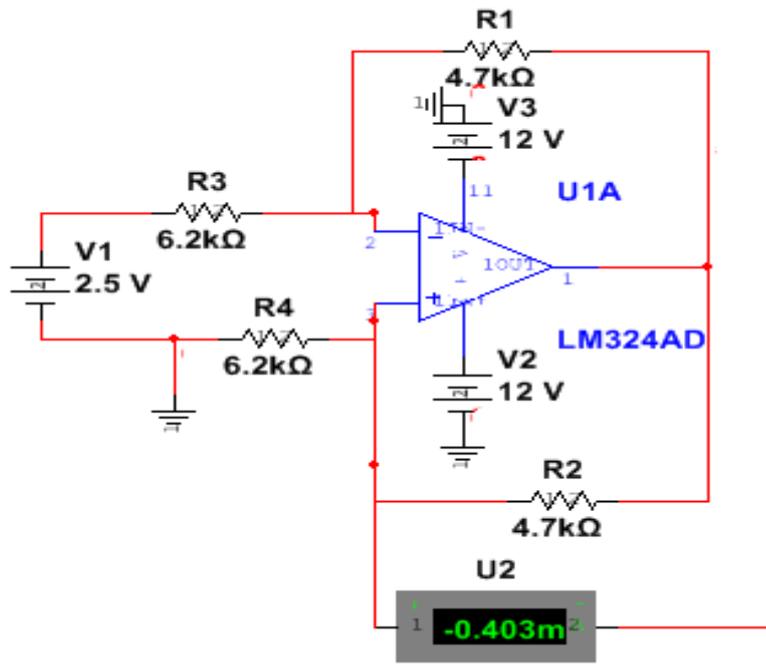


Figura 2.19 Esquema de la fuente de corriente.

Para el cálculo de la corriente se deben utilizar las ecuaciones (8),(9) y(10).Se procede a calcular el valor de la resistencia fijando el valor de la corriente en:

$$I = 0.4mA \quad U_s = 2.5V \quad R_1 = -\frac{U_s}{I_0} \quad R_1 = 6.2K\Omega$$

se fija $R_2 = 4.7K\Omega$ y se considera $R_2 = R_4$. De esta forma se cumple con la condición

$$R_1 R_4 = R_2 R_3 \quad R_3 = 6.2 K\Omega$$

Luego del ajuste de la fuente de corriente conectar el circuito como se muestra en la figura.

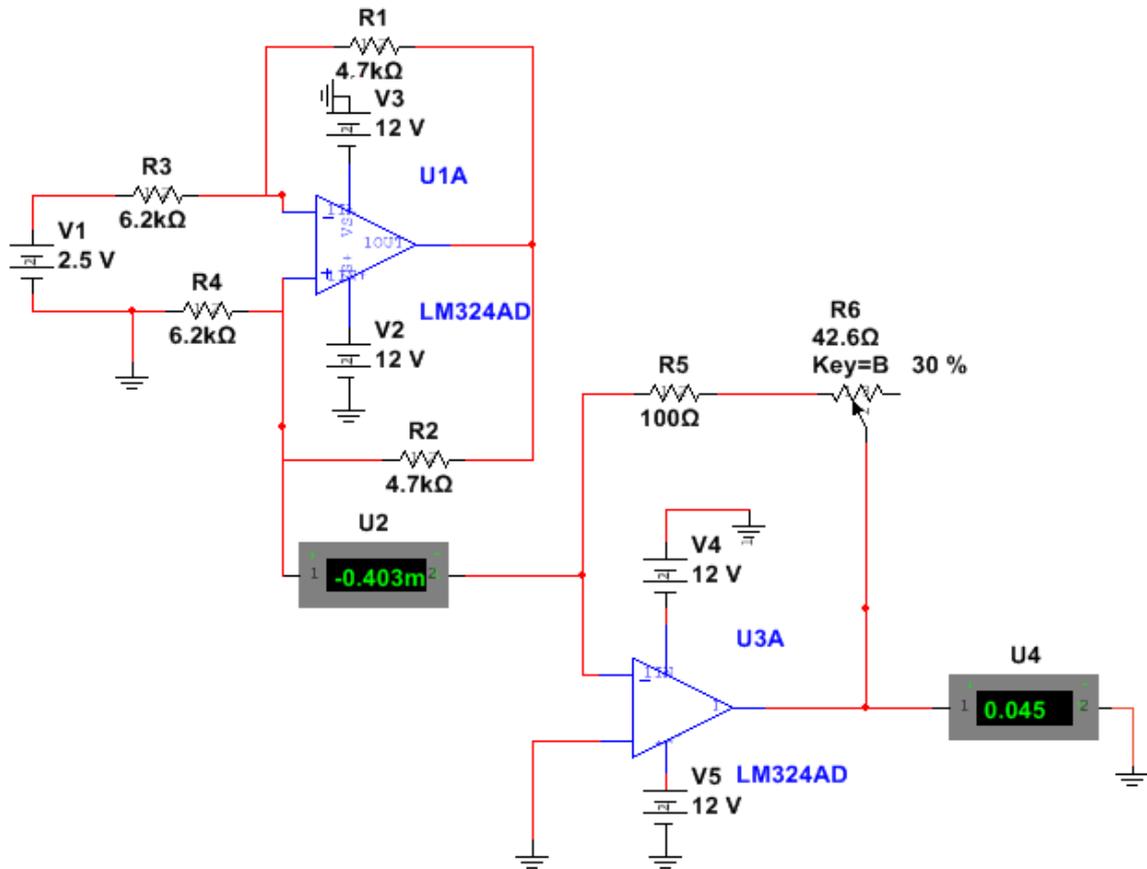


Figura 2.20 Esquema de conexión de la fuente con el termómetro.

Después de conocer los valores de los componentes del circuito se procede a determinar los valores de tensión mínimo y máximo para el campo de variación de temperatura que es de 0 °C a 100 °C

$$U_t = R_t \cdot I_o$$

$$U_t 0^{\circ}C = 0.4 \cdot 10^{-3} \cdot 100$$

$$U_t 0^{\circ}C = 40mv$$

$$U_t 100^{\circ}C = 0.4 \cdot 10^{-3} \cdot 142.6$$

$$U_t 100^{\circ}C = 57m$$

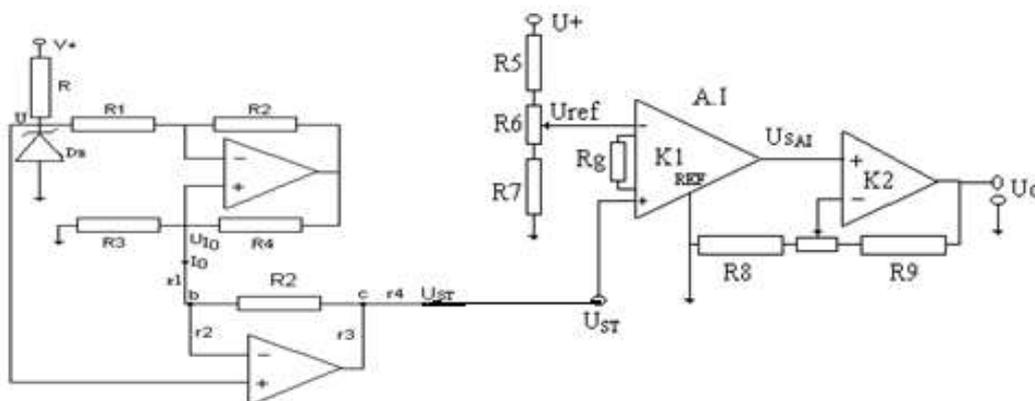
Se comprueba en la simulación la característica temperatura tensión del convertidor, con la fuente de corriente de 0.4 mA

Tabla2.16: Característica temperatura tensión.

T (°C)	Vs(mV)
0	40.000
10	41.704
20	43.408
40	46.816
70	51.928
80	53.632
90	55.336
100	57.000

2.2.13 Tarea 3. Ajuste de cero y sensibilidad.

Diseñar el esquema de la figura 2.17, para una sensibilidad de 10 mV/°C.



La tensión de salida del esquema anterior se determina según

$$U_{ST} = I_0 R_t(t)$$

$$U_{ST} = I_0 R_0 + I_0 R_0 \alpha \Delta t$$

Los resultados de las tareas anteriores confirman que la salida no parte de cero para 0 °C por lo que es necesaria una etapa para lograr el ajuste cero, para lo que se propone el amplificador diferencial mostrado en la figura.

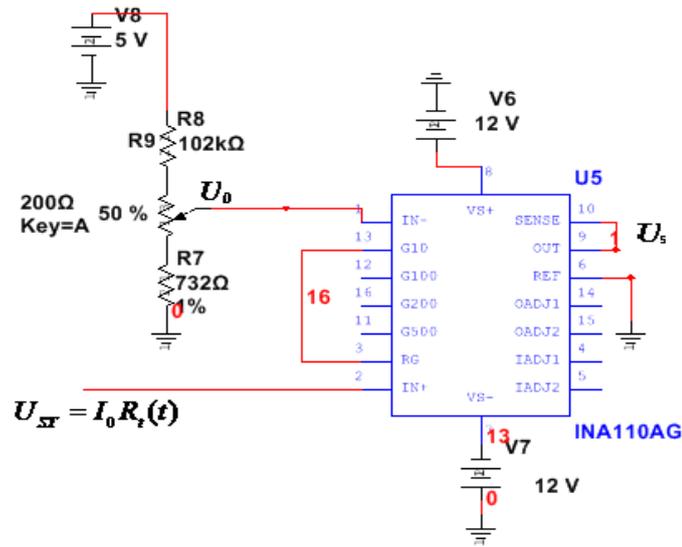


Figura 2.21

Tenemos que la U_{st} para 0 °C es 40 mV, es necesario diseñar el amplificador diferencial para lograr el ajuste de cero, por lo que es necesario cumplir con

$$U_{st} = U_0 = 40mV$$

Obtención del valor de las resistencias del divisor de voltaje para el ajuste de cero.

$$U_0 = E \frac{R_a}{R_a + R_B}$$

$$0.04 = 5 \frac{R_a}{R_a + R_B}$$

$$R_B = 101.5 \cdot R_A$$

Considerando que $R_A = 1 K\Omega$

$$R_B = 101.5 \cdot K\Omega$$

En la práctica se toma $R_A = 800\Omega$, $R_B = 102 k\Omega$ y se coloca un potenciómetro de 200Ω que permite realizar el ajuste fino del offset. La figura XX muestra el circuito del convertidor temperatura- tensión con el ajuste de cero.

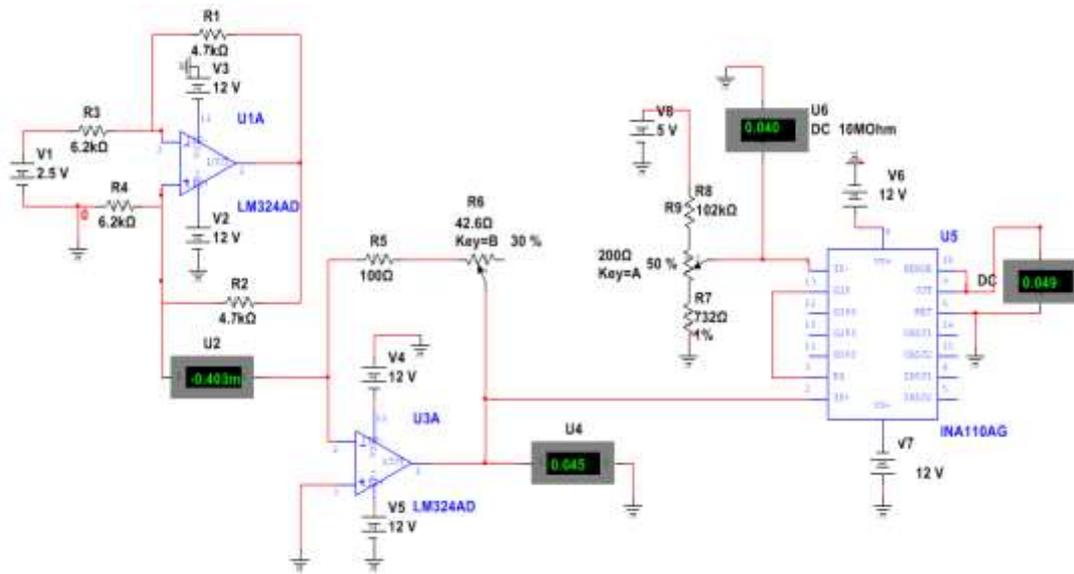


Figura. 2.22 Convertidor de temperatura tensión con el ajuste de cero.

2.2.14 Ajuste de sensibilidad.

Luego del ajuste de cero es necesario el ajuste de la sensibilidad deseada para lo que utilizaremos una etapa final en base a un amplificador inversor como se muestra en la figura.

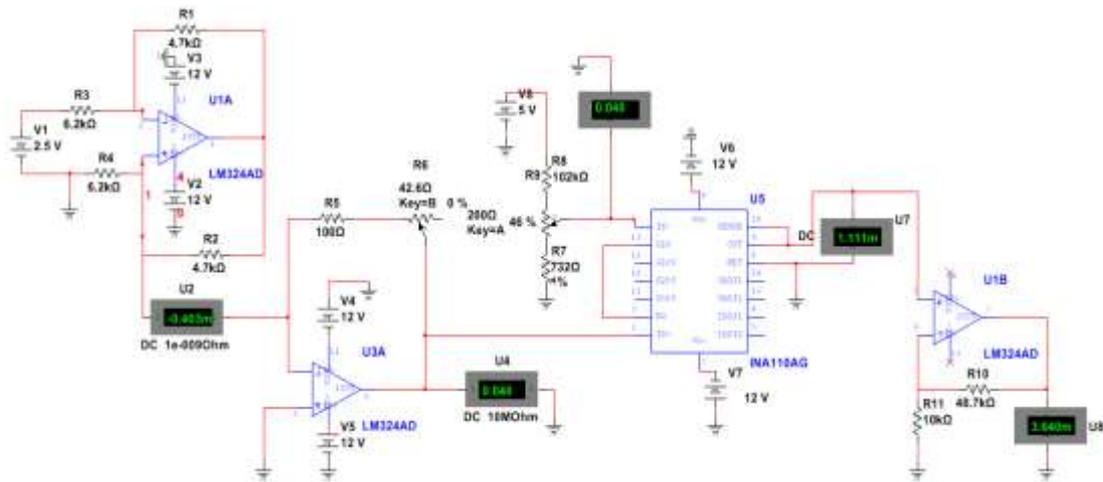


Figura 2.23 Convertidor de temperatura tensión con el ajuste de cero y el ajuste de sensibilidad.

Para el ajuste de sensibilidad:

La variación de la tensión va a estar dada por:

$$\Delta U_t = u_{100^{\circ}C} - U_{0^{\circ}C} = 17 \text{ mV}$$

La tensión de salida por

$$U_s = (U_{St} - U_{ref}) G_{AI} G_{INV}$$

Como la sensibilidad es de $S = 10 \text{ mV}/^{\circ}C$ la tensión máxima es de

$$U_{s_{\max}} = S * t_{\max} = 10 \text{ mV}/^{\circ}C * 100^{\circ}C = 1 \text{ V}$$

$$\frac{U_{ST}}{\Delta U_t} = G_{AI} \cdot G_{AIN} = \frac{1 \text{ v}}{17 \text{ mv}} = 58.82$$

$$G_{AI} \cdot G_{INV} = 58.82$$

Asumiendo que la ganancia del amplificador de instrumentación sea 10.

$$G_{INV} = \frac{58.82}{10} = 5.882$$

$$G_{INV} = 1 + \frac{R_{10}}{R_{11}} = 5.882$$

$$\left(1 + \frac{R_{10}}{R_{11}}\right) = 5.88 \quad \left(\frac{R_{10}}{R_{11}}\right) = 4.88k\Omega$$

Al tomar $R_{11} = 10k\Omega$ se obtiene $R_{10} = 48.8k\Omega$

La tabla 1.17 muestra la característica temperatura –tensión del convertidor luego de los ajustes de cero y de sensibilidad.

Tabla2.17 Característica temperatura tensión.

T (°C)	Vs(V)
0	0.000012
10	0.101
20	0.202
30	0.303
40	0.404
50	0.504
60	0.605
70	0.706
80	0.807
90	0.908
100	1.009

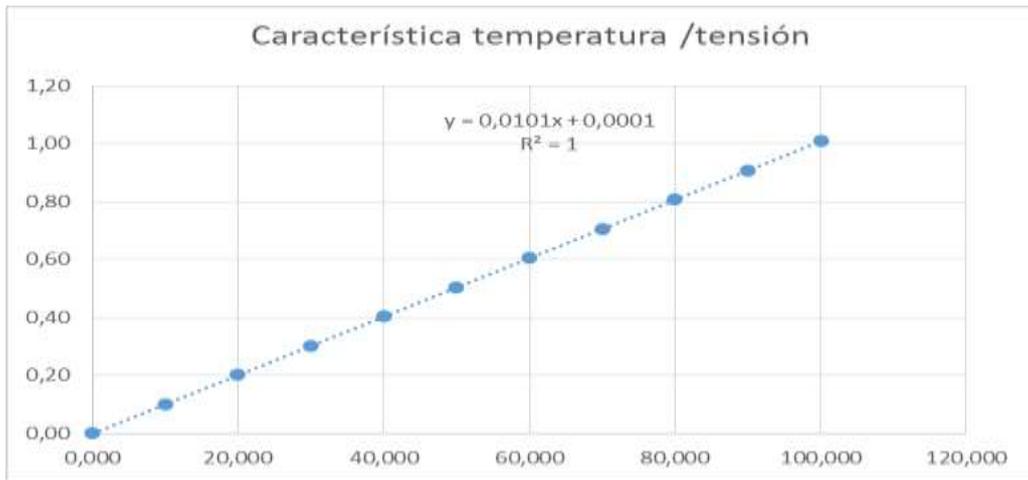


Figura 2.24. Característica del convertidor luego de los ajustes de cero y sensibilidad

3. Propuestas de las prácticas de laboratorio.

2.3.1 Laboratorio #3 “Convertidor de temperatura en tensión.”

Estudio de un convertidor D/A.

En los instrumentos electrónicos de medición la adquisición de la señal a medir, el procesamiento de los datos y la visualización de los resultados son procesos básicos a tomar en cuenta. En estos procesos intervienen dispositivos que por sus funciones específicas adquieren gran importancia. Entre estos dispositivos podemos citar los conversores D/A: Con estos circuitos se trata de conseguir una relación biunívoca entre una señal analógica y una digital o viceversa. Las magnitudes físicas son analógicas y normalmente el procesado de señal se realiza de forma digital. También puede ser necesario actuar sobre un sistema analógico una vez procesada una señal de forma digital por lo que se hace necesario un convertidor DAC.

El estudio de estos dispositivos electrónicos es un tema que se trata en las asignaturas de la Carrera de Automática.

Objetivos.

- Estudiar el principio de funcionamiento de diferentes esquemas de convertidores digitales/analógicos.
- Características y parámetros básicos a considerar de los conversores D/A.
- Analizar las causas de errores en estos convertidores.

2.3.2 Fundamento teórico.

2.3.3 El conversor D/A.

Principio de funcionamiento.

El conversor D/A es un dispositivo que convierte la información en forma de combinaciones de estados discretos (binarios) a información en forma de valor o magnitud con características de señal, en relación con alguna referencia. Es un dispositivo que tiene entradas eléctricas que representan un número binario y una salida en forma de voltaje o corriente.

Los conversores D/A son usados para presentar los resultados de la computación digital, memoria o transmisión, típicamente para pantallas gráficas o para el control de dispositivos que operan con señales analógicas. Los circuitos del conversor D/A también son usados en los diseños de los conversores analógicos digitales que emplean técnicas de realimentación como el conversor A/D de aproximaciones sucesivas.

El circuito fundamental del conversor D/A, mostrado en la Figura 2.1 incluye una referencia de voltaje o corriente, una red resistiva de precisión, unos conmutadores electrónicos y una interface. El circuito de interface adapta los niveles lógicos de entrada que necesitan los conmutadores, los cuales, a su vez, actúan sobre la red resistiva de precisión que con la ayuda de la fuente de referencia dará una salida analógica en forma de corriente o de tensión.

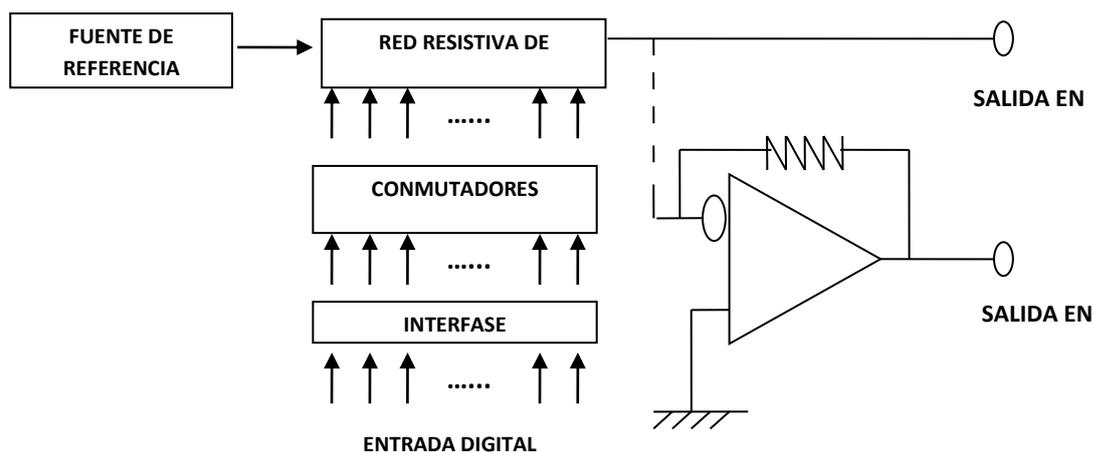


Figura 2.25 Esquema funcional del conversor D/A

La salida del conversor D/A es proporcional al producto del valor de la entrada digital y al valor de referencia. La Figura 2.2 muestra la función de transferencia de un conversor de 3 bits. En muchas aplicaciones la referencia es fija y la salida es una proporción de la

entrada digital. En otros casos, tanto la referencia como la entrada digital pueden variar, estos conversores son llamados multiplicadores y son principalmente usados para lograr un factor de escala controlado digitalmente, o coeficiente de ganancia.

Los CDA más usados son los de código en tensión (CDT), para su realización se necesita una fuente de tensión de referencia, un divisor de corriente o tensión y elementos de conmutación.

La ecuación general del comportamiento de un CDA es:

$$A = R * D \quad (2.50)$$

donde, A salida analógica, R tensión de referencia y D información codificada en las entradas del CDA.

La forma más común del código de entrada es código binario por lo que D se representa como:

$$D = \sum_{i=1}^n 2^{i-1} a_i \quad (2.51)$$

donde, n número de bits en la entrada y a_i estado del bit i en la entrada toma valores de 0 y 1.

al sustituir (2.51) en (2.50)

$$A = R \sum_{i=1}^n 2^{i-1} a_i \quad (2.52)$$

De aquí que para cada valor de D existe un solo valor de A, la que podrá tomar solamente valores discretos, debido a su relación lineal con D.

El máximo valor de A será cuando todos los bits del código de entrada están en 1, A siempre será menor que R, ya que D con un número finito de bits nunca llega a 1.

La característica transferencial de un CDA se obtiene directamente de la ecuación 2.52 como se muestra en la figura 2.26.

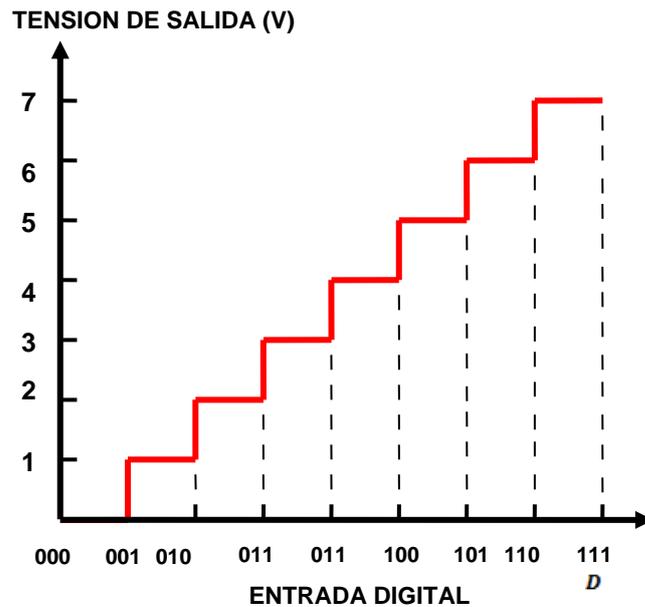


Figura 2.26 Función de transferencia para un convertor D/A de tres bits. Excepto para grandes resoluciones (más de 18 bits), los convertidores D/A disponibles comercialmente generalmente se fabrican en forma de circuitos integrados, y usan tecnología bipolar, MOS e híbrida. Un simple circuito puede incluir la red de resistencia y los interruptores, también puede incluir el circuito de referencia, el amplificador de salida, y uno o más registros habilitados con lógica de control interface directa con el microprocesador.

La diferencia fundamental entre unos convertidores y otros reside en el tipo de red resistiva utilizada y en la fuente de referencia: de tensión o de corriente. Desde el punto de vista de red empleada dos son los tipos principales de convertidores D/A: los que constan de un sumador con resistencias de entrada ponderadas al peso en binario de cada bit, y los que utilizan una red en escalera del tipo R-2R.

2.3.4 Usos fundamentales de los CDA son:

Como uno de los circuitos fundamentales, en el trabajo de los convertidores analógicos/digitales CAD.

Como elementos de enlace entre circuitos analógicos digitales en los equipos que requieren transferencia de información entre estas dos partes.

Existen diferentes técnicas para lograr la conversión digital/analógica, las cuales para su estudio se pueden clasificar de acuerdo a como reciben el código en su entrada

los convertidores en:

- **paralelo.**
- **serie.**

Conversión digital/analógica paralelo: la estructura típica de un CDA paralelo se muestra en la figura 2.24, aquí podemos destacar cuatro elementos fundamentales:

1. fuente de tensión de referencia.
2. bloque de interruptores analógicos.
3. red de resistencias.
4. etapa de conversión corriente/tensión utilizando un amplificador operacional.

Los convertidores paralelo se caracterizan por su velocidad de trabajo, estos procesan el código en su entrada todos los bit al mismo tiempo, por el contrario los convertidores serie los procesan bit a bit, lo que implica que un convertidor de n bit requiera de n períodos de reloj para brindar la tensión de salida, la ventaja que tienen es que su complejidad no es función de la longitud de la palabra y su número de bit se puede alterar sin necesidad de cambiar el circuito, el único requerimiento para su operación es sincronizar la llegada de cada bit con un período de reloj de la señal de control.

En la actualidad con el desarrollo alcanzado por la electrónica no es dificultad la implementación de los convertidores paralelos, esto unido a su velocidad hace que sea el método más empleado en la construcción de los CDA, a continuación se analizan algunas de las estructuras más utilizadas en los CDA.

2.3.5 El conversor D/A con resistencias ponderadas

La Figura 2.3 muestra el esquema de un conversor D/A de resistencias ponderadas, los interruptores analógicos S_0 a S_1 , conectan cada resistencia a la fuente de referencia o a tierra dependiendo de que el bit correspondiente en la entrada sea 1 o 0. Los bits que sean 0 no aportan corriente a la corriente total I , mientras que los que sean 1 aportan distintas corrientes dependiendo del valor de resistencia al cual esté conectado.

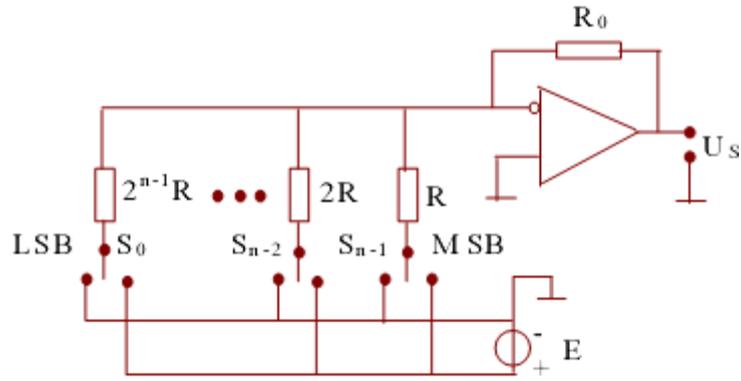


Figura 2.27 Conversor D/A de resistencias ponderadas.

Si el bit menos significativo (LSB) es 1 se tendrá por esa rama una corriente de:

$$I = \frac{E}{2^{n-1} * R} \quad (2.53)$$

Si tenemos un 1 en el bit más significativo (MSB), entonces este aporta un corriente de:

$$I = \frac{U_{ref}}{R} \quad (2.54)$$

La cual es 2^{n-1} veces mayor que la anterior.

Como resultado se obtiene que la tensión de salida sea:

$$U_s = \frac{E * R_0}{R} (S_{n-1} + S_{n-2}(\frac{1}{2}) + \dots + S_0(\frac{1}{2^{n-1}})) \quad (2.55)$$

Donde S_0, S_1, \dots, S_{n-1} , representan los bits de entrada que pueden tomar el valor 0 o 1, por lo tanto, se consigue una tensión analógica de salida que es proporcional al valor numérico de la entrada digital.

Como se pudo ver en la Figura 2.3 para implementar este conversor se necesita una serie de resistencias que cumplan exactamente la relación $R, 2R, 4R, \dots$. Este conjunto de resistencias con la precisión requerida y con las mismas características de temperatura son difíciles de conseguir, especialmente de forma integrada que es la forma de lograr productos no excesivamente caros. Por eso es que existen otras estructuras que tratan de compensar estos inconvenientes cuando aumenta el número de bits.

2.3.6 El convertor D/A con red R-2R

El inconveniente mencionado en el apartado anterior es eliminado al utilizar solo resistencias de valor R y 2R. De esta forma, conseguir el valor deseado y características de temperaturas análogas no resulta difícil. En la Figura 2.4 se muestra el esquema del convertor D/A.

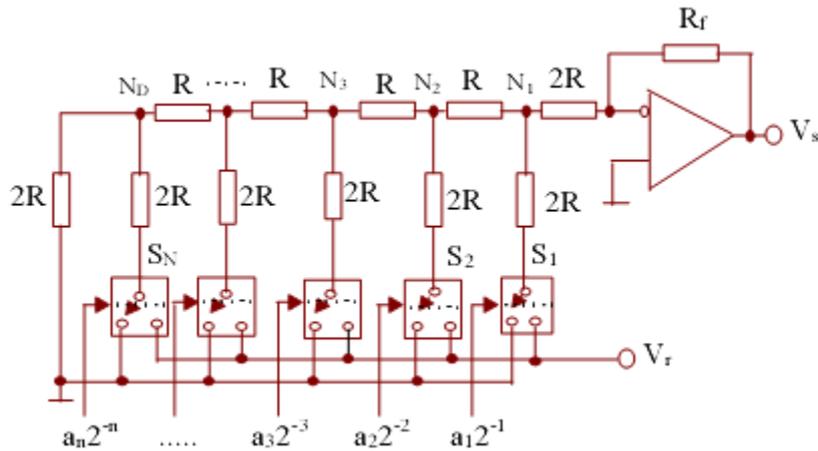


Figura 2.28 Esquema del convertor D/A de red de resistencias R-2R en escalera.

Al igual que el convertor D/A con resistencias ponderadas cada bit gobierna un interruptor analógico que se conecta a tierra o a la fuente de referencia. El principio de funcionamiento es el de ir dividiendo por 2 en cada nodo la corriente que llegue al mismo, se busca que la impedancia vista desde un nodo cualquiera hacia las tres ramas que concurren en dicho nodo sean iguales y de valor 2R, por lo que la corriente I que llega a un nodo por una de sus ramas, provoca una corriente de magnitud I/2 por las otras dos.

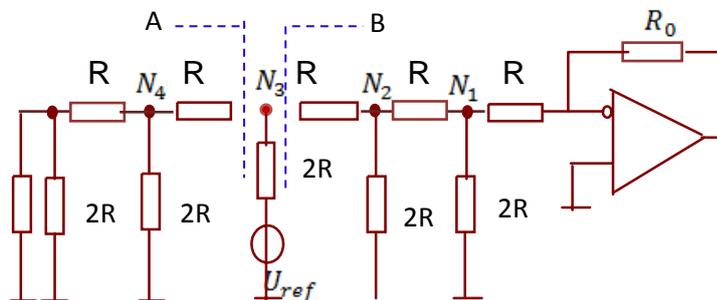


Figura. 2.29 Circuito equivalente al conectar S₃ a la fuente y el resto a tierra.

Al buscar la resistencia equivalente por el lado A desde N3 a tierra se obtiene $2R$, por el lado B resulta también $2R$, esto sucede al conectar cualquier interruptor a la fuente, resultando el circuito equivalente mostrado en la figura 2.30.

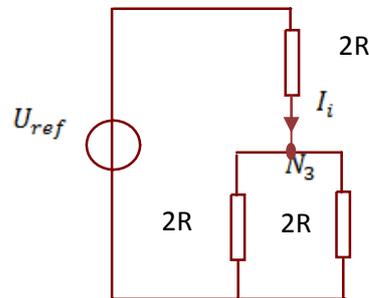


Figura. 2.30 Circuito equivalente de la resistencia vista desde el nodo 3 a tierra.

Donde la corriente que entra por S_i es $I_i = \frac{U_{ref}}{3R}$ esta corriente se divide por dos al salir del nodo i , resultando el aporte del nodo conectado a fuente como $I_{0i} = I_i \frac{1}{2^i}$ (2.56)

Para comprender mejor ilustrémonos con el circuito equivalente al conectar S_3 , mostrado en la figura 2.31.

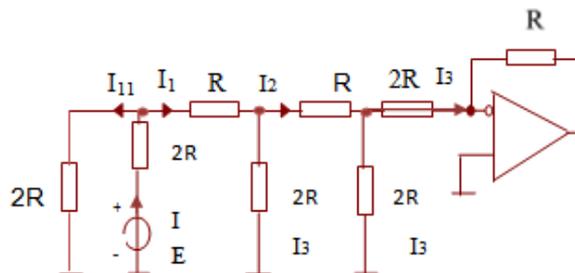


Figura. 2.31 Circuito equivalente y valores de las corrientes que circulan al cerrar S_3 .

$$I = \frac{U_{ref}}{3R} \quad I_1 = \frac{U_{ref}}{6R} \quad I_2 = \frac{U_{ref}}{12R} \quad I_3 = \frac{U_{ref}}{24R}$$

El aporte del bit 3 a la corriente total es

$$I_{0i} = \frac{E}{24R} = \frac{U_{ref}}{3R} = \frac{1}{2^3}$$

Esto concuerda con la ecuación 2.54.

Para el caso de que más de un bit estén en 1 al aplicar el principio de superposición encontramos que la corriente total I_0 es la suma de lo que aporta cada bit por separado y se calcula por la ecuación.

$$I_0 = \frac{E}{3R} \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{2^i} \quad (2.57)$$

A la salida del amplificador operacional se obtiene una tensión de

$$U_s = -I_0 * R_0 = -\frac{ER_0}{3R} \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{2^i} \quad (2.58)$$

Por lo que podemos decir que la expresión general para estos tipos de conversores es la siguiente:

$$V_s = -V_r \left(a_{n-1} \left(\frac{1}{2} \right) + a_{n-2} \left(\frac{1}{4} \right) + \dots + a_0 \left(\frac{1}{2^n} \right) \right) \quad (2.59)$$

Con este convertidor se tienen resueltos los problemas planteados en la estructura anterior. Son fáciles de obtener las resistencias, pueden utilizarse bajos valores de resistencias donde se requiera alta velocidad, su inconveniente principal es que emplea el doble de resistencias que el convertidor D/A, y los transitorios que se producen por la conmutación de fuente a tierra y viceversa lo que provoca tensiones de picos en la entrada del amplificador operacional.

En los circuitos prácticos, se prefiere conmutar corriente en lugar de tensiones, pues trae como resultado mayor rapidez y menos costo. Esto se logra intercambiado la posición de la salida de la red con la tensión de referencia, lo que se conoce como convertidor de escalera invertida, mostrado la Figura 2.32.

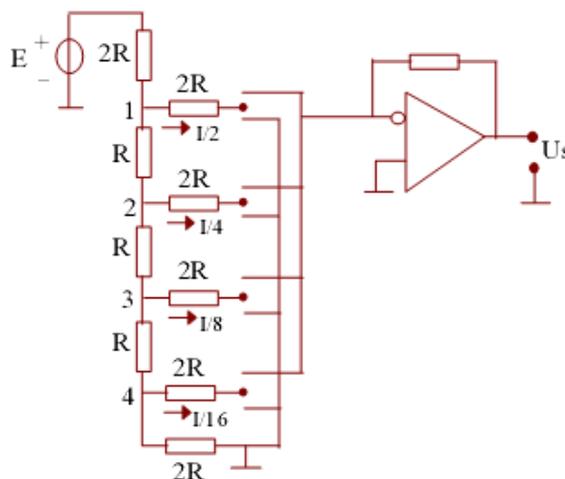


Figura 2.32 Esquema del convertidor D/A de escalera invertida.

Como los conmutadores siempre están conectados a tierra (tierra o la tierra virtual del amplificador operacional) independientemente del estado que tenga, los interruptores no están sometidos a cambios de tensión y solo deben conmutar corriente, además todas las corrientes que circulan por la red son constantes y las tensiones en los nodos también se mantienen constantes, durante las conmutaciones no hay retardo por carga o descarga de capacidades parásitas.

Al igual que en el convertidor de escalera normal la corriente que llega a la entrada de red por el nodo es

$$I_1 = \frac{E}{3R} \quad (2.60)$$

Por el nodo 2

$$I_2 = I_1 * \frac{1}{2} \quad (2.61)$$

De forma general se cumple que

$$I_i = I_1 * \frac{1}{2^{i-1}} \quad (2.61)$$

El aporte de cada corriente que llega por cada conmutador es

$$I_{0i} = I_i * \frac{1}{2} \quad (2.62)$$

Al aplicar superposición se obtiene

$$I_0 = \sum_{i=1}^n I_{0i}$$

Y resulta que

$$I_0 = \sum_{i=1}^n \frac{E}{3R} * \frac{a_i}{2^i}$$

La corriente de salida será

$$I_0 = -R_0 I_0 = -\frac{ER_0}{3R} \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{2^i} \quad (2.63)$$

Se obtienen los mismos resultados que la estructura normal con las ventajas que hemos analizado anteriormente.

2.3.7 Especificaciones de los conversores D/A.

Para la caracterización de los conversores D/A existen ciertos datos que definen el mismo, mientras que otras especificaciones permiten evaluar la no idealidad del mismo. Entre estos datos están el código digital de la señal de entrada, el tipo de salida, los niveles lógicos de las señales de entrada, la alimentación, etcétera. A continuación se resumen las más importantes.

- **Resolución:** Es el cambio incremental más pequeño de la tensión de salida. Así, un conversor de N bits resolverá una parte en 2^N. Comercialmente existen conversores D/A de 8, 10, 12... bits cuya resolución depende del valor a fondo de escala (FS). Entonces si el FS = 10V, la resolución (Re) de un conversor de 12 bits será:

$$Re = \frac{10V}{2^{12}} = 2,44mV$$

- **Error de offset:** Es el valor de la tensión de salida que hace que la función de transferencia no pase por el origen (Figura 2.6 a)). El dato a indicar será la tensión de salida cuando se aplica el código cero (00...000) a la entrada. El error de offset se mantiene constante para todos los valores de entrada y con frecuencia es compensada con un circuito de compensación. Con frecuencia se expresa en mV, en LSB o en un % del FS. El error de offset en LSB depende del tamaño del escalón en la salida, que esta a su vez depende del valor de referencia. Un valor aceptable de error de offset es con frecuencia menor que ±10mV.
- **Error de escala:** También llamado error de ganancia, es la diferencia entre las pendientes de las funciones de transferencia real e ideal sin la presencia de error de offset. Se expresa en LSB, mV o como un por ciento del FS (Figura 2.6 b)).

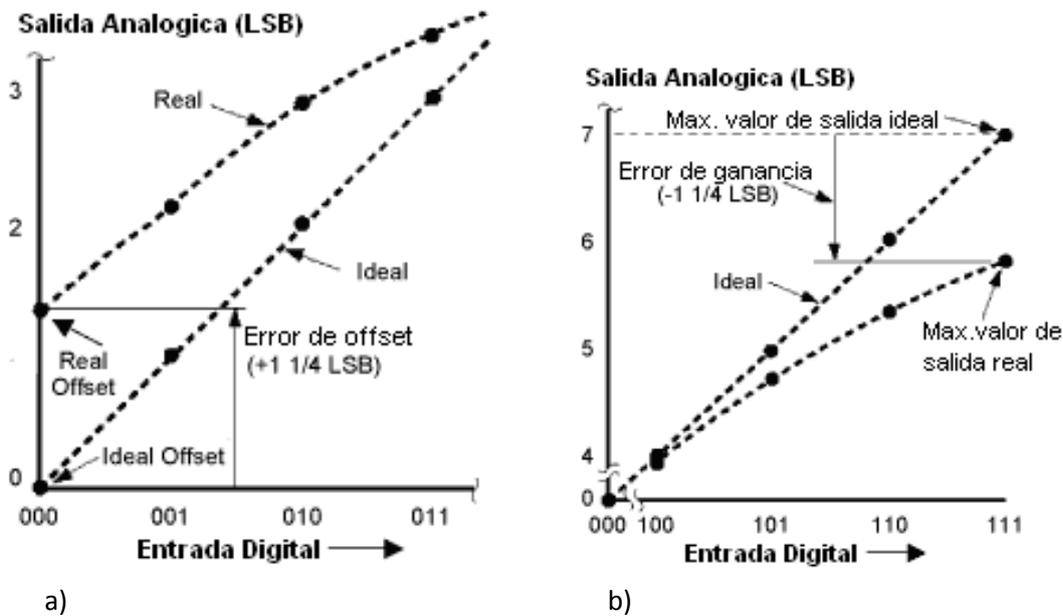
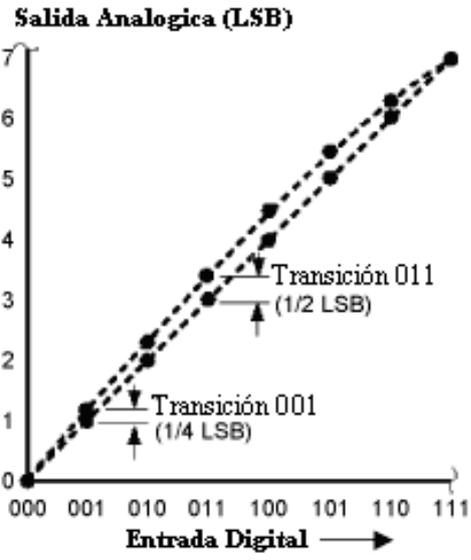
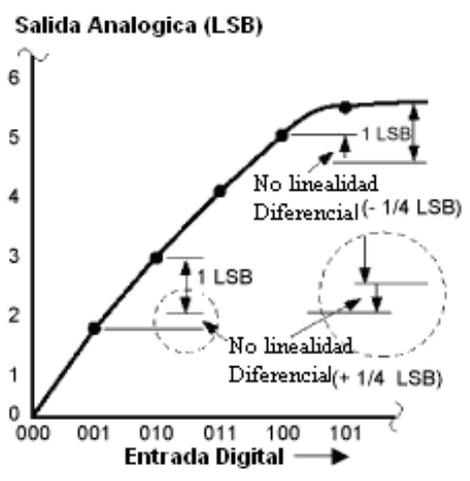


Figura 2.33a) Error de offset. b) Error de ganancia.

- **No Linealidad integral (INL):** Es la máxima desviación de la salida real respecto a la teórica que sería una línea recta. Para los conversores D/A esta desviación es medida en cada escalón (Figura 2.7 a)). Una línea recta es la mejor aproximación para la función de transferencia real o una línea trazada entre los puntos terminales de las dos funciones de transferencia (después de eliminar el error de offset).
- **No Linealidad diferencial (DNL):** Es la diferencia entre la amplitud de un escalón real y el valor ideal de 1LSB (Figura 2.7 b)). El objetivo para que el valor DNL sea menor o igual a 1LSB es asegurarse que el conversor D/A es monotonito. Esto significa que el dato no se pierde cuando la salida cambia de acuerdo con la entrada digital. Este aumenta en respuesta al incremento digital y disminuye en respuesta al decremento digital.



a)



b)

Figura 2.34 a) No linealidad integral. b) No linealidad diferencial.

2.3.8 Desarrollo de las actividades y procedimiento experimentales.

2.3.9 Tarea 1 Dibujar el circuito de la figura.

1. Analizar el comportamiento y obtener la tensión de salida para cada combinación.
2. Variar la fuente en $\pm 0.5\%$ y calcular el error en la tensión que aporta cada bit.
3. Variar una de las resistencias de $2R$ en 1% , repetir algunas combinaciones y calcular el error en la tensión de salida.

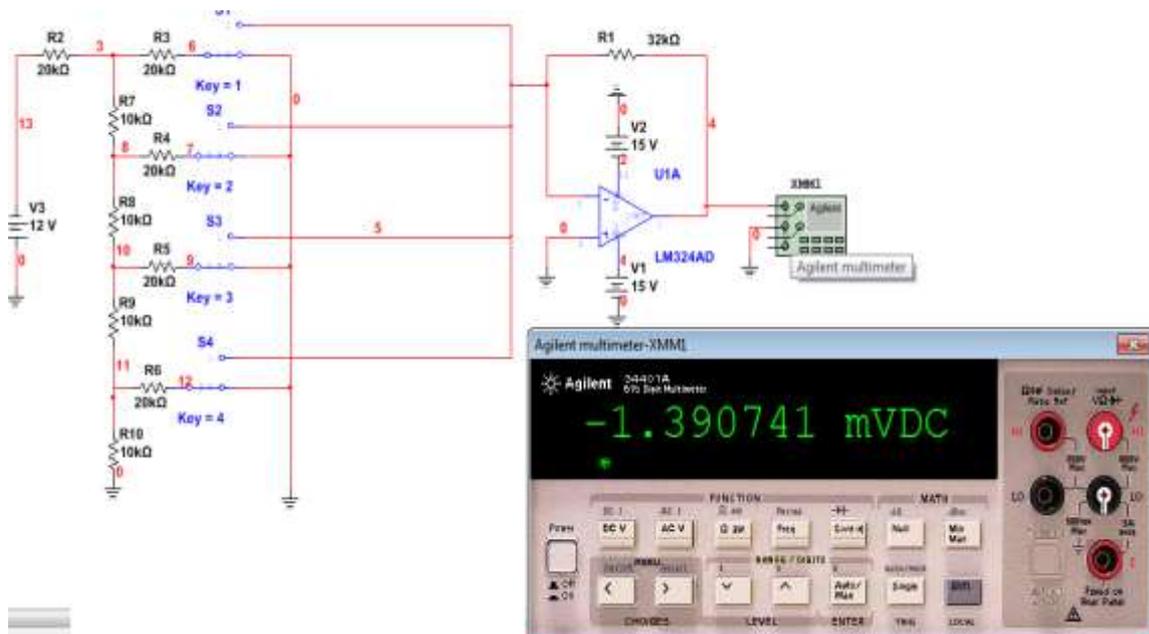


Figura.2.36: Esquema del convertor D/A de red de resistencias R-2R en escalera.

Tabla2.18: Tensión de salida para cada combinación.

Código decimal	Código Binario	Valor de Vs(V)
0	0000	-1.3908
1	0001	0.598385
2	0010	1498.30
3	0011	2098.21
4	0100	3148.35
5	0101	3748.12
6	0110	4648.18
7	0111	5248.03
8	1000	6373.20
9	1001	6973.00
10	1010	7873.00
11	1011	8472.80
12	1100	9523.00
13	1101	10122.80
14	1110	11022.93
15	1111	11622.76

Tabla2.19 Valor de tensión después de variar la fuente en - 0,5% y el error provocado por la variación.

Código decimal	Código binario	Us	Us' - 0.5%	$\Delta U=Us- Us' - 0.5\%$	$\&(\%)- 0.5\%$
0	0000	1.3907	1.3907	0	0
1	0001	0.598385	0.568386	0.029999	2.6E-06
2	0010	1.4983	1.4233	0.075	6.5E-06
4	0100	3.1483	3.5606	-0.4123	-3.5E-05
8	1000	6.3732	6.0545	0.3187	2.7E-05

Tabla2.20: Valor de tensión después de variar la fuente en + 0,5% y el error provocado por la variación.

Código decimal	Código binario	Us	Us' + 0,5%	$\Delta U=Us- Us' + 0,5\%$	$\&(\%)mas$
0	0000	1.3907	1.3907	0	0
1	0001	0.598385	0.601385	-0.003	-2.58E-07
2	0010	1.4983	1.5058	-0.0075	-6.45E-07
4	0100	3.1483	3.7668	-0.6185	-5.32E-05
8	1000	6.3732	6.4051	-0.0319	-2.74E-06

Tabla 2.21: Valor de tensión después de variar R en 0.1% y el error provocado por la variación.

Código decimal	Código binario	Us	Us'	U=Us- Us'	&(%)
2	0010	1498.3	1.4881	0.0102	8.8E-07
4	0100	3148.35	3.7523	0.60395	-5.2E-05
6	0110	4648.18	5.2419	0.59372	-5.1E-05
8	1000	6373.2	6.3744	0.0012	-1.0E-07
10	1010	7873.0	7.8639	0.0091	7.8E-07

2.3.10 Tarea N° 2. Dibujar el circuito de la figura.

1. Analizar el comportamiento y obtener la tensión de salida para cada combinación.
2. Variar la resistencia R en un 0.1 %, repetir las combinaciones donde este activado este bit y calcular el error en la tensión de salida.
3. Variar la resistencia 8R en un 0.1 %, repetir las combinaciones donde este activado este bit y calcular el error en la tensión de salida.

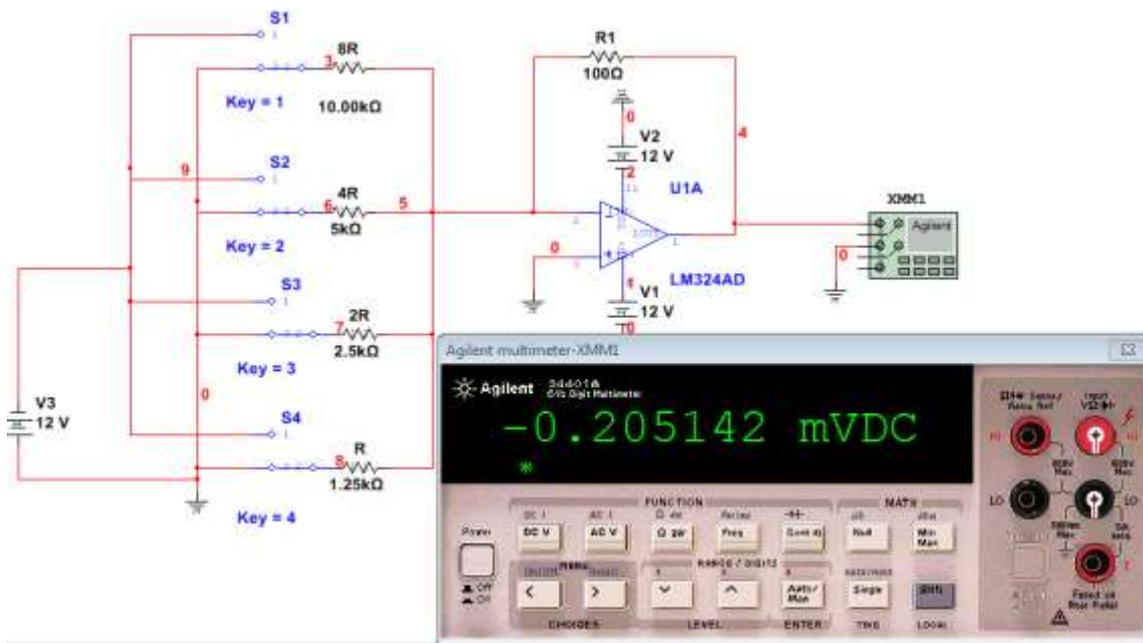


Figura 2.35 Esquema del convertor D/A de escalera invertida.

Tabla 2.22:Tension de salida para cada combinación.

Codigo decimal	Codigo Binario	Valor de Vs(V)
0	0000	-0.205
1	0001	119.790
2	0010	239.780
3	0011	359.780
4	0100	479.780
5	0101	599.780
6	0110	719.770
7	0111	839.770
8	1000	959.770
9	1001	1079.000
10	1010	1199.000
11	1011	1319.000
12	1100	1439.000
13	1101	1559.000
14	1110	1679.000
15	1111	1799.000

Tabla 2.23: Valor de tension de salida despues de variar R en 0.1% y el error provocado por la variacion.

Codigo decimal	Codigo Binario	Us	Us´	$\Delta U=Us- Us´$	&(%)
8	1000	0.95977	0.95881	0.96	0.0005337
9	1001	1.079	1.078	0.001	0.0000006
10	1010	1.199	1.198	0.001	0.0000006
11	1011	1.319	1.318	0.001	0.0000006
12	1100	1.439	1.438	0.001	0.0000006
13	1101	1.559	1.558	0.001	0.0000006
14	1110	1.679	1.678	0.001	0.0000006
15	1111	1.799	1.798	0.001	0.0000006

Tabla 2.24: Valor de tension de salida despues de variar 8R en 0.1% y el error provocado por la variacion.

Código decimal	Código binario	Us	Us´	$\Delta U=Us- Us´$	&(%)
1	0001	119.790	119.670	0.12	0.000067
3	0011	359.780	359.660	0.12	0.000067
5	0101	599.780	599.660	0.12	0.000067
7	0111	839.770	839.650	0.12	0.000067
9	1001	1079.000	1079.600	-0.6	0.0003
11	1011	1319.000	1319.600	-0.6	0.0003
13	1101	1559.000	1559.000	0	0.000000
15	1111	1799.000	1799.600	-0.6	0.0003

2.3.11 Tarea 3. Dibujar el circuito de la figura.

- Analizar el principio de funcionamiento.
- Obtener la cantidad de escalones de cuantificación para la medición de una tensión determinada.

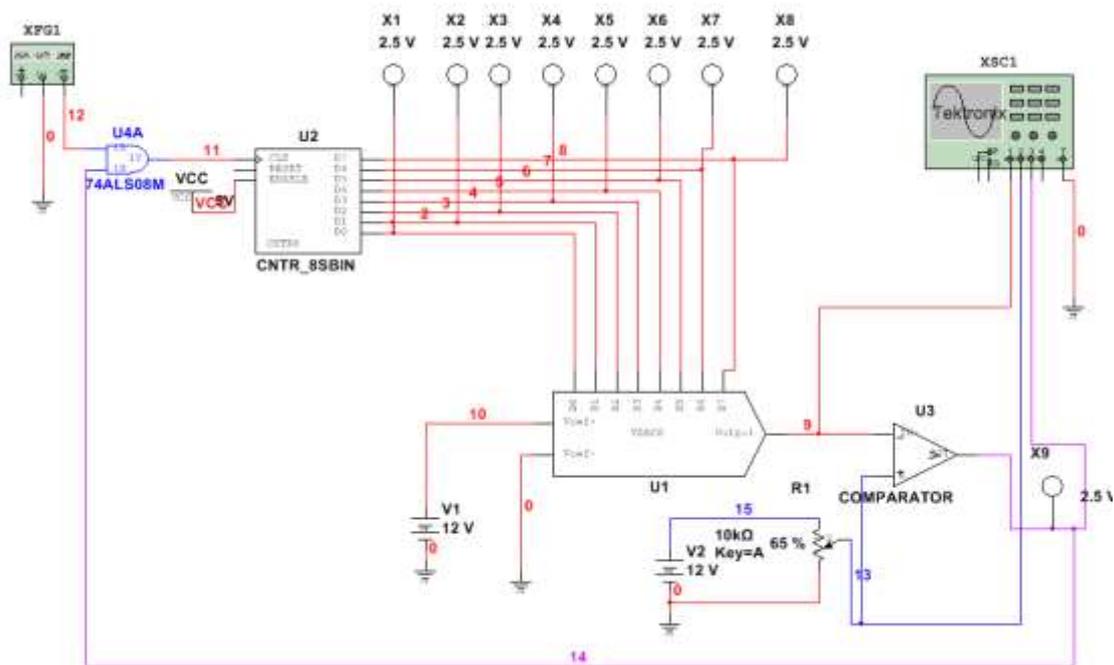


Figura 2.37 Circuito convertidor digital/analógico utilizando un CI.

2.3.12 Cuando se inicia la medición el contador está en cero y el interruptor digital (ID) permite el paso de los impulsos al contador ya que el comparador detecta que el voltaje de comparación es menor que el sometido a medición, por cada impulso que llega al contador, el convertidor digital/analógico aumenta su salida en un escalón de cuantificación, una vez que el comparador detecta la igualdad entre U_x y U_c cambia su estado y no permite al interruptor digital que sigan pasando los impulsos al contador, como se muestra en la **Figura 2.37**.

2.3.13 Para obtener la cantidad de escalones de cuantificación se parte de la ecuación:

$$U = N\Delta U_c$$

N - Número de impulsos llegan al contador.

ΔU_c - Valores del escalón de cuantificación.

N=141 impulsos

$$\Delta U_c = \frac{U}{N}$$

$$\Delta U_c = \frac{12V}{2^8}$$

$$\Delta U_c = \frac{12V}{256} = 0.0468$$

$$U = 141 * 0.0468$$

El valor de tensión va ha ser igual a 6.6093V.

2.4 Conclusiones del capítulo.

Los resultados obtenidos en la simulación de las tres prácticas, evidencia la posibilidades de su utilización en las asignaturas de la disciplina de instrumentación.

Es necesario seguir profundizando en las posibilidades de los modelos de los componentes utilizados, para resolver el inconveniente de no poder realizar los ajustes de offset en los amplificadores operacionales.

Conclusiones

1. Se logro analizar los objetivos y habilidades de la disciplina de instrumentación así como la situación del laboratorio en la actualidad, evidenciando la necesidad de desarrollar el presente trabajo.
2. Se da solución factible al problema existente en los laboratorios de instrumentación desde el punto de vista de la carencia de prácticas de laboratorio, ya que se logro la elaboración de varias prácticas de laboratorio, que se pueden realizar de forma simulada y de existir los componentes realizar su montaje..
3. Los resultados de la simulación muestran la necesidad de dejar elementos de regulación en los circuitos para obtener una mejor correspondencia entre los valores teóricos y los valores de la simulación.
4. El simulador electrónico como elemento que incorporan las técnicas modernas de informática en el contexto docente universitario, permiten lograr mejoras, no solo por sus características y posibilidades, sino por el conocimiento que pueden adquirir los estudiantes en la práctica, al utilizar los distintos programas.

Recomendaciones

1. Realizar trabajos que vinculen la utilización de los simuladores y herramientas informáticas.
2. Continuar con el montaje de los diseños realizados en el trabajo.

Referencia bibliográfica.

- [1] Carlos C., J. “La formación práctica del ingeniero electrónico en el laboratorio” (Revista científica Guillermo de Ockham. Vol. 3 No. 1. Enero-Junio de 2005 • ISSN: 1794-192X 119) o disponible en: http://beta.usb.edu.co/sitefiles/files/revista/vol_3-1/formacion_practica_ingeniero.pdf(28/5/2016).
- [2]Castro M., E. Beltrán E., R. Arquímedes S., A. Jiménez C., J. “Tendencias de la instrumentación moderna” FIE`2000
- [4] Garrido Daniel, Aplicaciones de la Electrónica. Folleto para las asignaturas de Electrónicas. Universidad de Oriente.
- [5] Rojas Rodrigo, Glaría Jaime,” Un convertidor lineal de temperatura en frecuencia a base de un termistor” Departamento de Electrónica, Universidad Técnica Federico Santa MaríaV, Valparaíso, Chile .1982
- [6] Acosta, V. José. Medición de Temperatura. Editorial Oriente. Santiago de Cuba 1989.
- [7] Kaliyugavaradan S, Sankarm P and Murti V “A-new compensation scheme for thermistors and its implementation for response linearization over a wide Trans. Meas. 42 957.4 temperature range IEEE Instrum. 1993
- [8]Larry Jones and A. Foster: Electronic Instruments and Measurements.
- [9]Notas de la conferencia “ Instrumentos Digitales” . Asignatura Mediciones II. Curso 09-2010 Departamento de Control Automático. 2009.
- [10] Alzate Rodríguez, Edwin Jhovany-Montes O Campo, José William-Silva Ortega, Carlos Armando. Medición de temperatura. Sensores termoeléctricos. Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, Colombia.
- [11] Castro E. “Notas tomadas en el curso Circuitos electrónicos para instrumentación”, impartido por el profesor B.C. Гутников.
- [12] Instrumentos Digitales Departamento de Control Automático. 2009
- [13] Conversión analógica/digital y digital/analógica.
- [14] Gil; I y Fernández; R. Nuevos Espacios de Calidad en la Educación Superior. “Un análisis comparado y de tendencias. Potenciación del Aprendizaje Autónomo en

Electrónica Analógica mediante el Simulador Multisim”. Universidad Politécnica de Catalunya. 2010. gilgali@eel.upc.ed

[15] Castro M. E. Pardo G., E. Izquierdo L., J M. Fong B., J. Lamezón A., L.
PRÁCTICAS DE LABORATORIOS CON INSTRUMENTOS VIRTUALES
¿LABORATORIOS REALES O “VIRTUALES”? Conferencia Metodológica FIE 2007

[16] Quesada C.; Y.G. Tesis presentada en la opción al grado de Ingeniero en Telecomunicaciones y Electrónica. “Análisis y Diseño de Circuitos Electrónicos asistidos por computadora”. Departamento de Telecomunicaciones. Facultad de Ingeniería Eléctrica. Universidad de Oriente. 2003. [10] 20C Termopares.pdf

Disponible en: users.salleurl.edu/~se04635/20C%20Termopares.pdf

[17] Miguel A. Pérez García, Juan C. Álvarez Antón, Javier Ferrero Martin, Gustavo Grillo Ortega. Instrumentación Electrónica. Escuela Superior de Ingeniería de Gijón.2004

[18] Sergio Franco. Diseño con amplificadores operacionales y circuitos integrados analógicos. San Francisco State University

[19] DaqBoard/1000 Series -16 bit-200KHz PCI Data Acquisition Board

Disponible en: www.mccdaq.com/products/db1000s.htm

Consultado: 15 de mayo 2016

[Escribir texto]