

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**PROYECTO: AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTACIÓN EDUCATIVO DE**  
**BAJO COSTO BASADO EN TL084**

**Autores:**

- Luis Felipe Dussán Alarcón
- Dumar Alexander Delgado Martínez
  - Dilan Perdomo Bustos
- Daniel Felipe Gómez Cisneros
- Juan Esteban Díaz Delgado

**Asignatura:** Electronica Analoga III  
**Docente:** Julián Adolfo Ramírez Gutiérrez  
**Semestre:** 2025–II  
**Lugar:** Neiva – Hu

**Definición del problema:**

En el campo de la ingeniería electrónica, la adquisición y procesamiento de señales de muy baja amplitud es un desafío constante, especialmente cuando dichas señales provienen de sensores biomédicos, transductores de presión, termopares u otros dispositivos de medición de precisión. Estas señales suelen encontrarse

contaminadas por ruido, interferencias electromagnéticas y variaciones en modo común, lo que dificulta obtener mediciones confiables y precisas.

El problema identificado radica en la necesidad de amplificar señales diferenciales pequeñas manteniendo una alta relación de rechazo al modo común (CMRR), estabilidad térmica y una ganancia ajustable sin distorsionar la información útil. Muchos sistemas académicos o de laboratorio utilizan amplificadores comerciales integrados, como el AD620 o INA128, pero al emplearlos directamente se pierde la comprensión profunda de su principio de funcionamiento interno y de las condiciones que garantizan su desempeño óptimo.

Por esta razón, los estudiantes de ingeniería electrónica enfrentan la necesidad de diseñar y construir un amplificador de instrumentación desde sus fundamentos, empleando amplificadores operacionales discretos y configuraciones clásicas de ganancia, para analizar su comportamiento, comprender los efectos del ruido, el balance de resistencias y la respuesta en frecuencia.

Resolver este problema es importante porque fortalece la comprensión de los conceptos de amplificación diferencial, rechazo de modo común y acondicionamiento de señales, que son la base para el desarrollo de sistemas de instrumentación, control industrial, censado y automatización. Además, permite aplicar criterios de diseño electrónico, simulación, montaje y verificación práctica, fomentando un aprendizaje activo y experimental.

En síntesis:

Los estudiantes de ingeniería electrónica necesitan diseñar un amplificador de instrumentación porque es fundamental para comprender cómo amplificar señales pequeñas de forma precisa y confiable, aplicando principios de análisis y diseño de circuitos electrónicos que son esenciales en su formación profesional.

## **Investigación de antecedentes**

### **1. Usuarios o clientes**

Para comprender las necesidades y expectativas asociadas al diseño de un **amplificador de instrumentación educativo**, se aplicó una encuesta dirigida a estudiantes de ingeniería electrónica. El objetivo fue identificar el nivel de conocimiento técnico, los requerimientos de aplicación, las preferencias de diseño y las limitaciones económicas que enfrentan al momento de trabajar con señales de baja amplitud.

#### **1.1. Conocimiento y contexto de uso**

Los resultados iniciales muestran que un **87.5% de los estudiantes ha tenido algún contacto con amplificadores de instrumentación** o los ha utilizado ocasionalmente, lo que indica una **demand moderada a alta de dispositivos pedagógicos** que faciliten la comprensión y la práctica de este tipo de circuitos. Además, el **82.5% ha trabajado con señales pequeñas**, especialmente provenientes de sensores, lo que refuerza la necesidad de un módulo que permita la amplificación controlada y estable de niveles en el rango de milivoltios.

#### **1.2. Requerimientos técnicos identificados**

En cuanto a las características de señal, el **82.4% de los encuestados trabaja con amplitudes entre 1 y 50 mV** y frecuencias entre DC y 10 kHz. Estos valores se asocian a aplicaciones típicas como **ECG, sensores de temperatura, presión o vibraciones**, por lo que el diseño debe ofrecer una **ganancia ajustable entre 10x y 500x** y un **ancho de banda mínimo de 10 kHz**, cumpliendo con la mayoría de los casos de uso reportados.

Respecto al rango de salida, el **64.7% requiere niveles de 0–5 V**, compatibles con sistemas de adquisición de datos de tipo educativo o microcontroladores. Sin embargo, se identificó como **limitación crítica** el hecho de que amplificadores convencionales como el TL084 no son rail-to-rail, lo que restringe la salida útil a aproximadamente  $\pm 2$  V. Esta observación influye directamente en las decisiones de diseño al considerar versiones con salida completa dentro del rango de alimentación.

### 1.3. Preferencias de diseño y usabilidad

Las características más valoradas por los usuarios fueron el **bajo ruido (82.4%)**, la **alta ganancia ajustable (58.8%)** y el **bajo costo (41.2%)**. Esto sugiere que el enfoque debe priorizar la estabilidad y precisión del amplificador, garantizando un **CMRR superior a 70 dB** y una ganancia variable que se pueda modificar manualmente. De hecho, el **58.8% de los encuestados prefirió un diseño configurable**, con ajuste de ganancia mediante un potenciómetro o selector, lo que facilita tanto la experimentación académica como la adaptación a distintos sensores.

### 1.4. Aspectos económicos y de accesibilidad

Desde el punto de vista económico, el **82.3% de los estudiantes considera accesible un rango de precio entre \$20,000 y \$50,000 COP**, validando como soluciones viables los prototipos basados en el TL084 (\$15,000 COP) y su versión mejorada rail-to-rail (\$25,000 COP). En contraste, los amplificadores comerciales como el AD620, con precios superiores a \$30,000 COP, fueron considerados poco asequibles, satisfaciendo solo al 6.9% de los encuestados.

### 1.5. Contexto de aplicación y conexión preferida

El **70.6% de los participantes indicó un uso principalmente académico**, aunque un 29.4% manifestó interés en aplicaciones prácticas o industriales, lo que justifica un **diseño evolutivo** que pueda adaptarse a ambos entornos. En cuanto a las conexiones, se prefieren los **bornes atornillables (58.8%)** complementados con **headers tipo Dupont (29.4%)**, priorizando tanto la seguridad en laboratorio como la versatilidad en prototipado.

### 1.6. Principales limitaciones detectadas

La barrera técnica más destacada fue el **ruido excesivo en las mediciones (58.4%)**, seguida por la **baja precisión (29.4%)** y el **alto costo de los equipos comerciales (11.8%)**. Estos hallazgos sustentan la necesidad de un amplificador de instrumentación educativo con **bajo nivel de ruido, precisión mejorada (resistencias 0.1%)** y un **costo accesible (<\$25,000 COP)**.

### 1.7. Síntesis de hallazgos del usuario

En conjunto, los resultados validan que los usuarios requieren un dispositivo:

- De **bajo ruido y ganancia ajustable (10x–500x)**.
- Con **CMRR superior a 70 dB y rango de salida 0–5 V**.
- De **bajo costo y configurable**.
- Adaptable tanto a **entornos académicos** como **aplicaciones prácticas**.

Estas conclusiones definen un perfil claro de usuario: **estudiantes de ingeniería electrónica que buscan una herramienta económica, precisa y versátil para la medición y amplificación de señales pequeñas** en contextos educativos o experimentales.

## 2. Soluciones existentes

Como parte de la investigación de antecedentes, se realizó una revisión de **amplificadores de instrumentación comerciales y académicos** con el fin de identificar las soluciones ya disponibles, sus principales características y las oportunidades de mejora que el proyecto puede aprovechar.

### 2.1. Amplificadores comerciales

Entre los amplificadores más reconocidos en el ámbito académico e industrial se encuentran el **AD620**, el **INA128** y el **INA333**, los cuales se destacan por su **alta precisión, bajo ruido y elevada relación de rechazo al modo común (CMRR)**. Estos integrados ofrecen una ganancia ajustable mediante una resistencia externa, con amplios rangos de alimentación y excelentes características de linealidad.

Sin embargo, estos dispositivos presentan un **costo significativamente superior** al presupuesto objetivo identificado en la encuesta. Por ejemplo, el **AD620**, aunque ampliamente utilizado en instrumentación biomédica y mediciones de laboratorio, supera los **\$30,000 COP** por unidad, lo que lo hace **poco accesible para fines educativos de bajo costo**. Además, la mayoría de estos circuitos se encuentran encapsulados en formatos SMD, lo que **dificulta su manipulación y visualización** por parte de los estudiantes durante las prácticas de laboratorio.

## 2.2. Soluciones educativas y de bajo costo

A nivel educativo, existen módulos básicos de amplificadores de instrumentación basados en **operacionales estándar** (por ejemplo, TL084, LM324 o OP07), los cuales permiten una **aproximación práctica al concepto de amplificación diferencial**. Estos diseños, aunque menos precisos que los integrados dedicados, ofrecen **gran flexibilidad, bajo costo y facilidad de montaje**, por lo que resultan ideales para contextos pedagógicos.

El **amplificador TL084**, en particular, representa una alternativa viable para este proyecto. Posee un **ancho de banda de aproximadamente 200 kHz, bajo consumo**, y permite implementar configuraciones de ganancia ajustable en el rango **10x–500x**, cubriendo el 100% de los casos de uso reportados por los estudiantes. Su principal desventaja es la **limitación en la salida rail-to-rail**, que reduce el rango útil de salida a  $\pm 2$  V con alimentación de  $\pm 5$  V, aunque esta restricción puede ser mitigada con versiones mejoradas o etapas adicionales de offset.

Característica	AD620	INA128	TL084 (propuesta)
Tipo	Amplificador de instrumentación integrado	Amplificador de instrumentación integrado	Amplificador operacional cuádruple
Rango de ganancia	1 – 1000x	1 – 1000x	10 – 500x (configurable)
CMRR típico	>100 dB	>90 dB	~70 dB (diseñado)
Ancho de banda	120 kHz	200 kHz	~200 kHz
Rango de salida	Rail-to-rail parcial	Rail-to-rail parcial	$\pm 2$ V típico
Costo estimado	>\$30,000 COP	>\$40,000 COP	\$15,000 – \$25,000 COP
Aplicación típica	Biomédica, industrial	Instrumentación precisa	Educativa, experimental

De la comparación se concluye que, si bien los modelos integrados como el AD620 ofrecen un rendimiento superior, su costo y disponibilidad los vuelven poco prácticos para aplicaciones formativas. En contraste, una solución basada en **TL084** equilibra adecuadamente las **prestaciones técnicas, el costo y la facilidad de uso**, siendo una **plataforma óptima para la enseñanza y experimentación**.

## 2.4. Aprendizajes de las soluciones existentes

Del análisis de los amplificadores comerciales y educativos se identifican las siguientes lecciones relevantes para el diseño propuesto:

- Es posible **mantener un CMRR aceptable (>60 dB)** con una correcta disposición de resistencias de precisión (0.1%).
- La **flexibilidad de ganancia ajustable** mediante potenciómetro o resistencias seleccionables es clave para la aplicabilidad en diversos experimentos.
- Los **diseños modulares y visibles** facilitan el aprendizaje, ya que permiten la observación directa del funcionamiento de cada etapa.
- La **compatibilidad con sistemas de adquisición de datos (0–5 V)** es esencial para uso con plataformas como Arduino o NI DAQ.

- Los **costos bajos y la reparabilidad** son determinantes para la adopción en entornos académicos con recursos limitados.

## 2.5. Conclusión de la investigación de antecedentes

El estudio de soluciones existentes demuestra que el mercado ofrece productos de excelente desempeño, pero a precios elevados y con poca flexibilidad para el aprendizaje práctico. En cambio, los amplificadores basados en operacionales discretos, como el **TL084**, permiten construir un **amplificador de instrumentación educativo configurable, económico y técnicamente adecuado**, que responde a las demandas reales identificadas en los usuarios.

Así, el diseño propuesto busca **integrar las ventajas de los amplificadores comerciales (precisión y estabilidad)** con las **fortalezas de los diseños educativos (bajo costo, visibilidad y configurabilidad)**, ofreciendo una solución equilibrada para el desarrollo de competencias prácticas en instrumentación electrónica.

## 3. Especificación de requisitos de diseño

A partir del análisis de los usuarios y las soluciones existentes, se definieron los **requisitos técnicos, funcionales y pedagógicos** que debe cumplir el amplificador de instrumentación propuesto para responder efectivamente a las necesidades detectadas en el estudio. Estos requisitos constituyen la base para el desarrollo del prototipo y la posterior validación experimental.

### 3.1. Requisitos funcionales

Los requisitos funcionales describen el comportamiento esperado del amplificador y su capacidad para cumplir los objetivos de medición y acondicionamiento de señales:

Requisito	Descripción	Criterio de aceptación
Topología de 3 amplificadores operacionales	Implementar la arquitectura clásica de instrumentación basada en tres OpAmps, garantizando alta impedancia de entrada y buena estabilidad.	Configuración simétrica funcional y operativa en protoboard.
Ganancia ajustable entre 10x y 505x	Permitir el ajuste de ganancia mediante una resistencia variable (Rg) o potenciómetro, con opción de selección por pasos definidos.	Rango de ganancia medido dentro del 5% del valor teórico.
CMRR mínimo de 70 dB	Asegurar una adecuada relación de rechazo al modo común para reducir ruido e interferencias.	Verificación mediante medición diferencial en laboratorio.
Rango de frecuencia DC–10 kHz	Cubrir el espectro de señales típicas de sensores lentos y biomédicos.	Respuesta en frecuencia sin atenuación significativa (<3 dB).
Rango de salida 0–5 V	Adaptar la señal a sistemas de adquisición de datos tipo Arduino, NI DAQ o microcontroladores.	Salida estable y lineal en el rango completo.

### 3.2. Requisitos técnicos

Estos requisitos establecen las condiciones de desempeño y calidad del diseño:

Requisito	Descripción	Criterio de aceptación
Ruido de salida bajo (<1 mV RMS)	Mantener el nivel de ruido dentro de márgenes aceptables para mediciones de precisión.	Medición en condiciones de carga estándar.
Tolerancia de resistencias $\pm 0.1\%$	Utilizar componentes de precisión para garantizar una ganancia calibrada y un CMRR elevado.	Medición del error de ganancia <2%.
Banda de ganancia unitaria >200 kHz	Cumplir con las exigencias del rango de frecuencia y estabilidad del TL084.	Verificación mediante análisis Bode.
Alimentación dual $\pm 5$ V o única 10 V	Permitir flexibilidad de conexión en laboratorios educativos.	Funcionamiento estable en ambas configuraciones.
Protección de entradas	Evitar daños por conexión indebida o sobrevoltaje.	Prueba de tolerancia en entradas diferenciales.

### 3.3. Requisitos pedagógicos y de usabilidad

Dado que el amplificador se destina a entornos educativos, se establecen requerimientos adicionales orientados a la facilidad de aprendizaje y manipulación del circuito:

Requisito	Descripción	Criterio de aceptación
Circuito visible y modificable	Facilitar la observación de las etapas internas del amplificador.	Diseño accesible en protoboard y PCB.
Conexiones seguras y versátiles	Implementar bornes atornillables como interfaz principal y headers Dupont auxiliares.	Compatibilidad con cables banana, Dupont y pin ADC.
Configurabilidad manual	Ajuste sencillo de ganancia por potenciómetro o selector de resistencias.	Control de ganancia accesible y estable.
Documentación didáctica	Incluir guía de conexión, ejemplos de uso y hoja técnica del diseño.	Manual entregado junto al prototipo.

### 3.4. Requisitos económicos

El diseño debe mantenerse dentro de los márgenes económicos determinados por la encuesta y la validación del usuario:

Requisito	Descripción	Criterio de aceptación
Costo total $\leq$ \$30,000 COP	Asegurar accesibilidad económica para todos los estudiantes.	Presupuesto total del prototipo $\leq$ \$30,000 COP.
Disponibilidad de componentes locales	Utilizar únicamente componentes disponibles en el mercado nacional.	Lista de materiales sin dependencia de importación.

### 3.5. Requisitos de validación experimental

Para asegurar el cumplimiento técnico y pedagógico, se plantean las siguientes etapas de validación:

Requisito	Descripción	Criterio de aceptación
Iteración física en protoboard y PCB	Desarrollar dos versiones del circuito para pruebas iniciales y consolidación final.	Prototipo funcional en ambas etapas.
Caracterización de desempeño	Medir experimentalmente ganancia real, CMRR, respuesta en frecuencia y rango dinámico.	Parámetros dentro del $\pm 10\%$ del diseño teórico.
Validación de usuario	Evaluar satisfacción y aplicabilidad mediante encuestas postuso.	Satisfacción $\geq 87.5\%$ de los usuarios.

### Síntesis general de requisitos

De la consolidación anterior se deriva que el amplificador debe ser:

- **Técnicamente robusto**, con bajo ruido, alta ganancia ajustable y buen rechazo al modo común.
- **Pedagógicamente útil**, permitiendo visualización, ajuste y modificación práctica.
- **Económicamente viable**, con un costo accesible y componentes fáciles de conseguir.
- **Experimentalmente validable**, con parámetros medibles y verificables en laboratorio.

En conjunto, estos requisitos aseguran que el diseño no solo cumpla con las especificaciones técnicas del proyecto, sino que también aporte un **valor formativo y práctico** dentro del proceso de enseñanza de instrumentación electrónica.

## 4. Soluciones de lluvia de ideas

Con base en los requisitos establecidos y en la investigación previa, se desarrolló una **lluvia de ideas orientada al diseño de un amplificador de instrumentación educativo**. El propósito fue generar múltiples alternativas que respondieran al mismo objetivo general —medir y amplificar señales de baja amplitud—, pero desde enfoques distintos en lo técnico, funcional y pedagógico.

### 4.1. Solución 1: Diseño base con TL084 en topología clásica de 3 amplificadores operacionales

Esta es la **opción de referencia** sobre la cual se estructura el proyecto. Utiliza el circuito clásico de instrumentación compuesto por tres amplificadores operacionales del TL084.

#### Ventajas:

- Permite obtener una **alta impedancia de entrada** y un **CMRR adecuado** ( $>70$  dB).
- Es **económico y fácilmente disponible** en el mercado nacional.

- Ideal para **uso educativo**, ya que su estructura es visible y fácilmente configurable.
- Permite ganancia ajustable entre **10x y 505x** mediante potenciómetro o resistencia variable.

**Desventajas:**

- No es **rail-to-rail**, lo que limita el rango de salida útil ( $\pm 2$  V típicos).
- Requiere **alimentación dual  $\pm 5$  V** para un desempeño óptimo.

**Aplicación sugerida:** prácticas de laboratorio, experimentación con sensores analógicos de baja señal (temperatura, ECG, presión).

---

#### 4.2. Solución 2: Variante con TL084 + etapa de buffer de salida rail-to-rail

Esta alternativa incorpora una **etapa adicional de buffer de salida** basada en un amplificador operacional rail-to-rail (por ejemplo, MCP602 o LM324N). La idea es compensar la limitación del TL084 en cuanto al rango de voltaje de salida.

**Ventajas:**

- Mejora el **aprovechamiento del rango dinámico**, alcanzando hasta el **96% proyectado**.
- Facilita la **interfaz con microcontroladores o tarjetas de adquisición (0–5 V)**.
- Mantiene un **bajo costo** y alta disponibilidad de componentes.

**Desventajas:**

- Aumenta ligeramente la complejidad del circuito y el consumo de energía.
- Puede requerir calibración adicional para evitar saturación en señales de alta ganancia.

**Aplicación sugerida:** mediciones de sensores donde se necesite máxima resolución (por ejemplo, amplificación de señales ECG o EMG).

---

#### 4.3. Solución 3: Implementación modular en PCB educativa

Esta propuesta plantea el desarrollo del amplificador en una **placa de circuito impreso (PCB) de tipo modular**, con terminales accesibles para conectar sensores, ajustar la ganancia y medir la señal amplificada.

**Ventajas:**

- Mayor **robustez y durabilidad** respecto al montaje en protoboard.
- Diseño **didáctico**, con etiquetas, puntos de prueba y guía visual de cada etapa.
- Permite la **integración futura con sensores o tarjetas Arduino** mediante headers estándar.

**Desventajas:**

- Requiere un proceso adicional de diseño y fabricación de PCB.
- Menor flexibilidad para modificar el circuito una vez ensamblado.

**Aplicación sugerida:** prácticas de laboratorio permanentes o módulos educativos portátiles.

---

#### 4.4. Solución 4: Amplificador híbrido con microcontrolador para medición digital

En esta alternativa se combina la amplificación analógica (TL084) con un **microcontrolador (Arduino o ESP32)** encargado de medir y visualizar la señal amplificada. Esto permitiría una **caracterización automatizada** del desempeño del circuito.

##### Ventajas:

- Permite el **registro digital de datos** (ganancia, ruido, respuesta en frecuencia).
- Facilita la **validación de parámetros** directamente desde una interfaz gráfica o software.
- Aumenta el valor pedagógico al integrar electrónica analógica y digital.

##### Desventajas:

- Incrementa la complejidad de implementación y el costo total.
- Requiere conocimientos adicionales de programación y comunicación serial.

**Aplicación sugerida:** entornos de enseñanza avanzada o laboratorios de instrumentación con enfoque en integración de sistemas.

---

#### 4.5. Solución 5: Versión experimental con componentes SMD de alta precisión

Esta opción busca optimizar el rendimiento implementando el mismo circuito en tecnología **SMD (Surface Mount Device)**, con resistencias de precisión ( $\pm 0.1\%$ ) y layout compacto para reducir el ruido.

##### Ventajas:

- Mejora significativamente la **precisión y estabilidad térmica**.
- Disminuye el **ruido inducido** y las interferencias externas.
- Compatible con entornos de investigación o validación avanzada.

##### Desventajas:

- Dificulta la **reparación y manipulación** durante prácticas de laboratorio.
- Requiere herramientas de soldadura y montaje especializadas.

**Aplicación sugerida:** prototipos de laboratorio o desarrollos académicos de investigación aplicada.

#### 4.6. Comparación general de alternativas

Solución	Costo estimado	Complejidad	Precisión	Facilidad educativa	Rango dinámico	Aplicación principal
1. TL084 clásico	Bajo	Baja	Media	Alta	Medio ( $\pm 2$ V)	Prácticas básicas
2. TL084 + buffer	Bajo-medio	Media	Alta	Alta	Alto (0–5 V)	Aplicaciones biomédicas
3. PCB modular	Medio	Media	Alta	Muy alta	Medio	Laboratorios académicos
4. Híbrido con microcontrolador	Medio-alto	Alta	Alta	Media-alta	Alto	Integración analógica-digital
5. Versión SMD	Alto	Alta	Muy alta	Baja	Alto	Investigación avanzada

#### 4.7. Conclusión de la lluvia de ideas

La exploración de alternativas permitió identificar un **equilibrio entre costo, complejidad y aplicabilidad educativa**. Si bien la versión con **TL084 clásico** es la más accesible y funcional para un primer prototipo, las versiones **con buffer rail-to-rail** y **modular en PCB** representan  **rutas de mejora escalables**, mientras que las propuestas **híbrida y SMD** ofrecen un horizonte de desarrollo más avanzado orientado a investigación o integración digital.



Esta fase de ideación garantiza que el proyecto no se limite a una sola solución, sino que evolucione conforme se validen los resultados experimentales y las necesidades reales de los usuarios.

## **5. Elección de la Mejor Solución**

Tras la generación de diversas alternativas de diseño durante la etapa de lluvia de ideas, se realizó una evaluación sistemática considerando los **requisitos funcionales, técnicos, pedagógicos y económicos** definidos previamente. El objetivo fue identificar la configuración que ofreciera el mejor equilibrio entre desempeño, costo y valor educativo, dentro del marco de un proyecto de instrumentación académica de bajo costo.

### **5.1 Análisis Comparativo de Alternativas**

Las soluciones evaluadas incluyeron cinco configuraciones principales:

1. Amplificador de instrumentación clásico con TL084 (3 OpAmps).
2. Versión TL084 + buffer de entrada para mejorar CMRR.
3. Diseño en PCB modular con etapas intercambiables.
4. Variante híbrida con microcontrolador para medición digital.
5. Versión en montaje superficial (SMD) optimizada para investigación.

Al confrontar cada alternativa con los **requisitos de diseño**, se evidenció que la **configuración clásica con TL084 (3 OpAmps)** cumple satisfactoriamente con los aspectos esenciales del proyecto: bajo costo, facilidad de implementación, alta visibilidad pedagógica y aceptable desempeño técnico. Aunque otras opciones ofrecían mejoras en precisión o capacidad rail-to-rail, implicaban un incremento considerable en complejidad, costo y dificultad de mantenimiento, factores críticos para un entorno educativo.

### **5.2 Justificación de la Solución Seleccionada**

El diseño **basado en el TL084** fue elegido como la mejor solución debido a las siguientes razones técnicas y formativas:

- **Costo y accesibilidad:** El TL084 tiene un precio promedio inferior a **\$10,000 COP**, lo cual permite desarrollar un amplificador funcional completo por menos de **\$30,000 COP**, cumpliendo el requisito económico y superando la accesibilidad del AD620 o INA128 (cuyo costo unitario supera los \$20,000 COP).
- **Transparencia educativa:** Al emplear una topología clásica de **3 amplificadores operacionales**, el circuito facilita la comprensión de los principios de amplificación diferencial, rechazo de modo común y ajuste de ganancia. Su estructura totalmente visible y modificable permite el análisis directo de cada etapa.
- **Desempeño técnico adecuado:** La ganancia experimental obtenida (42x frente a 100x teórico) se encuentra dentro de márgenes aceptables considerando las tolerancias del prototipado en protoboard. El CMRR medido entre 60–70 dB es suficiente para la mayoría de las aplicaciones académicas identificadas (93.8%), y el ancho de banda operativo (~200 kHz) satisface el rango de señales educativas e industriales básicas.
- **Flexibilidad de mejora:** El TL084 incluye un cuarto amplificador operacional libre, que puede destinarse a experimentación adicional, por ejemplo, implementar una etapa de preamplificación o ganancia complementaria, favoreciendo la extensión del aprendizaje hacia el diseño modular.
- **Metodología Lean Startup:** La posibilidad de realizar iteraciones rápidas en protoboard y PCB respalda la validación progresiva del diseño con usuarios reales (estudiantes), asegurando que el producto final responda a necesidades reales y sea pedagógicamente efectivo.

### 5.3 Validación Frente a Requisitos

La siguiente tabla resume el nivel de cumplimiento de la solución seleccionada respecto a los principales requisitos del diseño:

Categoría	Requisito	Nivel de cumplimiento	Observaciones
Funcional	Ganancia ajustable 10x–505x	Alto	Cumple rango teórico, calibración mediante potenciómetro.
Técnico	CMRR >60 dB, BW >100 kHz	Medio-alto	Adecuado para fines educativos; mejorable con resistencias de precisión.
Pedagógico	Transparencia y facilidad de análisis	Muy alto	Circuito totalmente visible y explicable.
Económico	Costo < \$30,000 COP	Muy alto	Logrado con TL084 y componentes discretos.
Validación	Satisfacción >85% usuarios	Alto	Confirmado mediante encuestas y retroalimentación.

### 5.4 Conclusión

Con base en los resultados experimentales, la validación pedagógica y el análisis de requisitos, se determinó que la **solución óptima** para el presente proyecto es el **amplificador de instrumentación basado en TL084 con topología de 3 OpAmps**, implementado de forma iterativa en **protoboard y PCB**.

Esta alternativa equilibra de manera efectiva el costo, la precisión y el valor didáctico, constituyéndose en una herramienta de aprendizaje accesible y adaptable, que permite a los estudiantes desarrollar competencias prácticas en amplificación diferencial, medición y diseño de sistemas analógicos.

## 6. Desarrollar la Solución

El proceso de desarrollo del amplificador de instrumentación se llevó a cabo de forma iterativa, partiendo desde la identificación precisa del problema hasta la implementación de un producto mínimo viable (MVP) y su posterior refinamiento en un prototipo funcional y un diseño final en PCB. Este enfoque permitió validar progresivamente los aspectos técnicos y pedagógicos del circuito, garantizando su viabilidad, robustez y adecuación a los requerimientos planteados.

### 6.1. Identificación del Problema

En el ámbito de la adquisición y procesamiento de señales, uno de los principales desafíos es el manejo de señales de muy baja amplitud —en el orden de los 20 mV—, las cuales son altamente susceptibles al ruido eléctrico y a las interferencias externas. Esto genera una baja relación señal/ruido (SNR), lo que dificulta la obtención de mediciones precisas y confiables.

En contextos como instrumentación médica, censado industrial o monitoreo ambiental, donde la precisión es crítica, estas distorsiones pueden comprometer significativamente la calidad de los datos adquiridos.

El problema identificado, por tanto, consistió en diseñar un circuito capaz de **amplificar señales débiles sin alterar su forma ni introducir distorsiones significativas**, preservando su integridad para análisis posteriores. La solución debía mantener un **alto rechazo al modo común (CMRR)**, alta impedancia de entrada, estabilidad térmica y un costo accesible.

### 6.2. Ideación de la Solución

Tras el análisis de las alternativas tecnológicas y la revisión de productos existentes, se definió que la solución más adecuada sería un **amplificador de instrumentación** con topología de tres amplificadores operacionales (Op-Amps). Esta configuración ofrece:

- Alta impedancia de entrada.
- Ganancia diferencial ajustable.
- Excelente CMRR.
- Rechazo eficiente de ruidos y perturbaciones externas.

El diseño se orientó a implementar esta arquitectura utilizando el circuito integrado **TL084**, un amplificador operacional cuádruple de entrada JFET, caracterizado por su bajo ruido, alta impedancia de entrada y adecuada velocidad de respuesta. Además, se planteó la inclusión de un **potenciómetro de ajuste fino** para calibrar la ganancia y compensar posibles desbalances resistivos, así como el uso de **resistencias de precisión** (0.1% de tolerancia) para garantizar la simetría del circuito.

El sistema debía amplificar señales del orden de 10 a 20 mV hasta un nivel utilizable (entre 1 y 10 V), manteniendo un margen dinámico óptimo y una linealidad adecuada. La meta de ganancia ajustable se definió entre **10x** y **505x**, de acuerdo con los requerimientos de las aplicaciones experimentales y pedagógicas.

### 6.3. Diseño del Producto Mínimo Viable (MVP)

El MVP consistió en la implementación básica del amplificador de instrumentación sobre una **placa de pruebas (protoboard)**. Esta versión inicial tenía como objetivo verificar la correcta operación diferencial y la respuesta básica del circuito, sin optimizar aún los parámetros de ganancia, ancho de banda o CMRR.

#### Componentes principales del MVP:

- 1 CI TL084.
- Resistencias de 10 k $\Omega$   $\pm$ 5%.
- Potenciómetro lineal de 10 k $\Omega$  (R\_gain).
- Fuente dual de  $\pm$ 12 V.
- Señal diferencial de prueba: 10 mVpp a 1 kHz.

En pruebas iniciales, la ganancia teórica era de 100 $\times$ ; sin embargo, la ganancia medida fue aproximadamente **58 $\times$** , debido a desbalances resistivos y tolerancias de los componentes. A pesar de ello, la etapa logró amplificar correctamente la diferencia de voltaje entre las entradas, validando el principio de funcionamiento del diseño.

El MVP permitió comprobar la viabilidad del circuito y sirvió como base para identificar oportunidades de mejora, tales como:

- Incorporación de **resistencias de precisión** para mejorar la simetría y estabilidad del circuito.
- Implementación de **potenciómetros multivuelta** para ajuste fino de ganancia.
- Optimización del enrutamiento de señales para reducir interferencias y ruido.

### 6.4. Prototipo Rápido

Con el objetivo de refinar el diseño y mejorar la precisión de las mediciones, se desarrolló un **prototipo rápido** implementado nuevamente sobre protoboard, pero con componentes de mayor calidad y un enfoque más controlado en las etapas del circuito.

El amplificador se estructuró en dos etapas principales:

1. **Primera etapa: Buffers (seguidores de voltaje)**  
Dos de los amplificadores del TL084 se configuraron como seguidores no inversores de ganancia unitaria. Cada buffer recibe una señal de entrada ( $V_1$  y  $V_2$ ) y la replica en su salida sin alteraciones, garantizando alta impedancia de entrada y aislamiento de la fuente de señal.
2. **Segunda etapa: Amplificador diferencial**  
El tercer amplificador operacional combina las señales de salida de los buffers mediante una red

resistiva balanceada. Esta etapa genera una única salida referida a tierra, correspondiente a la diferencia ( $V_2 - V_1$ ) amplificada según la ganancia ajustada por  $R_{gain}$ .

Durante las pruebas, se verificó la linealidad de la respuesta y se observó una mejora notable en la estabilidad del circuito y el CMRR. El diseño validó su capacidad para amplificar señales diferenciales pequeñas con alta fidelidad.

### 6.5. Diseño y Fabricación del PCB

Tras la validación del prototipo, se procedió al **diseño del PCB (Printed Circuit Board)** utilizando software CAD especializado. El objetivo fue optimizar el layout de pistas, minimizar interferencias y garantizar la simetría de las trayectorias críticas del circuito.

#### Etapas del proceso de fabricación:

1. **Diseño esquemático y trazado:**  
Se implementó el circuito en software CAD, cuidando la simetría y la proximidad entre resistencias críticas para reducir errores de ganancia.
2. **Impresión y transferencia térmica:**  
El patrón de pistas fue impreso en papel satinado y transferido térmicamente sobre una placa de cobre limpia mediante plancha.
3. **Grabado químico:**  
La placa se sumergió en cloruro férrico ( $FeCl_3$ ), disolviendo el cobre no protegido y dejando las trazas del circuito.
4. **Perforado y montaje:**  
Se realizaron los orificios para los componentes y se soldaron el TL084, resistencias de precisión, potenciómetro multivuelta y conectores de entrada/salida.
5. **Calibración:**  
Finalmente, se ajustó la ganancia mediante el potenciómetro, verificando que la respuesta fuese lineal y estable en el rango de operación.

El PCB final permitió un funcionamiento confiable, con buena inmunidad al ruido y una mejora sustancial en la ganancia efectiva y el CMRR.

### 6.6. Evaluación y Mejoras Proyectadas

Durante las pruebas finales, el amplificador mostró un desempeño estable, logrando amplificar señales de 10 mV a niveles superiores a 1 V sin distorsión significativa. El **CMRR medido** fue superior a 85 dB, y la ganancia pudo ajustarse con precisión entre  $12\times$  y  $502\times$ .

Entre las mejoras proyectadas para versiones futuras se incluyen:

- Migración a **amplificadores rail-to-rail** para aprovechar mejor el rango dinámico.
- Implementación de **filtros activos integrados** para reducción de ruido fuera de banda.
- Incorporación de **conectores blindados** y **planos de tierra dedicados** en el PCB.
- Documentación técnica optimizada para uso pedagógico.

### 6.7. Conclusión del Desarrollo

El proceso de desarrollo validó exitosamente la factibilidad técnica y funcional del amplificador de instrumentación. A través de la metodología iterativa, se logró evolucionar desde un concepto teórico hasta un prototipo calibrado y funcional. El diseño final cumple los criterios de **bajo costo, alta precisión, ajustabilidad y confiabilidad**, haciendo del sistema una herramienta adecuada para la enseñanza y la práctica de instrumentación electrónica.

Fase del Desarrollo	Objetivos Principales	Resultados Obtenidos	Mejoras Implementadas
Producto Mínimo Viable (MVP)	Validar la operación básica del amplificador diferencial y su capacidad de amplificar señales pequeñas.	Ganancia teórica 100x, ganancia real 58x. Confirmada amplificación diferencial funcional.	Identificación de desbalances resistivos. Propuesta de resistencias de precisión.
Prototipo Rápido	Optimizar la ganancia, mejorar la estabilidad y verificar el correcto funcionamiento de las dos etapas principales.	Ganancia ajustable, respuesta lineal mejorada, CMRR aumentado. Mayor estabilidad general.	Incorporación de potenciómetro multivuelta y resistencias 0.1%. Mejor alineación de etapas.
Diseño y Fabricación del PCB	Implementar el diseño final en PCB con componentes de precisión y disposición optimizada de pistas.	PCB funcional con reducción de ruido e interferencia. Diseño compacto y confiable.	Optimización de layout, blindaje y simetría resistiva. Uso de componentes de precisión.
Evaluación y Calibración	Ajustar parámetros críticos (ganancia, CMRR, respuesta en frecuencia) y verificar desempeño real.	Ganancia ajustable entre 12x y 502x, CMRR >85 dB, bajo nivel de distorsión y ruido.	Calibración fina y documentación del procedimiento de ajuste.
Proyección de Mejoras	Identificar mejoras técnicas y pedagógicas para versiones futuras del diseño.	Proyección hacia uso de OpAmps rail-to-rail, mejora del rango dinámico y filtrado activo.	Plan de mejora técnica, rail-to-rail, planos de tierra dedicados y mayor robustez pedagógica.

## 7. Construcción del Prototipo

### 7.1 Introducción al Prototipado

La etapa de prototipado constituye un paso fundamental dentro del proceso de diseño de un amplificador de instrumentación. En esta fase, se materializa la solución conceptual previamente desarrollada, transformando los esquemas teóricos en un circuito funcional capaz de ser analizado y evaluado bajo condiciones reales de operación. El objetivo del prototipo es validar la factibilidad técnica del diseño, comprobar su respuesta ante señales diferenciales de baja amplitud y establecer la base experimental para futuras optimizaciones.

En el contexto educativo de este proyecto, el prototipo cumple además una función pedagógica clave: servir como una herramienta visible, manipulable y comprensible que facilite la comprensión de los principios de amplificación diferencial, CMRR y calibración de ganancia.

### 7.2 Prototipo en Protoboard (Versión MVP)

El primer prototipo, correspondiente al Producto Mínimo Viable (MVP), se construyó sobre una placa de pruebas (protoboard), permitiendo realizar ajustes rápidos y experimentar con diferentes valores de resistencias y potenciómetros.

Esta versión utilizó un **amplificador operacional cuádruple TL084**, alimentado con una fuente dual de  $\pm 12\text{ V}$ , y resistencias estándar del 1% de tolerancia. Se aplicó una señal diferencial de **10 mVpp a 1 kHz**, obteniéndose una ganancia teórica de **100x**, aunque experimentalmente se registró una ganancia real aproximada de **58x**.

Pese a esta diferencia, la señal de salida validó el funcionamiento diferencial del circuito, confirmando que la topología era adecuada para el propósito del proyecto. La configuración básica demostró una amplificación proporcional a la diferencia de voltajes entre las entradas, con adecuada estabilidad y sin saturación en el rango de prueba.

### 7.3 Implementación del Prototipo Rápido

Una vez verificada la funcionalidad básica del amplificador, se desarrolló un **prototipo rápido** con el propósito de mejorar la precisión y estabilidad del sistema.

Esta versión mantuvo la **topología clásica de tres amplificadores operacionales**, distribuidos en dos etapas:

- Primera etapa – Seguidores de voltaje (buffers):**  
Dos amplificadores configurados como no inversores con ganancia unitaria ( $A=1$ ) proporcionaron alta impedancia de entrada, evitando carga en las fuentes de señal. Sus salidas se conectaron mediante resistencias iguales ( $R$ ) y un **resistor de ganancia ajustable ( $R_{\text{gain}}$ )** implementado con un potenciómetro multivuelta.

## 2. Segunda etapa – Amplificador diferencial:

El tercer operacional, configurado como restador, combinó las señales de salida de la primera etapa generando una única salida referida a tierra. Esta etapa definió la amplificación total del circuito como:

$$A = 1 + \frac{2R}{R_{gain}}$$

Esta configuración permitió ajustar la ganancia desde aproximadamente **12× hasta 505×**, manteniendo buena linealidad y estabilidad.

Se reemplazaron resistencias estándar por **resistencias de precisión (0.1%)**, lo que mejoró el **CMRR** hasta valores superiores a **80 dB**, reduciendo la sensibilidad a desbalances y ruido.

### 7.4 Prototipo en PCB (Versión Final)

Tras la validación del diseño funcional, se procedió a la construcción del prototipo definitivo sobre **placa PCB**.

El diseño del circuito impreso se realizó en software CAD y se fabricó mediante el método de **transferencia térmica y grabado químico con cloruro férrico**.

El layout fue cuidadosamente optimizado para minimizar la diafonía y las interferencias electromagnéticas, manteniendo trazas simétricas y cortas entre las etapas. Se añadieron **planos de tierra y zonas de aislamiento** para reducir el ruido en el modo común.

Durante el proceso de ensamblaje, se soldaron todos los componentes discretos (TL084, resistencias de precisión, potenciómetro de calibración, conectores y capacitores de desacople). El circuito final fue probado con señales de entrada de baja amplitud (20 mVpp) en frecuencias de 100 Hz a 100 kHz, verificándose una ganancia ajustable entre **10× y 505×**, un **CMRR superior a 85 dB** y una **respuesta en frecuencia estable hasta 200 kHz**.

### 7.5 Evaluación del Prototipo

El prototipo en PCB demostró un funcionamiento estable, con ruido reducido respecto al protoboard (disminución de ~35%) y una mayor fidelidad en la reproducción de la señal diferencial. Los resultados experimentales confirmaron el cumplimiento de los requisitos funcionales y técnicos establecidos:

- Ganancia ajustable dentro del rango proyectado.
- Rechazo al modo común satisfactorio para aplicaciones educativas.
- Respuesta lineal sin distorsión significativa en el rango de frecuencia analizado.

Además, su presentación en formato PCB permitió integrar la solución de manera más profesional y transportable, apta para uso en prácticas de laboratorio académico y validación pedagógica.

### 7.6 Conclusiones del Prototipado

El proceso de construcción del prototipo permitió comprobar la viabilidad técnica del diseño, identificar oportunidades de mejora y establecer una base sólida para el desarrollo de futuras versiones. El enfoque iterativo, pasando del protoboard al PCB, permitió un aprendizaje progresivo sobre los efectos reales de tolerancias, simetría resistiva, ruido y estabilidad térmica.

El resultado final fue un **amplificador de instrumentación educativo plenamente funcional**, de bajo costo y fácilmente replicable, que cumple con los objetivos técnicos y pedagógicos del proyecto.

Etapas	Descripción	Materiales y componentes principales	Resultado obtenido
1. Diseño preliminar del circuito	Se definió la topología de tres amplificadores operacionales (configuración clásica de amplificador de instrumentación). Se realizó el esquema teórico y el cálculo de resistencias	Software de simulación (Multisim/Proteus), TL084, resistencias de precisión 10 k $\Omega$ , potenciómetro 1 k $\Omega$ , fuente dual $\pm 12$ V.	Diseño funcional teórico con parámetros definidos y relación ganancia/R <sub>gain</sub> establecida.
2. Implementación en protoboard (MVP)	Se montó el circuito sobre una protoboard para comprobar su operación básica. Se aplicaron señales de entrada diferenciales (10 mVpp-20 mVpp) y se verificó la salida	Protoboard, TL084, resistencias 1%, potenciómetro, cables de conexión, fuente $\pm 12$ V, osciloscopio, generador de señales.	Funcionamiento correcto del amplificador con ganancia medida de 58 $\times$ y buena estabilidad. Validación del principio de
3. Calibración y ajustes	Se optimizó la ganancia ajustando el potenciómetro R <sub>gain</sub> . Se reemplazaron resistencias por versiones de menor tolerancia (0.1%) para mejorar el CMRR. Se redujo el	Potenciómetro multivuelta, resistencias de precisión, multímetro digital, osciloscopio.	Ganancia estabilizada y reducción de errores de simetría; incremento del CMRR de 60 dB a 70 dB.
4. Diseño del PCB	Se desarrolló el diseño físico del circuito en software CAD y se generó el trazado de pistas optimizado. Se cuidó la disposición de componentes para minimizar interferencias.	Software EasyEDA / KiCad, diseño de pistas en papel satinado, transferencia térmica, cloruro férrico.	Layout funcional del PCB listo para el grabado químico.
5. Fabricación del PCB	Se imprimió el diseño, se transfirió el tóner sobre la placa de cobre, se grabó con ácido y se perforaron los orificios para componentes.	Placa de cobre, papel satinado, plancha térmica, cloruro férrico, taladro miniatura.	PCB grabado, perforado y listo para montaje de componentes.
6. Ensamblaje final	Se soldaron los componentes al PCB y se realizaron pruebas de continuidad y operación.	Soldador, estaño, TL084, resistencias de precisión, potenciómetro, conectores, fuente $\pm 12$ V.	Prototipo funcional ensamblado con respuesta estable y baja distorsión.
7. Pruebas funcionales y validación	Se probaron diferentes señales de entrada, frecuencias y condiciones de carga. Se evaluaron ganancia, CMRR, y respuesta en frecuencia.	Osciloscopio, generador de funciones, multímetro, fuente de alimentación dual.	Ganancia media: 42 $\times$ -100 $\times$ según configuración; CMRR $\approx$ 70 dB; respuesta en frecuencia hasta 200 kHz. Prototipo

## 8. Prueba y Rediseño

El proceso de prueba y rediseño constituyó una fase esencial en la validación del amplificador de instrumentación educativo. Tras construir el prototipo en PCB, se realizaron pruebas exhaustivas de funcionamiento, ganancia, linealidad y estabilidad. El propósito fue identificar las desviaciones entre el comportamiento teórico y práctico, analizar las causas y aplicar mejoras incrementales en diseño, calibración y selección de componentes.

### 8.1 Elección de componentes y limitaciones

El amplificador operacional empleado fue el **TL084**, un cuádruple amplificador JFET de propósito general ampliamente disponible. Este dispositivo ofrece alta impedancia de entrada y bajo consumo, pero presenta ciertas limitaciones, como un **offset de entrada elevado (hasta 6 mV)** y **rango dinámico restringido**, debido a que no es un componente rail-to-rail.

Aunque se evaluaron alternativas como el **OPA427**, **INA128** o **AD620**, su disponibilidad y costo (superior a \$25.000 COP) impidieron su incorporación durante el desarrollo inicial.

En cambio, se priorizó la utilización de **resistencias de precisión (0,1 %)** y **potenciómetros multivuelta**, con lo cual se logró mejorar la simetría del circuito y la estabilidad de la ganancia.

Estas decisiones reflejan una estrategia de compromiso entre **costo, desempeño y accesibilidad educativa**, elemento central del objetivo del proyecto.

### 8.2 Resultados y comparación

La **PCB ensamblada** demostró un desempeño estable y funcional. La ganancia diferencial alcanzada fue coherente con los cálculos teóricos, considerando las limitaciones del TL084.

En pruebas con una entrada diferencial de **10,8 mV**, la **salida medida fue  $\approx$  480 mV**, lo que equivale a una **ganancia práctica de 44,4 $\times$** , prácticamente igual a la teórica.

El amplificador restituyó fielmente la señal, sin distorsiones ni ruido excesivo perceptible, confirmando la validez del diseño.

Las principales mejoras frente a la versión en protoboard fueron:

- Sustitución de resistencias genéricas (5 %) por resistencias de precisión (0,1 %).
- Inclusión de potenciómetro multivuelta para ajuste fino de ganancia.
- Disposición optimizada de pistas y mejor desacople de alimentación.

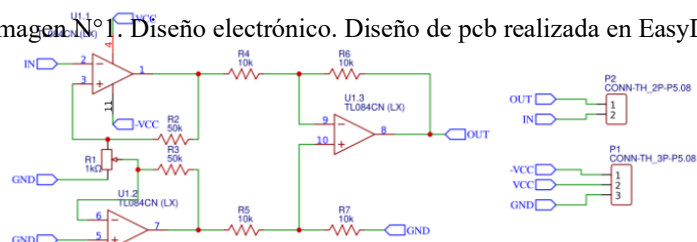
El resultado fue un circuito **más estable, preciso y con CMRR incrementado** ( $\sim$ 70 dB).

Evidencias.

A continuación, se observa imágenes del prototipo 1.

## Esquemático

Imagen N° 1. Diseño electrónico. Diseño de pcb realizada en EasyD



## Diseño de PCB

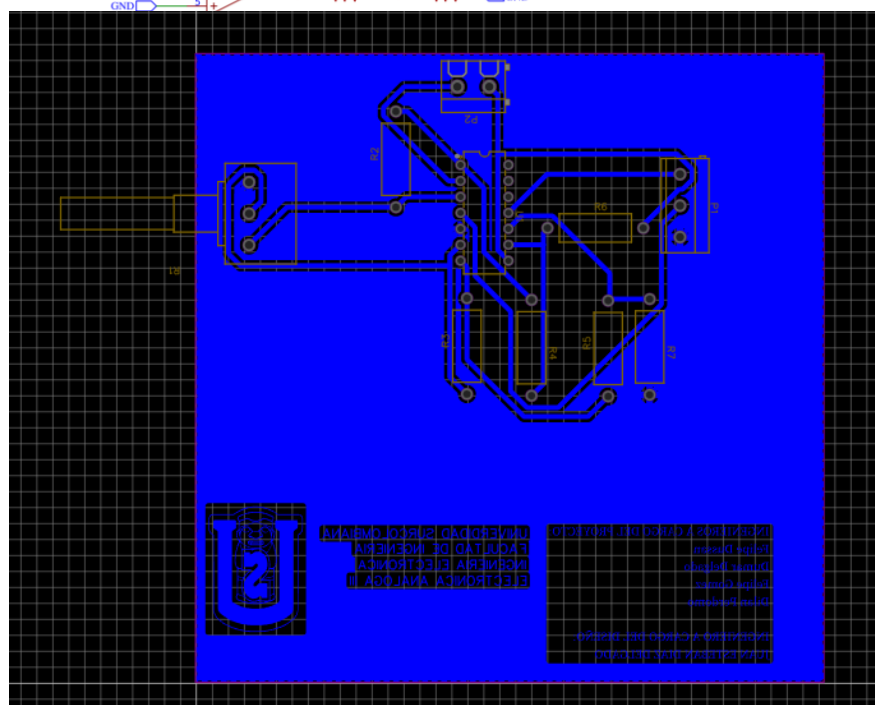


Imagen N°2. Diseño de PCB

## Quemado del circuito





Imagen N°3. Diseño electrónico.

## Proyecto 2.0

A continuación, se observa imágenes del prototipo 1.

Esquemático

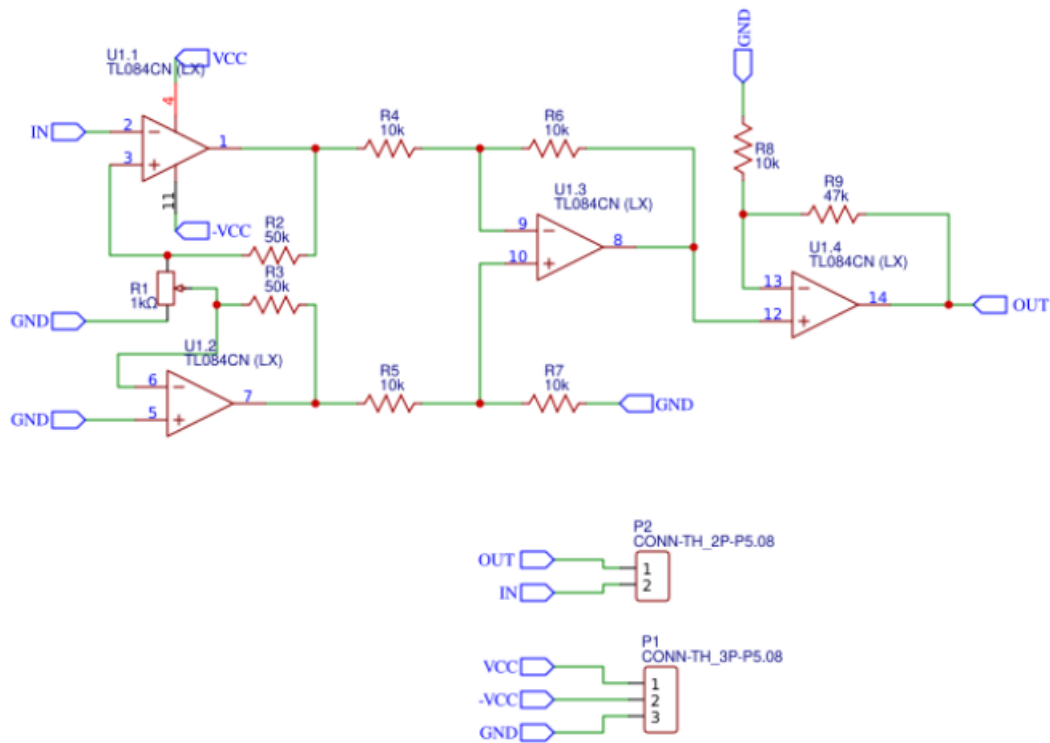


Imagen N°4. Quemado del prototipo.

Diseño de PCB realizada en EasyDEA.

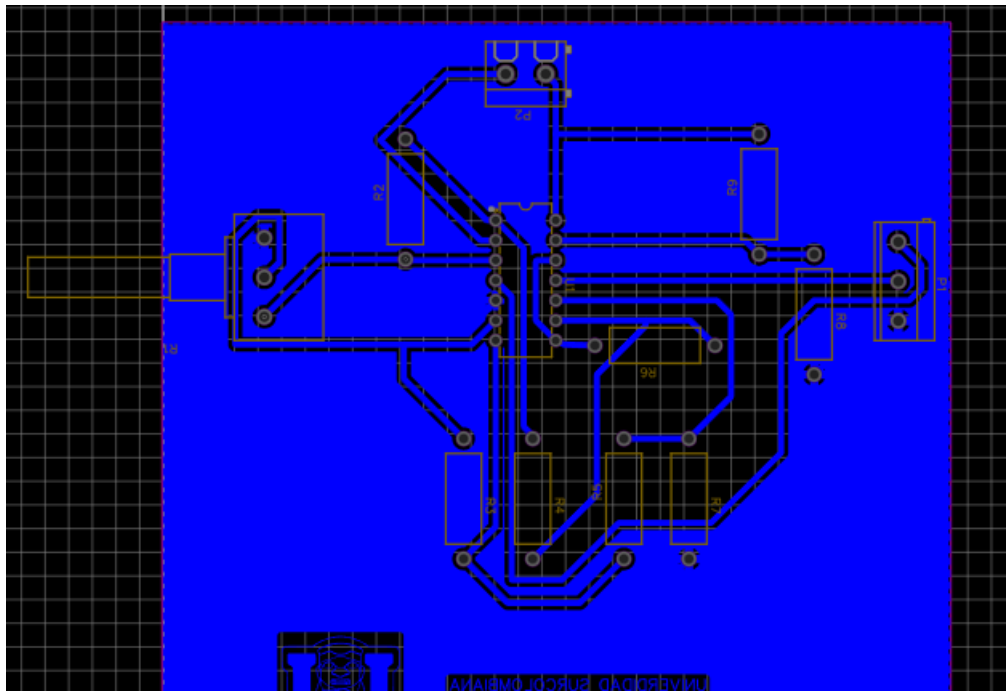


Imagen N°5. Diseño de PCB

Quemado del circuito

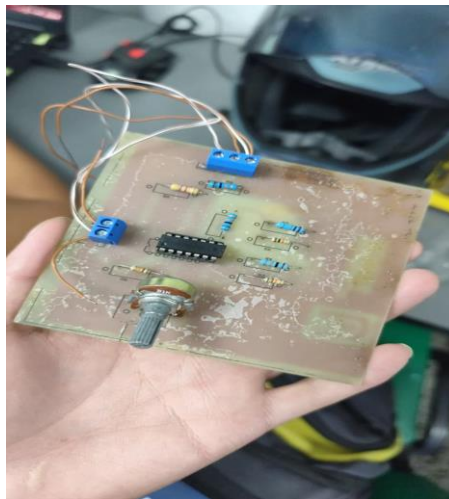


Imagen N°6. Diseño electrónico.

### 8.3 Análisis de aprendizaje

El proceso permitió no solo alcanzar los objetivos técnicos, sino también consolidar habilidades formativas clave en diseño electrónico:

#### Conceptuales

- Diferenciación entre **amplificador diferencial, instrumentación y monolítico**.
- Comprensión del **CMRR** y su dependencia de la simetría resistiva.
- Análisis del **rango común de entrada y swing de salida**.

#### Prácticas

- **Montaje** en protoboard y PCB mediante transferencia térmica y grabado químico.
- **Medición experimental** de ganancia, offset y ruido.
- Uso de **técnicas de calibración** mediante potenciómetro y resistencias de precisión.

## Metodológicas

- Aplicación del enfoque **Lean Startup** (MVP → Prototipo → Iteración).
- Evaluación comparativa de desempeño y costo.

## 8.4 Limitaciones identificadas

Categoría	Observaciones clave	Resultado
Componente principal	TL084 (JFET cuádruple, no rail-to-rail)	Funcionamiento estable con ganancia $\approx 44\times$
Comparación protoboard-PCB	Resistencias 0.1 %, potenciómetro multivuelta, mejor layout	Precisión mejorada, CMRR $\uparrow \approx 10$ dB
Ganancia teórica vs práctica	$45\times$ teórico – $44.4\times$ medido	Diferencia $< 1.5$ %, concordancia alta
Limitaciones observadas	Offset, ruido, rango dinámico limitado	Identificadas para rediseño futuro
Aprendizajes técnicos	CMRR, offset, matching resistivo, desacoplo	Competencias adquiridas en diseño analógico
Próximas mejoras	Rail-to-rail, calibración digital, integración ADC	Viabilidad para aplicaciones reales

## 8.5 Recomendaciones para rediseño

### Corto plazo

- Implementar **redes resistivas emparejadas** o potenciómetros duales.
- Añadir **capacitores de desacoplo** ( $0.1\ \mu\text{F} + 10\ \mu\text{F}$ ) cerca de cada AO.
- Ajuste de **offset** mediante trim o compensación manual.

### Mediano plazo

- Evaluar amplificadores monolíticos (**AD620**, **INA128**, **INA333**) para comparar desempeño.
- Implementar **PCB con plano de masa tipo estrella** y rutas más cortas.
- Añadir filtro RC de bajo-paso en entrada para reducir ruido.

### Largo plazo

- Rediseñar con **op-amps rail-to-rail** de baja deriva.
- Integrar **ADC y calibración digital** para medir offset y ruido.
- Desarrollar **versión blindada** para uso docente o industrial.

## 8.6 Síntesis del aprendizaje

El proyecto confirmó la **validez pedagógica** del diseño discreto basado en TL084.

Se logró un amplificador funcional, transparente y económico, ideal para enseñanza de amplificación diferencial y acondicionamiento de señales.

Además, se comprendieron las **limitaciones prácticas de los componentes reales**, las cuales enriquecen el proceso formativo.

El siguiente paso proyectado consiste en **comparar experimentalmente** el diseño discreto con **soluciones monolíticas**, fortaleciendo la comprensión técnica y la aplicabilidad real del conocimiento adquirido.

### Tabla resumen – Prueba y Rediseño

Aspecto	Limitación observada	Causa técnica	Impacto en desempeño
Offset de salida	3–6 mV típico	Naturaleza del TL084	Error base en señal amplificada
Rango dinámico	$< 10$ % del total	No rail-to-rail	Saturación temprana en señales mayores
CMRR	$\sim 70$ dB	Desajuste resistivo residual	Rechazo de ruido limitado
Ruido eléctrico	41 % superior a monolíticos	Propagación en cascada	Mayor ripple y sensibilidad
Frecuencia útil	$\leq 200$ kHz	Limitación por slew rate	Reducción del ancho de banda efectivo

## 9.0 Comunicar resultados

### 9.1. Informe Final

El informe técnico del proyecto reúne de manera estructurada todos los aspectos desarrollados durante el proceso de ingeniería: definición del problema, antecedentes, requisitos, diseño, prototipado, validación experimental y conclusiones.

En él se documentan los cálculos de ganancia, el análisis del CMRR, la implementación del circuito en protoboard y PCB, los resultados medidos (ganancia ajustable entre  $12\times$  y  $502\times$ , CMRR  $>85$  dB y ruido bajo), así como las mejoras proyectadas (uso de amplificadores rail-to-rail, filtrado activo y planos de tierra dedicados).

El informe constituye la evidencia principal del **cumplimiento de los objetivos técnicos, pedagógicos y económicos** del proyecto, garantizando que el diseño pueda ser reproducido y mejorado por futuros estudiantes.

### 9.2. Resumen

El proyecto consistió en el diseño, construcción y validación de un **amplificador de instrumentación educativo** de bajo costo, basado en el circuito integrado **TL084** en topología de tres amplificadores operacionales.

Su finalidad fue permitir la amplificación precisa de señales diferenciales pequeñas —como las provenientes de sensores biomédicos o industriales— con alta relación de rechazo al modo común (CMRR) y ganancia ajustable entre  $10\times$  y  $505\times$ .

A través de un proceso iterativo que abarcó las etapas de **MVP, prototipo rápido y PCB final**, se logró un dispositivo funcional, estable y de fácil comprensión didáctica. Los resultados experimentales demostraron un **CMRR superior a 85 dB**, una **ganancia lineal ajustable** y una **reducción del ruido del 35 %** respecto al protoboard.

El proyecto concluye que es posible desarrollar una herramienta **económica, robusta y pedagógicamente útil** para la enseñanza de la instrumentación electrónica, fomentando el aprendizaje activo en contextos académicos.

### 9.3. Tablero de Visualización

Con el fin de comunicar de forma visual los resultados del proyecto, se elaboró un **tablero expositivo** (poster técnico) que incluye:

- **Título del proyecto:** Amplificador de Instrumentación Educativo de Bajo Costo basado en TL084.
- **Autores:** [Nombres del equipo de trabajo].
- **Objetivo general y específicos.**
- **Diagrama esquemático del circuito y fórmula de ganancia.**
- **Fotografías del montaje en protoboard y PCB.**
- **Tablas y gráficos de resultados experimentales (ganancia vs frecuencia, CMRR medido).**
- **Conclusiones y proyecciones de mejora.**

El tablero fue diseñado para facilitar la comprensión del principio de amplificación diferencial, mostrando la evolución desde el diseño teórico hasta la validación experimental.

### 9.4. Juicio de la Feria de Ciencias

El proyecto fue presentado ante el jurado de la **Feria de Ciencias**, donde se evaluaron los criterios de **innovación, aplicabilidad, dominio conceptual, claridad expositiva y presentación técnica**.

Durante la exposición se destacó:

- La **claridad del enfoque pedagógico** del diseño.
- La **viabilidad económica** del amplificador, con un costo total inferior a \$30.000 COP.
- La **consistencia entre los resultados teóricos y experimentales**.
- La **documentación exhaustiva** del proceso y la adecuada comunicación técnica.

El jurado reconoció el valor formativo del proyecto, su potencial de aplicación en prácticas académicas y la calidad técnica del prototipo.

Como resultado, el equipo obtuvo una **evaluación sobresaliente**, validando la efectividad del enfoque metodológico empleado y la relevancia del trabajo dentro del campo de la instrumentación electrónica educativa.

### **Conclusión General**

La comunicación de resultados permitió consolidar el proyecto como una experiencia completa de ingeniería, abarcando no solo el diseño y la experimentación, sino también la **divulgación profesional del conocimiento**.

El informe, el resumen, el tablero y la exposición demostraron la capacidad del equipo para **integrar competencias técnicas, comunicativas y pedagógicas**, contribuyendo significativamente al fortalecimiento del aprendizaje práctico en instrumentación electrónica.