



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA CENTROAMERICANA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES PARA LA COMPATIBILIDAD DE LAS CELDAS DE
CARGA EN LOS MICROCONTROLADORES PIC**

PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO:

INGENIERO EN MECATRÓNICA

PRESENTADO POR:

21511150

GUILLERMO ENRIQUE FÚNEZ CARRASCO

ASESOR: JOSÉ LUIS ORDOÑEZ ÁVILA

CAMPUS: SAN PEDRO SULA; ENERO, 2020

DEDICATORIA

A Dios quien me ha permitido culminar mi preparación con sabiduría, brindando fuerza y sustento.

A mi padre Luis Ricardo Funez Panting, a mi madre Suyapa Abelina Carrasco Herrera y mi hermano Luis Ricardo Funez Carrasco, quienes con todo su amor han sido de apoyo incondicional durante este proceso de formación profesional.

~Guillermo Enrique Fúnez Carrasco

AGRADECIMIENTO

A Dios que me brindó la oportunidad de forjar mi carácter profesional y personal, poniendo a disposición a mi alrededor a las mejores personas, con quienes comparto hoy en día.

A mis padres y hermano por su consistente apoyo en velar por mi preparación académica, quienes fundaron valores en mí, para ser mejor persona.

A mis mejores amigos, Robert Scott Jones Morán, Oscar Eduardo Robles Durón, Tarek Al maso Canahuati y Marvin José Lorenzana Bueso, por haber sido acompañantes y testigos en las duras pruebas que se nos presentaron durante nuestra formación.

A todos mis compañeros que estuvieron presentes en mi formación y que han dejado huella positiva en mi profesión.

Al ingeniero Jose Luis Ordoñez y a todos los docentes que impartieron sus clases con entrega, pasión y abnegación, que dispusieron su conocimiento al servicio de sus aprendices.

~Guillermo Enrique Fúnez Carrasco

EPÍGRAFE

“Nunca consideres el estudio como una obligación, sino como la oportunidad para penetrar en el bello y maravilloso mundo del saber.”

~ Albert Einstein

RESUMEN EJECUTIVO

La instrumentación industrial ha sido un pilar de la ingeniería de control moderna, ésta de la mano con la metrología, permiten adquirir información de manera estándar para la toma de decisiones en procesos industriales complejos. El pesaje industrial era un mecanismo que permitía con base a una referencia al equilibrio mecánico, conocer el peso de un cuerpo desconocido en donde estos no incluían control electrónico. Hoy en día, la electrónica digital ha permitido realizar mediciones mucho más precisas y exactas, ya que existen dispositivos electrónicos como microcontroladores PIC, conversores análogo-digitales que son capaces de interpretar dichas señales y sin perder su naturaleza, procesar datos digitales brindando a la ingeniería una herramienta práctica y confiable para su implementación. Con el objetivo de incorporar estos microcontroladores se pretende entregar un acondicionador de señal como una alternativa en esta área, donde en la presente investigación se desarrolla un prototipo con bases y fundamentos teóricos para diseñar obtener un resultado óptimo y rentable en la presentación de este producto. Al aplicar una metodología para el desarrollo de un producto se orienta a un enfoque cuantitativo, para evaluar los resultados y la rentabilidad de este con respecto a la respuesta del algoritmo matemático lineal, diseñado para la lectura de valores análogos y la interpretación de estos. Se implementaron los sistemas mecatrónicos integrándose por partes y analizando cada uno de los componentes de la metodología, obteniendo como resultado con base a las pruebas experimentales a las que la metodología expone, del 99.98% de precisión en las lecturas de masa registradas.

Palabras clave: Instrumentación industrial, sistema de pesaje, acondicionador de señal, algoritmo matemático lineal, porcentaje de precisión%.

ABSTRACT

Industrial instrumentation has been a mainstay of modern control engineering, this hand in hand with metrology, can obtain information in a standard way for decision making in complex industrial processes. Industrial weighing was a mechanism that allowed, with a reference to mechanical balance, to know the weight of an unknown body, where these do not include electronic control. Today, digital electronics has allowed much more precise and accurate measurements to be made, since there are electronic devices such as PIC microcontrollers, analog-digital converters that are signal interpreter sensors and without loss of their nature, digital data providing engineering A practical and reliable tool for its implementation. With the aim of incorporating these microcontrollers, it is intended to deliver a signal conditioner as an alternative in this area, where in this research a prototype with theoretical bases and foundations will be developed to obtain an optimal and profitable result in the presentation of this product. When applying a methodology for the development of a product, it is oriented to a quantitative approach, to evaluate the results and its profitability with respect to the response of the linear mathematical algorithm, designed for the reading of analog values and the interpretation of these. The mechatronic systems were implemented integrating by parts and analyzing each one of the components of the methodology, obtaining as a result based on the experimental tests the exponential methodology, 99.98% accuracy in the recorded mass readings.

Key words: *Industrial instrumentation, weighing system, signal conditioner, linear mathematical algorithm, percentage of precision%.*

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | |
|---|-----|
| Glosario..... | xix |
| Capítulo I. Introducción | 1 |
| Capítulo II. Planteamiento del Problema | 2 |
| 2.1 Precedentes del Problema..... | 2 |
| 2.2 Definición del Problema | 3 |
| 2.3 Justificación | 3 |
| 2.4 Preguntas de Investigación | 3 |
| 2.5 Objetivos..... | 4 |
| 2.5.1 Objetivo General..... | 4 |
| 2.5.2 Objetivos Específicos | 4 |
| Capítulo III. Marco Teórico | 5 |
| 3.1 Instrumentación Industrial..... | 5 |
| 3.1.1 Metrología | 5 |
| 3.1.1.1 Trazabilidad | 6 |
| 3.1.1.2 Calibración | 7 |
| 3.1.1.3 Incertidumbre en la Medida..... | 7 |
| 3.1.1.4 Exactitud | 8 |
| 3.1.1.5 Precisión..... | 8 |
| 3.1.1.6 Sensibilidad | 9 |
| 3.1.1.7 Repetibilidad..... | 9 |
| 3.1.1.8 Resolución..... | 9 |
| 3.1.1.9 Histéresis | 10 |

| | |
|--|----|
| 3.1.1.10 Excentricidad | 10 |
| 3.1.1.11 Linealidad..... | 10 |
| 3.1.1.12 El error..... | 11 |
| 3.2 Transductores | 12 |
| 3.2.1 Señales..... | 13 |
| 3.2.2 Puente de Wheatstone..... | 14 |
| 3.2.3 Amplificador Operacional | 15 |
| 3.2.3.1 Razón de rechazo en modo común | 18 |
| 3.2.3.2 Circuito Amplificador sin Realimentación..... | 19 |
| 3.2.3.3 Circuitos Amplificador con Realimentación Positiva..... | 19 |
| 3.2.3.4 Circuito Amplificador Con Realimentación negativa | 20 |
| 3.2.4 Filtración de señales y ruido | 21 |
| 3.3 Sensor para Celda de Carga..... | 22 |
| 3.3.1 Efecto Piezoeléctrico | 23 |
| 3.3.1.1 Galgas Extensiométricas..... | 23 |
| 3.3.1.2 Estructura de las Galgas Extensiométricas..... | 27 |
| 3.3.1.3 Deformaciones Mecánicas en las Galgas Extensiométricas | 28 |
| 3.4 Microcontrolador PIC..... | 29 |
| 3.4.1 Procesamiento de Señales Análogas | 29 |
| 3.4.1.1 Conversores de Señales | 30 |
| 3.5 Sistemas de Control Digital..... | 31 |
| 3.5.1 Planta de un Sistema | 32 |
| 3.5.2 Perturbaciones..... | 32 |

| | |
|--|----|
| 3.5.3 Modelado Matemático de los Sistemas de Control..... | 32 |
| 3.5.4 Función de Transferencia | 33 |
| 3.5.5 Control en Lazo Cerrado en Amplificadores Operacionales..... | 35 |
| 3.6 Descripción de la Metodología de Investigación..... | 36 |
| 3.6.1 Sistemas..... | 36 |
| Capítulo IV. Metodología..... | 39 |
| 4.1 Enfoque..... | 39 |
| 4.2 Variables de Investigación | 39 |
| 4.2.1 Variable Dependiente..... | 40 |
| 4.2.2 Variables Independientes..... | 40 |
| 4.4 Técnicas e Instrumentos Aplicados | 41 |
| 4.5 Materiales..... | 42 |
| 4.6 Metodología de Estudio | 42 |
| 4.6.1 Etapa Inicial: Requerimientos del Producto | 43 |
| 4.6.2 Ciclo A de la Metodología "V" | 44 |
| 4.6.2.1 Etapa I: Nivel de los Sistemas del Ciclo A | 44 |
| 4.6.2.2 Etapa II: Nivel de los Subsistemas del Ciclo A..... | 45 |
| 4.6.2.3 Etapa III: Realización de Parte del Ciclo A..... | 47 |
| 4.6.2.4 Etapa IV: Integración de Partes del Ciclo A..... | 48 |
| 4.6.2.5 Etapa V: Integración de los Subsistemas del Ciclo A..... | 49 |
| 4.6.2.6 Etapa VI: Integración de los Sistemas del Ciclo A..... | 50 |
| 4.6.2.7 Resultado del Prototipo Final del Ciclo A..... | 50 |
| 4.6.3 Ciclo B de la Metodología "V" | 51 |

| | |
|---|----|
| 4.6.3.1 Etapa I: Nivel de los Sistemas del Ciclo B..... | 51 |
| 4.6.3.2 Etapa II: Nivel de los Subsistemas del Ciclo B | 52 |
| 4.6.3.3 Etapa III: Realización de Partes del Ciclo B | 53 |
| 4.6.3.4 Etapa IV: Integración de Partes del Ciclo B | 54 |
| 4.6.3.5 Etapa V: Integración de los Subsistemas del Ciclo B | 55 |
| 4.6.3.6 Etapa VI: Integración de los Sistemas del Ciclo B..... | 56 |
| 4.6.3.7 Análisis de Riesgos Mecánicos..... | 56 |
| 4.6.3.8 Análisis de Riesgo Electrónico..... | 57 |
| 4.6.3.9 Análisis de Riesgo Informático..... | 57 |
| 4.6.3.10 Resultado del Producto: Final del Ciclo "B" | 57 |
| 4.7 Metodología de Validación..... | 57 |
| 4.8 Cronograma de Actividades..... | 57 |
| Capítulo V. Resultados y Análisis | 59 |
| 5.1 Análisis de Sustento del Marco Teórico..... | 59 |
| 5.2 Desarrollo Ciclo A: Sistema Mecánico..... | 59 |
| 5.2.1 Cálculos de Mecánica..... | 59 |
| 5.2.2 Diseño de Sistema de Control Mecánico..... | 60 |
| 5.2.3 Simulación de Esfuerzos en el Sistema Mecánico..... | 60 |
| 5.3 Desarrollo Ciclo A: Sistema Control Electrónico | 62 |
| 5.3.1 Pruebas experimentales y cálculos matemáticos | 62 |
| 5.3.2 Pruebas a nivel de simulador | 65 |
| 5.3.3 Diseño de Sistema de Control Electrónico..... | 67 |
| 5.4 Desarrollo Ciclo A: Sistema Informático | 70 |

| | |
|---|----|
| 5.4.1 Algoritmo para determinar valores digitales..... | 70 |
| 5.4.2 Análisis y Obtención de Ecuación Lineal..... | 73 |
| 5.5 Resultados del Ciclo A | 76 |
| 5.6 Desarrollo Ciclo B: Sistema Mecánico | 76 |
| 5.7 Desarrollo Ciclo B: Sistema de Control Electrónico..... | 79 |
| 5.8 Desarrollo Ciclo B: Sistema Informático | 83 |
| 5.8.1 Interpretación de Ecuación Lineal | 84 |
| 5.9 Resultados del Ciclo B..... | 87 |
| Capítulo VI. Conclusiones | 88 |
| Capítulo VII. Recomendaciones | 89 |
| Referencias Bibliográficas | 90 |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

| | |
|---|----|
| Ilustración 1-Modelo de gestión de calidad ISO 9000:2000 | 6 |
| Ilustración 2-Respuesta de la celda de carga..... | 11 |
| Ilustración 3-Diagrama de bloques del circuito | 13 |
| Ilustración 4-Puente de Wheatstone | 14 |
| Ilustración 5-Amplificador operacional | 15 |
| Ilustración 6-Equimment Circuit..... | 17 |
| Ilustración 7-Disposición interna básica de un amplificador operacional..... | 18 |
| Ilustración 8-Circuito amplificador sin realimentación..... | 19 |
| Ilustración 9-Circuito amplificador son realimentación positiva..... | 20 |
| Ilustración 10-Circuito amplificador con realimentación negativa | 21 |
| Ilustración 11-Filtro paso bajo para eliminar ruido proveniente de la celda de carga..... | 22 |
| Ilustración 12-Filtro paso bajo para eliminar ruido proveniente de la celda de carga..... | 24 |
| Ilustración 13-Dispositivo de medición de masas | 26 |
| Ilustración 14-Galga extensiométrica | 27 |
| Ilustración 15-Relación entre esfuerzos y deformaciones..... | 28 |
| Ilustración 16-Señales análoga, muestreada, cuantizada y digital..... | 30 |
| Ilustración 17-Procesamiento de señales análogas y digitales | 31 |
| Ilustración 18-Señales de entrada y salida en un sistema de muestreo y retención | 31 |
| Ilustración 19-Sistema eléctrico..... | 33 |
| Ilustración 20-Circuito con amplificador operacional..... | 34 |
| Ilustración 21-Diseño general con realimentación negativa | 35 |
| Ilustración 22-Amplificador operacional de entrada inversora con función de transferencia | 36 |

| | |
|--|----|
| Ilustración 23-Configuración de un sistema..... | 37 |
| Ilustración 24-Product development guideline for mechanical, electronic and IT product | 37 |
| Ilustración 25-Variable dependiente | 40 |
| Ilustración 26-Variables independientes..... | 41 |
| Ilustración 27-Hipótesis de investigación..... | 41 |
| Ilustración 28-Integración de la ingeniería mecatrónica | 43 |
| Ilustración 29-Etapa I del ciclo A..... | 44 |
| Ilustración 30-Etapa II del ciclo A..... | 45 |
| Ilustración 31-Etapa III del ciclo A | 47 |
| Ilustración 32-Etapa IV del ciclo A..... | 48 |
| Ilustración 33-Etapa V del ciclo A | 49 |
| Ilustración 34-Etapa VI del ciclo A..... | 50 |
| Ilustración 35-Etapa I del ciclo B | 51 |
| Ilustración 36-Etapa II del ciclo B..... | 52 |
| Ilustración 37-Etapa III del ciclo B..... | 53 |
| Ilustración 38-Etapa IV del ciclo B | 54 |
| Ilustración 39-Etapa V del ciclo B..... | 55 |
| Ilustración 40-Etapa VI del ciclo B | 56 |
| Ilustración 41-Cronograma de actividades | 58 |
| Ilustración 42-Análisis de Esfuerzos mecánicos sobre la plataforma..... | 61 |
| Ilustración 43-Análisis de esfuerzos mecánicos en la celda de carga..... | 61 |
| Ilustración 44-Dos etapas de amplificación | 65 |
| Ilustración 45-Integración de subsistemas electrónicos | 66 |

| | |
|---|----|
| Ilustración 46 – Diagrama de bloques del sistema simplificado..... | 69 |
| Ilustración 47-Respuesta natural en el sistema en el dominio del tiempo..... | 70 |
| Ilustración 48-Diagrama lógico de bloques básico para adquisición de señal..... | 71 |
| Ilustración 49-Diagrama lógico de bloques corrector de lectura..... | 72 |
| Ilustración 50-Algoritmo de muestra | 73 |
| Ilustración 51-Interpolación lineal..... | 74 |
| Ilustración 52-Análisis de esfuerzos sobre la plataforma de pesaje..... | 77 |
| Ilustración 53-Diseño del sistema mecánico con medidas en centímetros..... | 78 |
| Ilustración 54-Etapa diferencial | 79 |
| Ilustración 55-Etapa de filtrado eléctrico..... | 80 |
| Ilustración 56-Circuito acondicionador de señal | 81 |
| Ilustración 57-Integración de subsistemas electrónicos..... | 82 |
| Ilustración 58-Diseño de tarjeta electrónica..... | 83 |
| Ilustración 59-Integración de la ecuación lineal al algoritmo..... | 84 |
| Ilustración 60-Integración de la ecuación lineal al código..... | 85 |
| Ilustración 61-Respuesta lineal de la masa con respecto al voltaje..... | 86 |
| Ilustración 62-Relación entre el voltaje de salida del puente y la masa sobre la viga | 87 |
| Ilustración 63-Diseño del prototipo final..... | 87 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1-Factores de galgas comunes..... | 25 |
| Tabla 2-Voltaje proveniente de las galgas extensiométricas | 62 |
| Tabla 3-Voltaje proveniente de los amplificadores | 62 |
| Tabla 4-Resultados de calibración..... | 73 |
| Tabla 5-Muestras del algoritmo implementado | 86 |

ÍNDICE DE ECUACIONES

| | |
|--|----|
| Ecuación 1 – Coeficiente de determinación..... | 8 |
| Ecuación 2 - Sensibilidad electrónica..... | 9 |
| Ecuación 3 – Interpolación lineal..... | 11 |
| Ecuación 4-Porcentaje de error..... | 12 |
| Ecuación 5-Ganancia de voltaje en modo diferencial..... | 16 |
| Ecuación 6- Razón de Rechazo en modo común expresada en decibelios..... | 18 |
| Ecuación 7-Relación del cambio resistivo debido al alargamiento de un conductor..... | 23 |
| Ecuación 8-Constante de rigidez de Hooke..... | 26 |
| Ecuación 9-Fuerza debido a una carga puntual..... | 27 |
| Ecuación 10-Función de transferencia con impedancias..... | 36 |
| Ecuación 11-Media de la ley débil de los grandes números..... | 71 |
| Ecuación 12-Ley débil de los grandes números..... | 71 |
| Ecuación 13-Ecuación lineal para determinar masa..... | 75 |

GLOSARIO

Galga extensiométrica: Transductor de señal que convierte la magnitud física de fuerza a señal eléctrica transducible.

Efecto piezoresistivo: Fenómeno electromecánico que relaciona la deformación mecánica con variaciones en las propiedades eléctricas del material.

Transductor: Dispositivo que convierte una señal física a una señal eléctrica.

Acondicionador de señales: Es un conjunto de circuitos eléctricos que tienen como finalidad amplificar y mejorar la calidad de una señal pequeña de entrada.

Amplificador operacional: dispositivo electrónico que contiene en encapsulado una red de transistores y otros dispositivos que aumentan la calidad de la señal de entrada.

Microcontrolador: Dispositivo electrónico de control digital que, por medio de comandos de programación, ejecuta tareas complejas con periféricos conectados a él.

Convertor análogo-digital: sistema de conversión de señales continuas y variables en el tiempo a señales discretos de voltaje proporcionales.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

Desde el comienzo del estudio en el área de la física en los fenómenos eléctricos, han sido punto de enfoque el comportamiento y propiedades eléctricas de los materiales, es hasta que el científico y matemático William Thompson, descubre el fenómeno piezoeléctrico en algunos conductores, es que revoluciona la forma de medir la fuerza y convertirla a señales eléctricas. En la instrumentación industrial, los transductores son de mucha importancia puesto que para obtener la magnitud de una variable física es necesario convertir dicho fenómeno que rige el funcionamiento del sensor, a una señal medible por un conversor análogo-digital, que este caso utilizaremos el que contienen los microcontroladores. Se aprovecharán las señales que provee la celda de carga por medio de las galgas extensiométricas para filtrarla y amplificarla por etapas, para la obtención de una variable nítida de salida, entre los rangos de voltaje establecidos.

Esta investigación está destinada a diseñar e implementar un transductor que sea capaz de ser conectado a los microcontroladores PIC, de esta forma proporcionará un método fácil de adquisición de datos para utilizarlos con los conversores análogos-digitales, ampliando el uso en diferentes aplicaciones en el campo de la ingeniería.

CAPÍTULO II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En este capítulo, se dan a conocer los precedentes y la definición del problema de investigación, al cual se pretende desarrollar una solución práctica, realizando un análisis profundo de este.

2.1 PRECEDENTES DEL PROBLEMA

La energía que se encuentra en la naturaleza ha sido motivo de estudio desde el siglo XVII por científicos como Alejandro Volta, Benjamín Franklin, Michael Faraday entre otros, donde suponían manipular estas energías para convertirlas en otras formas aprovechables de la misma. De esta manera los sensores y transductores tienen la tarea de convertir variables físicas a variables eléctricas, visto de otra manera Pallás Areny (2007) afirma: "Esto significa que la señal de entrada es siempre una energía o potencia, pero al medir, una de las componentes de la señal suele ser tan pequeña que puede despreciarse y se interpreta que se mide solo la otra componente" (p. 2). La transducción de señales percibidas por magnitudes físicas, como ser la fuerza o presión, permiten manipular procesos industriales para la automatización, en donde un sistema puede interpretar dichas magnitudes para la toma de decisiones en los microcontroladores. Los transductores de señales son de mucha utilidad en sistemas de control, lo que hace importante la implementación en el desarrollo de nuevos procesos industriales, dicho esto sirven para cuantificar magnitudes no tangibles en posteriores aplicaciones. En el campo de la metrología e instrumentación pueden resolver el problema en la adquisición de información proveniente de una variable física desconocida, proporcionando objetividad, precisión y buena resolución de los datos de salida, para ser procesados por un microcontrolador, dando confiabilidad a los ingenieros en los rigurosos controles de calidad en los procesos de manufactura.

Artero *et al.* (2012) desarrollaron un dispositivo que transduce las variaciones resistivas del sensor de temperatura, utilizando un sensor de coeficiente negativo de temperatura, conocido como ntc, comprendidas como cambios de voltajes interpolados de 0 a 5 voltios, es decir forma linealizada.

2.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El acondicionamiento de señales es de vital importancia para que los microcontroladores puedan adquirir valores de voltaje necesarios para los conversores análogo-digitales integrados en estos, sin embargo, comercialmente existen controladores de muy compleja utilización, limitando el uso en variadas aplicaciones que conlleva la obtención de magnitudes físicas, proporcionadas por el sensor de celda de carga, siendo vulnerable a la compatibilidad de la mayoría de los microcontroladores PIC.

2.3 JUSTIFICACIÓN

Los acondicionadores de señal son de crucial importancia entre las galgas extensiométricas de las celdas de carga y los microcontroladores PIC, pues convierten las variables de entrada físicas a variables de salida análogas para ser procesadas por el microcontrolador PIC, ya que estos poseen una compleja forma de operar. Asimismo, Pallás Areny (2007) Asegura que los acondicionadores de señal son en realidad una interfaz que muy a menudo son un conjunto de dispositivos electrónicos capaces de modificar las señales, pudiendo incluso cambiar el dominio de los datos que se están trabajando, haciendo énfasis en que su naturaleza sigue siendo la misma. Hoy en día, la instrumentación y metrología es altamente demandada en los procesos de manufactura, por lo cual la certeza y confiabilidad de estos dispositivos debe ser respaldada, exponiendo la problemática, Phellan & Kevin (2019) afirman que "La exigencia de medir señales muy pequeñas ha llevado a implementar un buen sistema de amplificación para este tipo de señales" (p.3).

2.4 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

- 1) ¿Será posible que el acondicionador de señal entregue los rangos de voltaje permisibles?
- 2) ¿Con que sensores será compatible el acondicionador de señal?
- 3) ¿Qué precisión podría tener la señal de salida entregada por el transductor?
- 4) ¿Qué margen de error será permitido por perturbaciones en las lecturas de señales?

2.5 OBJETIVOS

2.5.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar un circuito acondicionador de señales, preciso y de alta resolución, para que las celdas de carga se puedan utilizar en los microcontroladores y de esta forma pueda mostrar la información de la variable eléctrica como función de una variable física.

2.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1) Diseñar acondicionador de señal para que puede entregar los rangos de voltaje.
- 2) Identificar los sensores compatibles con el acondicionador de señal.
- 3) Diseñar un circuito amplificador de señal que precise la lectura de medición.
- 4) Reducir los márgenes de error producidos por perturbaciones.

CAPÍTULO III. MARCO TEÓRICO

Para el desarrollo de sistemas compactos y funcionales en la ingeniería, se requiere medir las magnitudes físicas que forman parte de los procesos modernos de control y automatización hoy en día, por ello es importante realizar estudios que aporten confiabilidad a las complejas tareas que se demandan en la industria.

3.1 INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL

Los métodos utilizados con dispositivos de instrumentación en el campo industrial deben de ser estándares regidos por los principios de la mecánica. Esto hace referencia a las unidades de medición de variables como ser la masa, peso, la densidad, entre otras. Cuando comenzaba la era industrial se hacía uso de sensores simples, es decir eran funcionales gracias a los descubrimientos y aporte de la física, lo cual los hacía análogos y eran de fácil utilización. En el trayecto de la historia y revolución de máquinas autónomas se fue presentando la necesidad de volver automático cada proceso, lo cual comenzaba a quitar esa simplicidad de los instrumentos de medición, pues requiere la implementación de control electrónico. Todo esto surge por la necesidad de mejorar la calidad de un producto o establecer estándares de calidad rigurosos (Creus Solé, 2011).

En las industrias se han expandido las investigaciones en la implementación de sensores como una fuerte influencia sobre procesos adyacentes, pues la amplia gama de aplicaciones ha exigido la medición de variables del entorno para darles funcionalidad y factibilidad en la automatización de procesos, permitiendo así aumentar la productividad, haciéndola una herramienta fundamental para el desarrollo (Vargas & Jaramillo, 2018).

3.1.1 METROLOGÍA

La metrología es la ciencia que va de la mano con la instrumentación industrial, pues los científicos y empresas a fines han dedicado años de estudio con los fundamentos de la mecánica, para establecer valores permisibles de error e intentar hacer lo más preciso posible la toma de variables como las medidas y pesos. Es importante considerar las normativas de la metrología dentro de la investigación, pues dentro de la fabricación de productos se exige un control para

obtener resultados que sean óptimos de calidad. Podemos apreciar cómo influye la medición en el proceso de fabricación industrial; aplicamos un modelo ISO para gestionar la calidad del producto final (Creus, 2009).

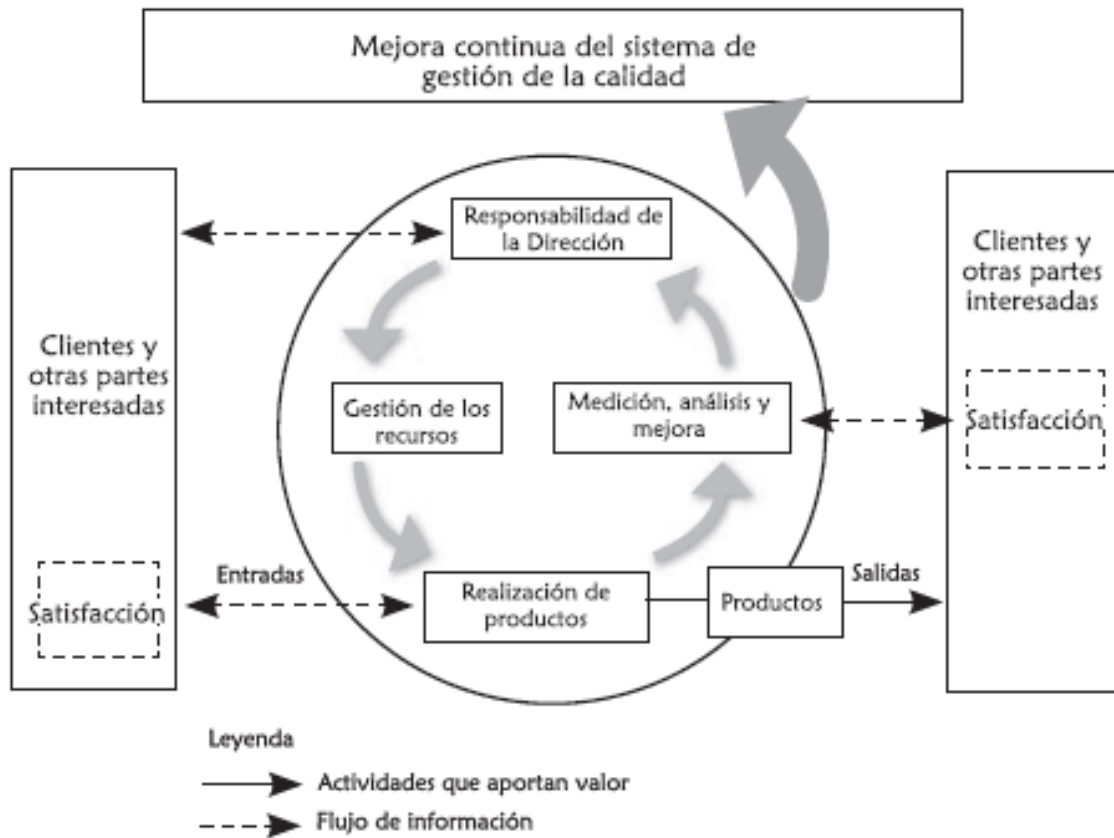


Ilustración 1-Modelo de gestión de calidad ISO 9000:2000

Fuente: (Creus, 2009)

3.1.1.1 Trazabilidad

La trazabilidad es una forma concreta de generalizar una medición de peso o longitud, y va asociado con el procesamiento de señales y las magnitudes que se procesan en el mismo.

Creus (2009) afirma:

Medir “bien” no es solo medir con cuidado, o utilizando el procedimiento y los instrumentos adecuados, sino que además las unidades de medida deben ser equivalentes, de tal modo que 1 cm sea lo mismo en cualquier país del mundo. La

infraestructura metrológica de cada país debe ser compatible y estar ligada a las infraestructuras metrológicas de otros países, y para ello cada país debe disponer de laboratorios donde se puedan calibrar los instrumentos de medición. La compatibilidad entre países se asegura mediante comparaciones periódicas de los patrones de medida. Todo este proceso se llama trazabilidad. (p.2)

Dicho esto, este aclarado que se debe de considerar la trazabilidad para el diseño de un acondicionador de señal, con base a lo mencionado, debe de ver reflejados valores que cumplan las normativas ISO.

3.1.1.2 Calibración

En la mayoría de las ocasiones, cuando se es requerido tomar una medida, se debe asegurar que lo que se está midiendo sea comparable con un valor real, de esta forma se podrá tomar ese dato para compararlo con dicho valor mencionado, exponiendo el concepto de una forma más formal, Creus (2009) afirma: "Dentro de la metrología se sitúa la calibración. Calibración es simplemente el procedimiento de comparación entre lo que indica un instrumento y lo que "debiera indicar" de acuerdo con un patrón de referencia con valor conocido" (p. 2). Como se dijo anteriormente debe de coincidir con la referencia para que pueda ser validado el resultado.

3.1.1.3 Incertidumbre en la Medida

La incertidumbre es una de las características al terminar de realizar una calibración, pues previamente comparado, ese valor podría incluso tener error, y es posible encontrarlo dentro de los rangos que establece la empresa fabricante del instrumento, como resultado pueden haber varias respuestas que muestren una pequeña desviación dando lugar a la incertidumbre de la medición; aquí pues es donde comienza el proceso estadístico, para lograr ubicar todos los puntos dispersados del posible error, tras haberse realizado una cierta cantidad de pruebas (Creus Solé, 2011). La incertidumbre en la medida tomada no puede ser anulada pues existen variables, como la presión, la temperatura, vibraciones, entre otras, que en mínimas proporciones afectan de modo inevitable.

3.1.1.4 Exactitud

La exactitud se define de una manera más puntual, Creus Solé (2011) expone: "La *exactitud* (*accuracy*) es la cualidad de un instrumento de medida por la que depende a dar lecturas próximas al valor verdadero de la magnitud medida" (p.14). Esto ha de depender del criterio de los ingenieros encargados de utilizar los instrumentos de medición, pues en realidad son valores que son aceptados por estar muy cerca del valor ideal.

3.1.1.5 Precisión

La precisión es una característica que debe de tener la mayoría de los instrumentos de medición pues es la cercanía de los valores medidos con el valor real, a diferencia de la exactitud, un instrumento de medición puede llegar a ser preciso, pero no exacto (Creus, 2009). Esto permite que las mediciones rodeen el valor correcto sin tocarlo, que es lo que se busca en estos. Por este motivo los acondicionadores de señal deben de ser correctamente acoplados para acercarse más a la curva de linealidad respecto a la del error. Una forma sugerida para el cálculo de la precisión es determinarlo mediante un concepto estadístico que formula un valor conocido como coeficiente de determinación, éste indica o predice la precisión referente a la interpolación lineal, que se presenta en la ecuación 1.

$$R^2 = \frac{\sum_{t=1}^T (\hat{Y} - \bar{Y})^2}{\sum_{t=1}^T (Y - \bar{Y})^2}$$

Ecuación 1 – Coeficiente de determinación

Este valor también llamado "R cuadrado", está dentro del rango de 0 a 1, entre más cerca de 1 este, determina el porcentaje de precisión que puede llegar a tener. El numerador de esta ecuación representa la varianza, que está formada por la resta de un valor cercano al real \hat{Y} , y la media de esos valores \bar{Y} elevados al cuadrado entre la desviación típica, que a diferencia de la varianza no se dividen entre T la sumatoria de sus valores. Esta razón determina que tan preciso y exacto es la respuesta en la recta.

3.1.1.6 Sensibilidad

La sensibilidad son los cambios que presenta la señal de salida y el incremento de la variable que está perturbando aun cuando alcanzo el estado de balance, esto puede estar relacionado con las vibraciones, inestabilidad en las lecturas que entrega el acondicionador de señal. Va muy relacionado con la percepción del transductor a las señales mínimas presentes en la mayoría de los sistemas. Puede traer ventajas cuando se requiere obtener hasta la lectura más pequeña de un medio, pero puede llegar a ser una vil desventaja cuando no llegue a ser estable, regresando al concepto de incertidumbre y dejando más a la estadística la aproximación (Creus Solé, 2011). La ecuación de la sensibilidad está descrita con la ecuación 2.

$$\text{Sensibilidad} = \frac{\text{Tensión de salida}}{\text{Tensión de alimentación}}$$

Ecuación 2 - Sensibilidad electrónica

3.1.1.7 Repetibilidad

En los instrumentos de medición como las basculas o balanzas digitales, es muy importante acertar con los valores reales, en esta circunstancia la sensibilidad está muy asociada al termina repetibilidad pues sí, un instrumento mide repetidas veces el mismo valor recorriendo el mismo trayecto quiere decir que llega a ser más preciso, haciendo que la concentración de valores de dispersión esté más adecuados a la linealidad. Es posible que este factor esté relacionado con las propiedades mecánicas y el desgaste de las partes del transductor, puesto que con el tiempo podría descalibrarse y generar una reacción en cadena de errores, generando lecturas desproporcionadas (Creus Solé, 2011).

3.1.1.8 Resolución

Creus (2009) nos explica: "Magnitud de los cambios en escalón de la señal de salida (expresados en tanto por ciento de la salida de toda la escala) al ir variando continuamente la medida en todo el campo." (p.33).

Esto nos indica que a medida la variable de entrada cambia de estado o transite, los valores de voltaje van a ser muy aproximados a un valor de salida acertado, en otras palabras, llevará una tendencia a ser análogo sin perder en el procesamiento de alguna señal que pueda volver

imprecisa la lectura. Esto ayuda a mostrar valores decimales a la derecha, al perder o no poder mostrar tal aproximación se podría decir que el instrumento tiene baja resolución.

3.1.1.9 Histéresis

Hemos de analizar este fenómeno característico de los transductores, existe una relación importante a tomar en cuenta para el diseño de un acondicionador de señal funcional, como lo es la histéresis.

Creus Solé (2011) nos plantea que es la diferencia que se puede observar que son tomados de la variable de entrada que tienden a incrementar en ambas direcciones proporcionando un mínimo error en la lectura de instrumentación, por encima del valor y por debajo. Esto se relaciona con la posible situación que existe una transición entre una lectura y otra, por esa razón muchos fabricantes recomiendan establecer tiempos de medida distanciados para reducir este posible efecto no duradero en el dispositivo.

3.1.1.10 Excentricidad

Este concepto está relacionado con el posicionamiento de las masas fuera de su centro geométrico, es decir que no se colocan sobre el área correcta de distribución perfecta. Esto afecta directamente las lecturas, pues no recae todo el peso sobre el área del sensor.

3.1.1.11 Linealidad

Creus (2009) denota que:

“La aproximación de una curva de calibración a una línea recta especificada. Se expresa en forma de desviación máxima con relación a una línea recta que pasa a través de los puntos dados correspondientes a 0% y a 100% de la variable medida” (p. 32).

Con tal afirmación es práctico comprender que se define como la proporcionalidad de una escala de valores de entrada respecto a los de salida, generando una facilidad de lectura e interpretación. Según un estudio realizado recientemente, los resultados demuestran que la linealidad se puede conseguir con un acondicionamiento de señal ajustado, previo a las pruebas que se han de efectuar.

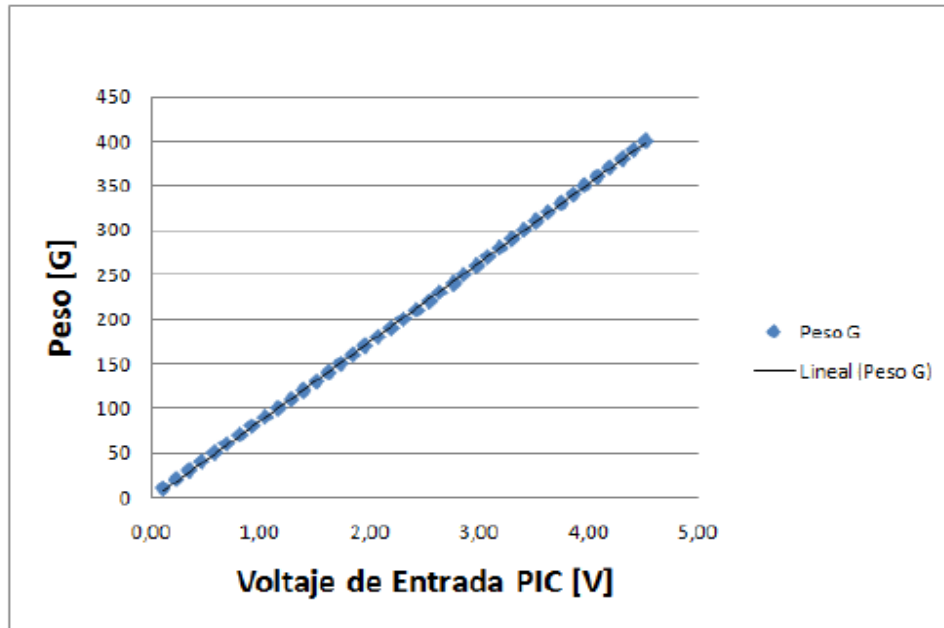


Ilustración 2-Respuesta de la celda de carga

Fuente: (E. J. Rodríguez *et al.*, 2007)

El establecer una ecuación lineal general que responda a los valores con el mínimo error utiliza la interpolación lineal con el concepto, donde generaliza la función para cualquier gráfico lineal con pendiente, observar ecuación 3:

$$y = \frac{(x - x_1)}{(x_2 - x_1)}(y_2 - y_1) + y_1$$

Ecuación 3 – Interpolación lineal

3.1.1.12 El error

Cuando se utilizan instrumentos de medición es inherente que existan errores debido a las condiciones mecánicas, eléctricas o ambientales, la mayoría de los fabricantes optan por establecer un margen de error en porcentaje, garantizando que las lecturas a pesar de estos se mantendrán dentro del rango permitido para las lecturas, dando confiabilidad a los ingenieros para respaldar datos (Cooper & Helfrick, 1991). Para obtener estos datos se sugiere utilizar la ecuación 3. Para Obtener el porcentaje de la magnitud de error calculada se requiere utilizar la ecuación 42.

$$\% \text{ error} = \frac{|Valor \text{ medido} - Valor \text{ real}|}{Valor \text{ real}} \times 100$$

Ecuación 4- Porcentaje de error

3.2 TRANSDUCTORES

Cuando se trabaja con sensores es necesario amplificar los voltajes de entrada con dispositivos de alta ganancia, para ello definiremos los transductores como el dispositivo electrónico que tiene la labor importante de intensificar las señales provenientes del sensor pasando un filtrado y amplificado, para entregar valores de voltaje permisibles en los microcontroladores.

Esto permite el posterior procesamiento de señal, estos son conocidos como acondicionadores de señal, pues adecuan la información; cabe resaltar que estos valores serán proporcionales al cambio en la variable física, volviendo más complejo el proceso de adquisición de datos, por ello son de importancia en la instrumentación industrial. Los pequeños valores de voltajes producido por los sensores realzan la necesidad de procesar esa señal de modo que pueda ser interpretada por el conversor análogo digital que posee un microcontrolador internamente. Pallás Areny (2007) nos expone como en algunos sensores simples se pueden considerar los errores y aprovechar esas pequeñas variaciones que deben de tenerse muy presentes para diseñar un acondicionador de señal adecuado a la aplicación futura, en sensores que pueden presentar un mayor nivel de complejidad (p.99). En importantes investigaciones Otero Valladares (2007) nos hace mención de que los sensores llegan a producir diferencias de voltajes tan pequeñas que es requerido el uso de amplificadores diferenciales, que permiten una mayor captación de valores análogos proporcionales, permitiendo presentar una mayor pureza en la señal producida inicialmente (p.1).

Alvarado de Chumen & Chinchay Ulloa (1993) menciona que los transductores en esencia son un conjunto de componentes electrónicos que permiten filtrar las señales, posteriormente amplificar la señal por medio de amplificadores operacionales que tienen usualmente una alta ganancia y finalmente hacer un muestreo de la señal, este es procesado por un convertidor análogo digital, que hace posible la visualización de la información adquirida, a partir de un fenómeno físico. Para lograr adecuar la señal, el acondicionador debe seguir unos parámetros y una secuencia lógica para su procesamiento, dicho esto se aprecia el diagrama de bloques en la ilustración 3.

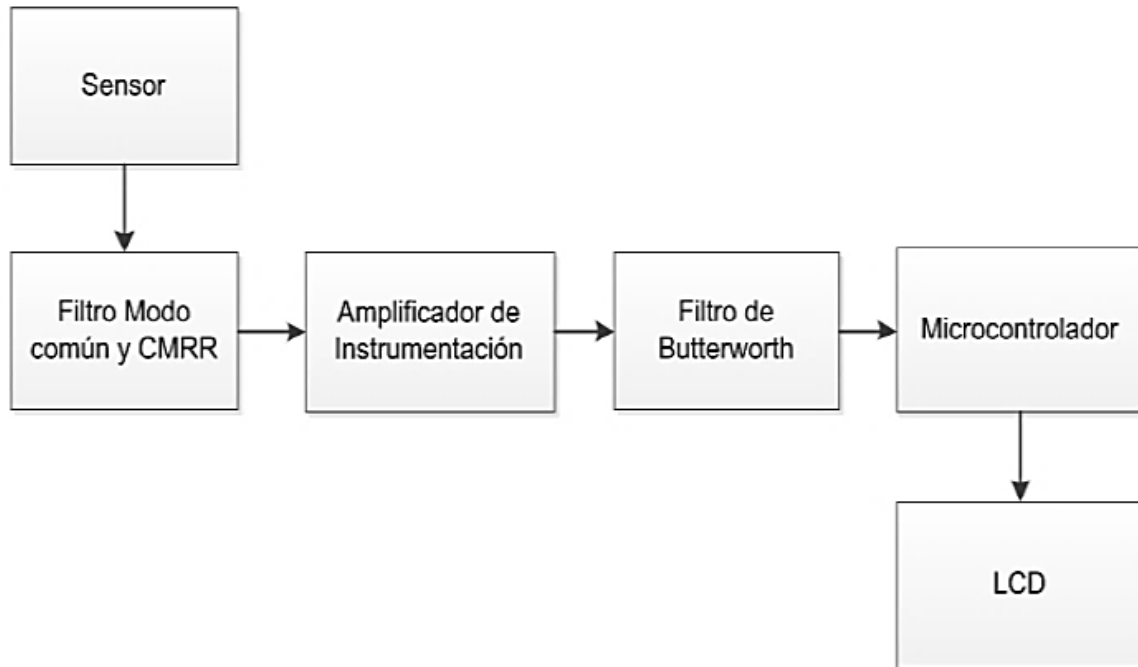


Ilustración 3-Diagrama de bloques del circuito

Fuente: (Tello *et al.*, 2012)

3.2.1 SEÑALES

Para percibir el entorno que nos rodea, a diario estamos conectados con formas de energía, como un descenso en la temperatura ambiental, un movimiento telúrico, diferencias de presión, el sonido entre otras. Inconscientemente nuestro cerebro detecta estas señales y las procesa; análogamente se puede decir que el procesamiento de señales está íntimamente asociado con la captación de estas, que son muy pequeñas, y un microcontrolador tiene la tarea de presentar dicha información.

Para que la información sea procesada, debe de haber un dispositivo que realice esa tarea, utilizando un circuito que haya sido diseñado para poder ejecutar esa labor, en general son microcomputadoras digitales, también conocidas como conversores análogos a digital. Se menciona que no han sido muchas tecnologías que hayan progresado utilizando estos métodos, poniendo como ejemplo que la música antes utilizaba un medio puramente análogo, en diferencia hoy en día, que ocupa un conversor análogo a digital para poder reproducirla. (Ambardar, 2002)

3.2.2 PUENTE DE WHEATSTONE

Aplicar la teoría de los circuitos eléctricos es fundamental para lograr una correcta y funcional adquisición de voltajes. El puente de Wheatstone lo definiremos como un divisor de tensión sujeto a diferencias de voltaje por cambios resistivos. Más que una definición, es un método para lograr balancear los pequeños cambios de voltaje presentes. Aclarando el concepto Pallás Areny (2007) afirma: que “requiere un sistema de realimentación bien eléctrico bien mediante un operario, para realizar el ajuste necesario de la resistencia calibrada hasta que, por el galvanómetro, u otro detector de desequilibrio, no circule corriente alguna” (p. 114). Esto implica que cualquier sensor conectado a él, en el estado de reposo su diferencia de potencial debe de ser nula, posteriormente a ello brindara un voltaje proporcional al cambio resistivo. Este puente está formado por cuatro resistencias que poseen un valor igual exacto, pueden ser tres resistores de valores fijos y uno variable o los cuatro resistores pueden ser variables.

Para comprender como este proceso de acondicionamiento, comienza, extendemos el concepto por medio de la siguiente representación de un puente de Wheatstone, Donde apreciamos una fuente de excitación primaria “E” y los cuatro resistores en serie-paralelo, tomando como señal de salida “U” que es el divisor de tensión, como se presenta en la ilustración 4.

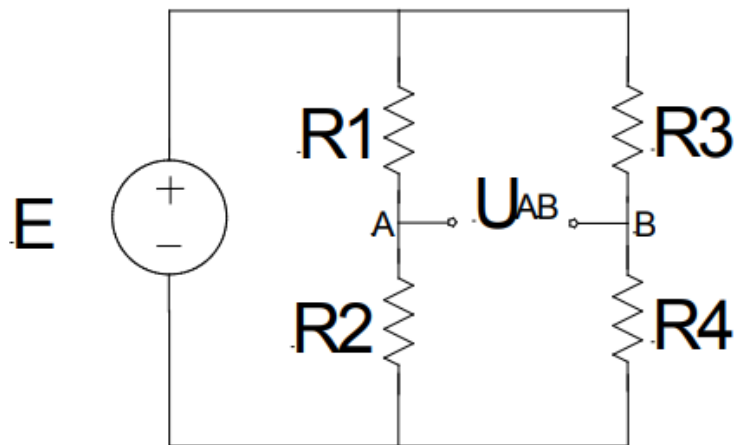


Ilustración 4-Puente de Wheatstone

Fuente: (Morcelle del Valle, 2018)

En este tipo de puente, en lugar de utilizarse una o dos resistencias variables se utilizan cuatro, que en este caso son galgas extensiométricas. Realizando un análisis más profundo es posible

obtener una mayor proporcionalidad o linealidad con respecto a las variaciones de voltaje que se presenten en el divisor. En las aplicaciones utilizando sensores resistivos Pallás Areny (2007) nos confirma que utilizando este tipo de sensores resistivos como las galgas extensiométricas al ser conectadas en circuitos dobles, es decir que las cuatro resistencias sean variables, permite que las celdas de carga montadas como vigas en voladizo, aumenten la precisión y la sensibilidad al ser estas deformadas, teniendo finalmente un valor muy lineal en comparación a las que son conectadas con una o dos resistencias variables.

3.2.3 AMPLIFICADOR OPERACIONAL

Los amplificadores operacionales o AO son una red de micro transistores, capaces de retomar valores con ganancias de voltajes muy altos, comparados a su entrada. Vienen encapsulados para la optimización de espacio y con pines que permiten la interconexión de otros dispositivos auxiliares, como ser resistencias, capacitores, diodos de rectificación Zener, varistores, entre otros. Estos dispositivos son capaces de tomar valores muy pequeños de voltaje y amplificarlos con altas ganancias de voltaje. Es posible apreciar la estructura interna de un amplificador operacional para poder encontrar funcionalidad, ver ilustración 5.

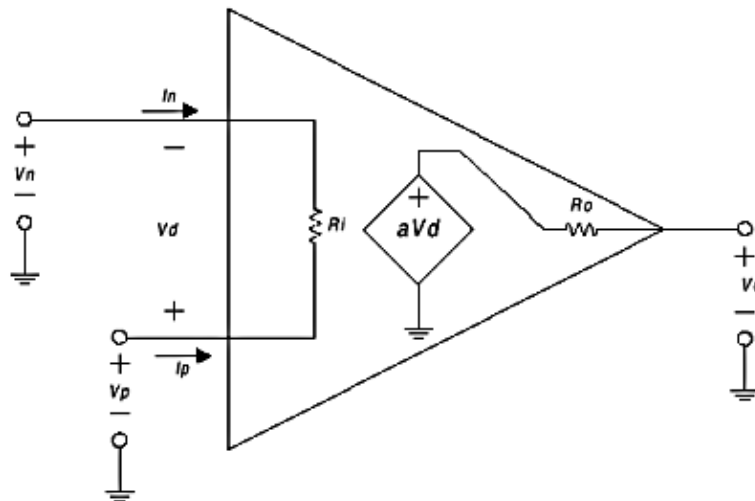


Ilustración 5-Amplificador operacional

Fuente: (Henao *et al.*, 2009)

La ganancia general de voltaje en los amplificadores operacionales, siguiendo las consideraciones de alta impedancia en la entrada, se representa en una configuración diferencial, como se muestra en la ecuación 5.

$$A = \frac{V_n - V_p}{V_o} \times 100$$

Ecuación 5-Ganancia de voltaje en modo diferencial

En la ilustración se muestra una resistencia "Ri" la cual, con fines ideales, se considera una impedancia tan alta que llega a comportarse como un circuito abierto, por lo tanto "In" y "Ip" son nulas, mientras tanto en la salida la impedancia es muy baja permitiendo la circulación de una corriente que depende de una ganancia "a", finalmente obteniendo un voltaje de salida amplificado.

Hayt *et al.* (2012) nos explica como en las terminales de entrada llega a circular una corriente tan pequeña en el orden de 40 femtoamperes, esto permite realizar cálculos de manera ideal, es decir despreciando tan pequeña corriente de entrada, mencionando que aun los voltajes son tan pequeños que, si llegáramos a efectuar cálculos, estos no podrían afectar.

El amplificador operacional está compuesto por varias etapas, la primera posee dos terminales de entrada: La entrada inversora y la no inversora, La etapa de salida tiene una terminal de salida, contiene internamente la etapa intermedia, que es donde la red de transistores, resistores y capacitores amplifica las señales. Físicamente el componente está conformado por dos pines de alimentación bipolar, pero estos pines son omitidos en el cableado lógico puesto que se asume que debe poseerla, además simplifica las interconexiones y la parte visual es más cómoda (Coughlin & Driscoll, 1999). La importancia del uso de estos dispositivos para el acondicionamiento de señales se debe a su alta ganancia de voltaje, se es requerido para tomar esas pequeñas diferencias de tensión y lograr medirlas posteriormente para su calibración, por medio de osciloscopio o voltímetros de alta precisión. A continuación, revisaremos cuan extensa es la red de transistores en amplificadores operacionales de propósito general. En la ilustración 6, se puede apreciar un canal amplificador por etapas, conformado por 13 transistores de junta bipolares, 1 capacitor filtrador y una resistencia.

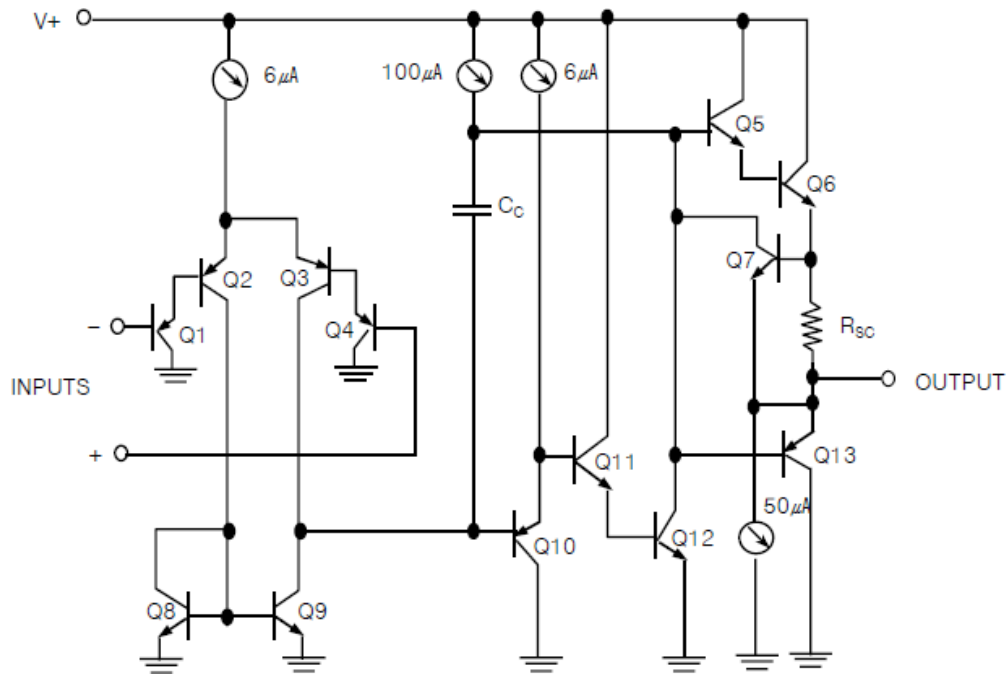


Ilustración 6-Equimment Circuit

Fuente: (HTC, 2008)

Se ha descrito al amplificador operacional como un solo dispositivo, encapsulado como circuito integrado; a pesar de todas las características buenas que presente, estos componentes no han podido ser fabricados con funcionalidad ideal y no pueden ser tratados como tal en el trabajo de campo sin embargo, para su estudio han de ser visto como ideales; la característica indispensable es que la impedancia de entrada de estos es muy alta, anulando la circulación de corriente por la entrada, comportándose como un circuito abierto, a lo contrario en la salida su impedancia es bien baja y permite la circulación de corriente generando una caída de tensión que es medible (Floyd, 2008). Esto es posible con la configuración que estos dispositivos poseen internamente, para ello daremos un vistazo a su diagrama de bloques que se muestra en la ilustración 7.

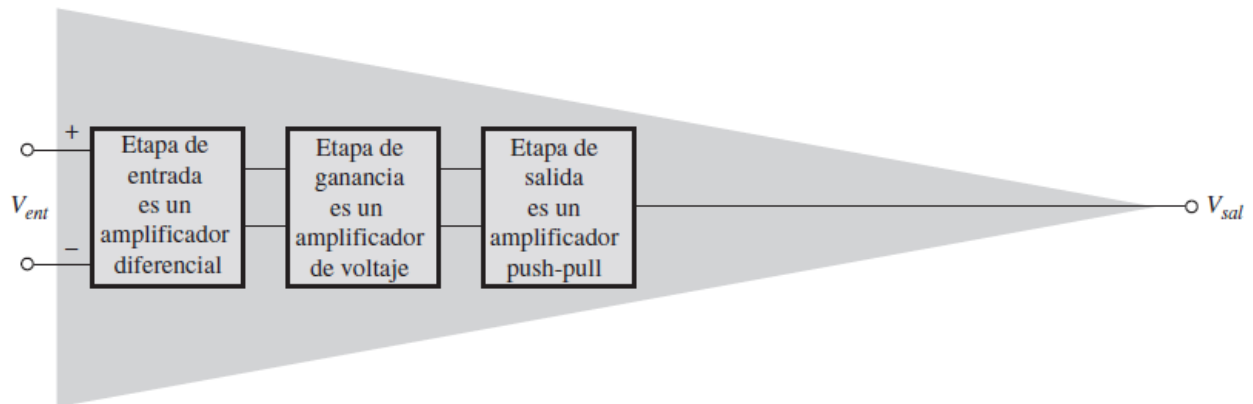


Ilustración 7-Disposición interna básica de un amplificador operacional

Fuente: (Floyd, 2008)

3.2.3.1 Razón de rechazo en modo común

La razón de rechazo en modo común o CMRR es definido en general, como la capacidad que tienen los amplificadores operacionales de rechazar todas esas señales provenientes de la etapa de entrada que están presentes en las variaciones en forma de ruido eléctrico, estas juegan un papel importante para considerar en los diseños de acondicionadores de señal. Por ello debe realizarse un análisis de las señales de entrada y comprenderlas para que posteriormente no se obtengan mediciones indeseables en la salida, evitando. A pesar de esto los amplificadores operacionales al ser conectados en modo diferencial presentan una alta ganancia, y se debe tener presente que entre más alto sea si la razón de rechazo en modo común se estará reduciendo esos errores en las lecturas de voltaje. (Floyd, 2008)

La razón de rechazo en modo común se expresa como la razón entre la ganancia en lazo abierto, entre la ganancia de modo común, como se detalla en la ecuación 6.

$$CMMR = 20 \log_{10} \frac{A_{ol}}{A_{cm}}$$

Ecuación 6- Razón de Rechazo en modo común expresada en decibeles

Dónde:

A_{lo} es la ganancia en lazo abierto.

A_{cm} Es la ganancia en modo común.

3.2.3.2 Circuito Amplificador sin Realimentación

Los amplificadores operacionales pueden conectarse de diferentes formas dependiendo la aplicación, una de las formas más convencionales de conectar estos dispositivos, es en modo comparativo, también conocido como circuito de lazo abierto, esto debido a que no compara ningún valor de la salida en la entrada, haciendo que el amplificador tenga ganancias de voltaje muy altas, respecto al valor de entrada. (Pertence Junior, 1991)

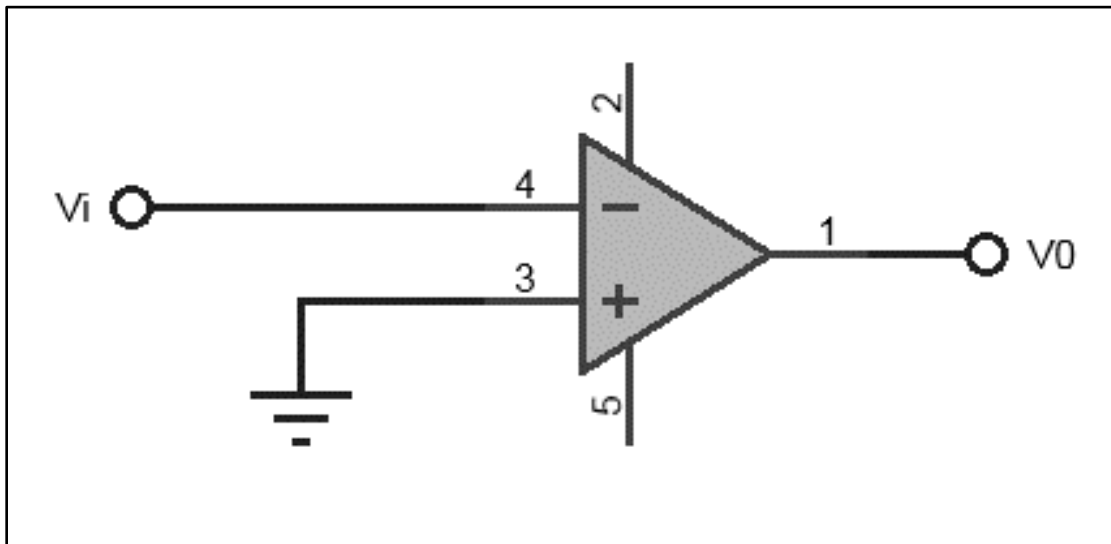


Ilustración 8-Circuito amplificador sin realimentación

Fuente: (Pertence Junior, 1991)

3.2.3.3 Circuitos Amplificador con Realimentación Positiva

Este tipo de configuración posee la característica de estar conectada a la terminal positiva, y funciona para realimentar la entrada con señal proveniente de la salida. Esto tiene una desventaja de desestabilizar los valores mismos ya que está continuamente desviando el error. A pesar de esto, son muy utilizados en los circuitos osciladores para generar ondas y amplificar las pequeñas entradas correspondientes; es apropiado mencionar que esta configuración del circuito genera un voltaje de salida positivo, es decir no invierte su polaridad (Pertence Junior, 1991). Se aprecia la conexión que presta el circuito amplificador con realimentación negativa en la ilustración 9.

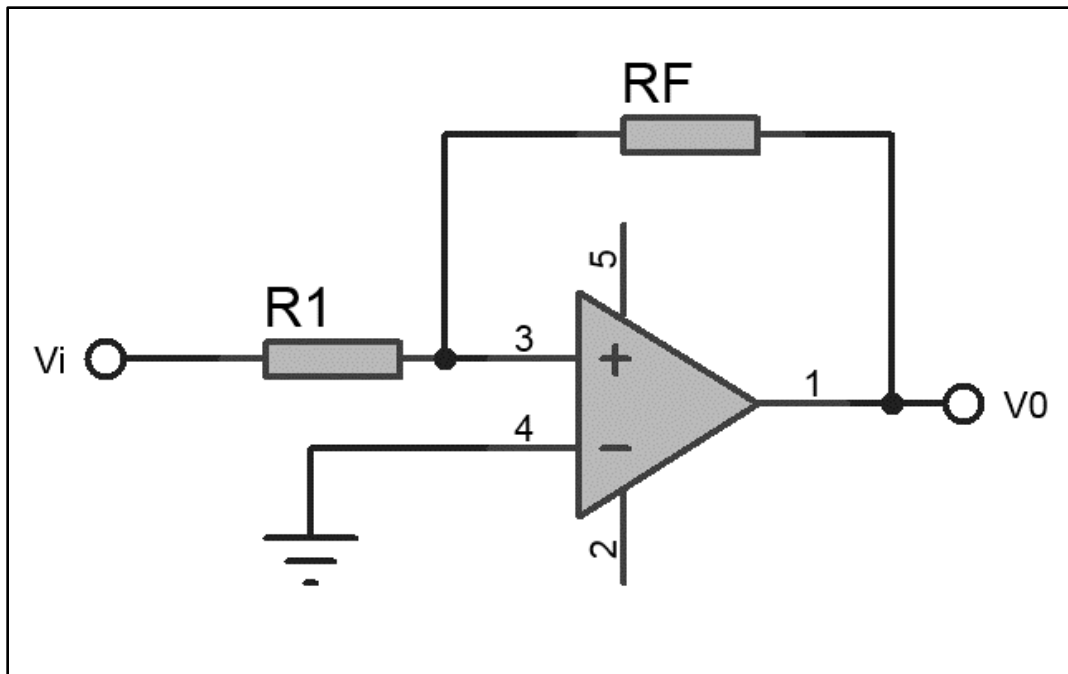


Ilustración 9-Circuito amplificador con realimentación positiva

Fuente: (Pertence Junior, 1991)

3.2.3.4 Circuito Amplificador Con Realimentación negativa

Este tipo de conexión es muy amplia para las aplicaciones, puede ser funcional cuando se requiera integrar señales, invertir, no invertir o como filtros activos. Funcionan de una forma parecida a la configuración de amplificador con realimentación negativa a diferencia que este, la terminal positiva se conecta a tierra.

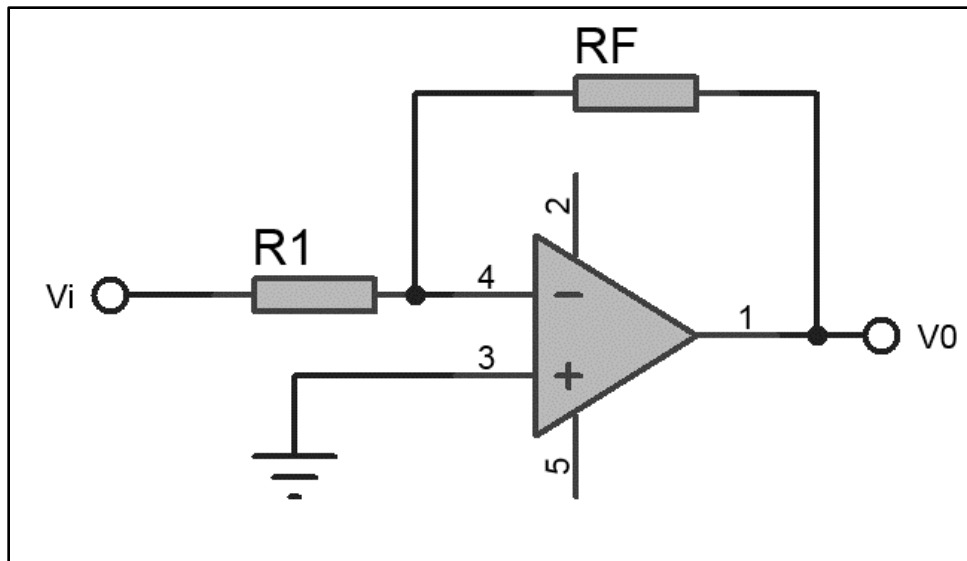


Ilustración 10-Circuito amplificador con realimentación negativa

Fuente: (Pertence Junior, 1991)

3.2.4 FILTRACIÓN DE SEÑALES Y RUIDO

Las señales al provenir de un medio donde existen gran cantidad de perturbaciones, como la temperatura, las vibraciones, los cambios de presión u otras variables que afecten indirectamente la adquisición de información, deben pasar por un proceso de filtrado, de esta manera se garantiza que la señal sea pura y con la mínima cantidad de afectaciones. Anteriormente se habló de la razón de rechazo en modo común, por eso la función de los amplificadores operacionales no se puede omitir de manera súbita.

Los filtros son una configuración de circuitos que, adaptados a una aplicación en específico, logran atenuar las señales que no pertenecen a un dominio, por esta razón surgen tipos de filtros diseñados con dispositivos electrónicos pasivos, estos son las resistencias, capacitores e inductores. Los anteriormente mencionados cumplen la función de regular variaciones e irregularidades en las señales de entrada, pero no amplifican ninguna señal, sino que contribuyen a la regulación de voltaje o corriente; actualmente los filtros se dividen en pasivos y activos (Coughlin & Driscoll, 1999). Estos filtros juegan un papel importante en el acondicionamiento de señales, pues el objetivo es controlar las variables físicas es mantener la linealidad y hacer mucho más precisa la lectura de voltaje final.

Esta investigación se ha referido en diferentes ocasiones a las variaciones indeseables que pueden ser resultado de alguna perturbación externa al sistema que se está trabajando, debido a esta consecuencia es necesario añadir filtros que puedan absorber ese ruido eléctrico. Es requerido conectar un filtro pasa baja en la entrada de las galgas extensiométricas, para eliminar ruido proveniente de la celda, producido por las vibraciones mecánicas y de esta manera entregar un valor de voltaje más puro a la primera etapa del amplificador operacional que conforma el acondicionador de señales. (Quiles et al., 2018)

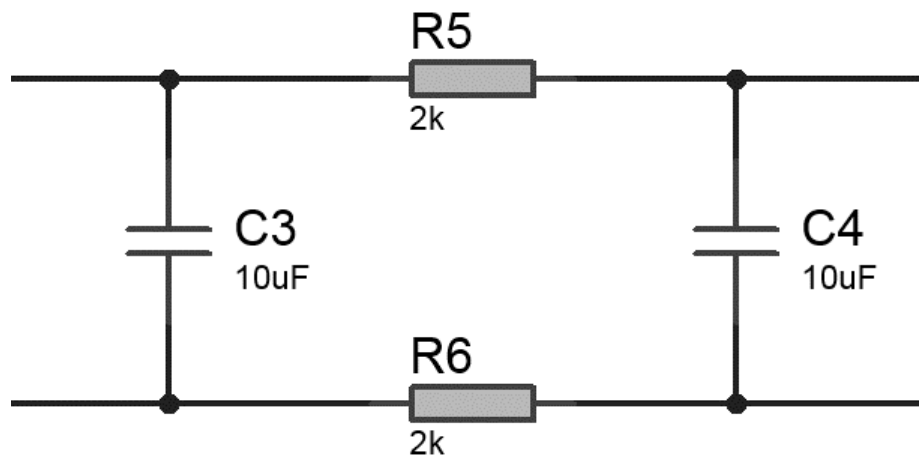


Ilustración 11-Filtro paso bajo para eliminar ruido proveniente de la celda de carga

Fuente: (Quiles et al., 2018)

3.3 SENSOR PARA CELDA DE CARGA

El reconocido Físico y matemático Lord Kelvin, en sus profundas investigaciones científicas, descubrió que en las propiedades de ciertos materiales conductores, al ser sometidos a esfuerzos o fuerzas externas, se manifestaba una variación eléctrica, este es uno de los principios más fundamentales para poder medir la masa de los cuerpos o el peso de ellos, abriéndole paso a un nuevo instrumento de medición para las masas, como son las balanzas, conocido hoy en día como balanzas digitales (E. J. Rodríguez et al., 2007).

3.3.1 EFECTO PIEZOELÉCTRICO

El efecto piezoeléctrico está relacionado con el fenómeno físico, asociando la deformación mecánica y la variable eléctrica. Esto es expuesto por recientes investigaciones.

“Su principio de funcionamiento se basa en el efecto piezorresistivo de metales y semiconductores, según el cual, su resistividad varía en función de la deformación a la que están sometidos, el material de que este hecho y el diseño adoptado” (E. J. Rodríguez et al., 2007).

Este comportamiento está descrito por la siguiente ecuación, la cual quiere decir, que a medida que la longitud del conductor incrementa, la resistencia tiende a sufrir un cambio, como se muestra en la ecuación 7.

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

Ecuación 7-Relación del cambio resistivo debido al alargamiento de un conductor

Dónde:

ρ es la densidad del material conductor

A es el área de la sección transversal del conductor

L es el cambio de longitud

3.3.1.1 Galgas Extensiométricas

Estos tipos de dispositivos transductores son los que experimentan el fenómeno piezoresistivo mencionado con anterioridad, son definidos como:

“Una galga extensométrica o “strain gage” (en inglés) es un dispositivo transductor universal que se utiliza para la medición electrónica de diversas magnitudes mecánicas, como pueden ser: presión, carga, torque, deformación, posición, etc.” (Tello et al., 2012).

Está comprobado que la deformación mecánica de estas celdas aumenta la longitud del material semiconductor, haciendo variar su valor resistivo, es aquí donde se aprovecha el aplicar la teoría de los circuitos eléctricos para conectar dichas galgas como un divisor de voltaje, permitiendo así medir procesar los cambios de tensión, y pues como se ha mencionado, las deformaciones

proporcionasen voltajes semejantes (Amaya & Goitia, 1997). Para hacer esto posible, existen ciertos materiales que poseen esas propiedades mecánicas y eléctricas que son aprovechadas, los ingenieros han estudiado estos materiales por años, intentando mejorar la calidad y sensibilidad, es esta la razón por la que se han de revisar los materiales con los cuales se fabrican; a continuación, se presentan los diferentes elementos químicos que conforman estas pequeñas laminas o hilos conductores. Una vez que se ha tratado el concepto de puente de Wheatstone y que hemos hablado de las galgas extensiométricas, se debe aclarar que las celdas de carga no son más que una viga hecha de aluminio, esta posee las galgas adheridas a las paredes del perfil de aluminio, recubierta con una resina o silicón para protegerlas del exterior. Pallás Areny (2007) nos dice que los fabricantes deciden balancear el puente de Wheatstone colocando cuatro galgas extensiométricas, también conocido en esta configuración como puente de galgas dobles, permite aumentar la sensibilidad; esto para mostrar una mayor linealidad en los valores de voltaje que entrega y mejorar la resolución, es posible gracias a que las variaciones se ajustan perfectamente a las deformaciones devolviendo un valor cada vez más preciso. Esta configuración del puente está presente en las celdas comerciales por lo tanto se debe considerar el diagrama, añadiendo a este un amplificador diferencial, como se muestra en la ilustración 12.

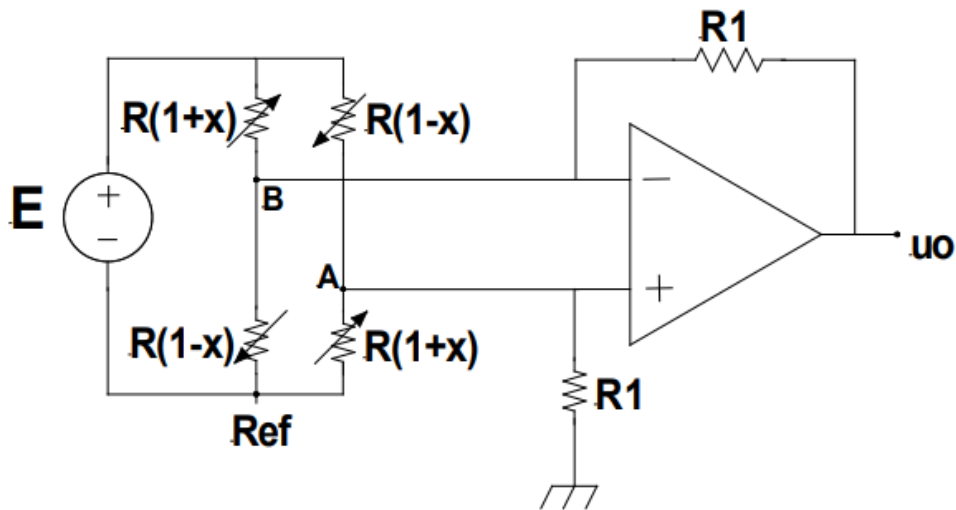


Ilustración 12-Filtro paso bajo para eliminar ruido proveniente de la celda de carga

Fuente: (Morcelle del Valle, 2018)

Las galgas extensiométricas tienen características como cualquier transductor, en esta ocasión poseen un parámetro fundamental, es llamado factor de sensibilidad en la elongación, de otras formas también llamado factor de la galga, representado por la letra "G", este factor describe como las galgas al ser fabricadas pueden presentar diferentes variaciones en la longitud juntamente con la variación resistiva, que se espera tener. Se especifica que se consideran todos los factores del material conductor, es decir las aleaciones correctas de minerales, esto influye, pues algunos de estos poseen impurezas que pueden ser responsables de aumentar o disminuir la sensibilidad. Se estima que el valor típico del factor es 2 y puede tener aproximaciones. (Tello *et al.*, 2012)

A continuación, se puede apreciar algunas de estas variaciones en la sensibilidad, que deben de ser consideradas para los diseños de los circuitos amplificadores, ver tabla 1.

Tabla 1-Factores de galgas comunes

| Sensibilidad a la Deformación (GF) de Aleaciones Comunes Utilizadas en Galgas Extensiométricas | | |
|---|-------------------------------|-----------|
| Material | Composición (%) | GF |
| ADVANCE O Constantan | 45 Ni y 55 Cu | 2.1 |
| Nichrome V | 80 Ni y 20 Cr | 2.2 |
| Isoelastic | 36 Ni, 8 Cr, 0.5 Mo y 55.5 Fe | 3.6 |
| Karma | 74 Ni, 20 Cr, 3 Al, 3 Fe | 2.0 |
| Armour D | 70 Fe, 20 Cr, 10 Al | 2.0 |
| Alloy 479 | 92 Pt, 8 W | 4.1 |

Fuente: (E. J. Rodríguez *et al.*, 2007)

Como todos los comportamientos físicos llegan a afectar directa o indirectamente las galgas extensiométricas, debemos considerarlas para evitar a toda costa las perturbaciones. La primera de ellas es considerar el material de fabricación del soporte donde son colocadas. Pallás Areny (2007) nos presenta las corrientes límite de las galgas aclarando que, si son materiales conductores de calor como el acero, cobre o aluminio, la corriente permisible es de 25 mA y materiales no conductores 5 mA, esto con el fin de evitar concentrar el calor en el área del sensor, evitando que modifique los valores de voltaje. Comúnmente estos sensores son colocados en pequeñas vigas de materiales como el aluminio, que disipa de manera muy fácil el calor, por el bajo coeficiente térmico del material.

Otro factor de mucha importancia en las galgas extensiométricas es que no superen su módulo de elasticidad porque esto podría dañarla irreversiblemente, adicionalmente podría mostrar enviar valores desproporcionados incrementando errores en los valores, por esto es importante ver la colocación de las celdas de carga, que se han de comportar como una viga en voladizo, la forma correcta de la instalación va a ser un factor fundamental para lograr que el acondicionador sea capaz de tomar los valores para ser mostrados, denotando lo antes discutido, en la instrumentación se deben de cumplir todos los valores estándares de error permisibles garantizando a los ingenieros proporcionar solucionar problemas utilizando los microcontroladores PIC. A continuación, se muestra el correcto montaje de las celdas de carga, como se muestra gráficamente en la ilustración 13.

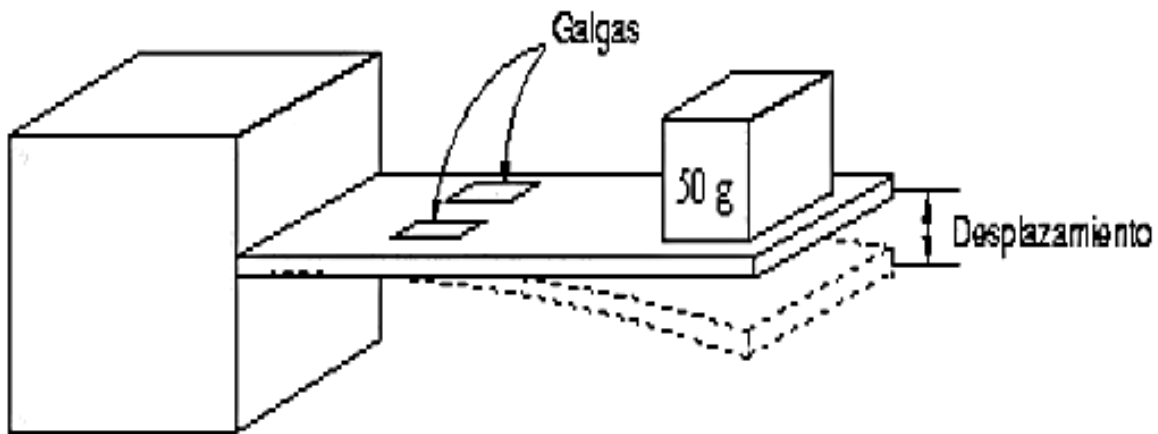


Ilustración 13-Dispositivo de medición de masas

Fuente: (E. J. Rodríguez et al., 2007)

En todo nuestro cálculo hemos de constatar el comportamiento de la celda de carga, estudiando la deformación que las galgas extensiométricas van a someterse, por esto es conveniente referirnos que la constante de rigidez de Hooke asociado al perfil de aluminio corresponde a la ecuación 8, que se detalla a continuación:

$$K = \frac{3EI_{yy}}{l^3}$$

Ecuación 8-Constante de rigidez de Hooke

Dónde:

E es el módulo permisible de Young

I_{yy} es el momento de inercia en y

L la longitud de la viga

Donde la viga se comporta como un resorte dentro de los límites elásticos, experimenta una deformación debido a una fuerza, la cual se comporta de acuerdo a la ecuación 9.

$$F = k(x_1 - x_2)$$

Ecuación 9-Fuerza debido a una carga puntual

3.3.1.2 Estructura de las Galgas Extensiométricas

Algunos de los materiales utilizados para la construcción de las galgas extensiométricas, están formados de conductores metálicos como el constatan, advance, karma, isoelastic y en ocasiones se emplean los materiales de germanio y silicio. Las galgas pueden tener o no soporte, dependiendo las aplicaciones que aplicación está destinada a realizar. Usualmente están fabricados con un tejido de hilo bobinado o plegado con soportes sobre papel y están protegidas con algún tipo de resina (Pallás Areny, 2007). Se muestra en la ilustración 14 como luce una galga extensiométrica sin conexiones externas.

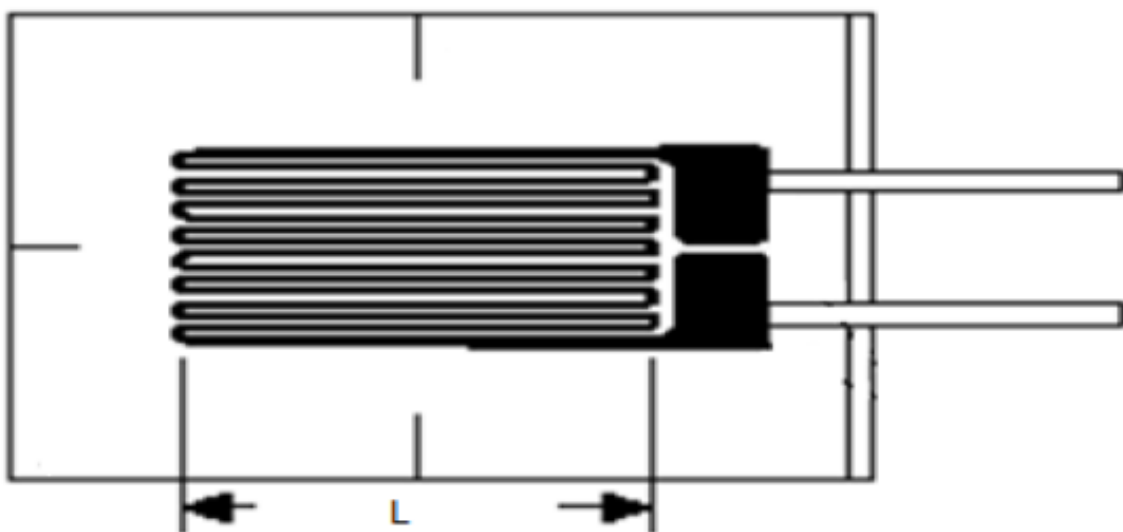


Ilustración 14-Galga extensiométrica

Fuente: (Tello et al., 2012)

3.3.1.3 Deformaciones Mecánicas en las Galgas Extensiométricas

Todas las galgas extensiométricas son utilizadas en gran variedad de aplicaciones en la ingeniería, especialmente en el área de la mecánica, para medir esfuerzos, presiones o fuerzas. Por ello Rodríguez et al. (2007) sugieren que, por ser objeto de investigación en ingeniería, deben de estudiarse los módulos de elasticidad permisibles para evitar daños en las galgas o someterlas a cambios a los que no han de resistir. Es preciso que todas las celdas que posean galgas extensiométricas se mantengan dentro de la deformación elástica, porque de no cumplir con este factor de importancia, las galgas pueden presentar lecturas erróneas o desproporcionadas.

Se presenta una gráfica característica del comportamiento, ver ilustración 15, que estudia la resistencia de materiales y que es adecuado establecer en dichas consideraciones, esta relación se presenta como la deformación vs. El esfuerzo.

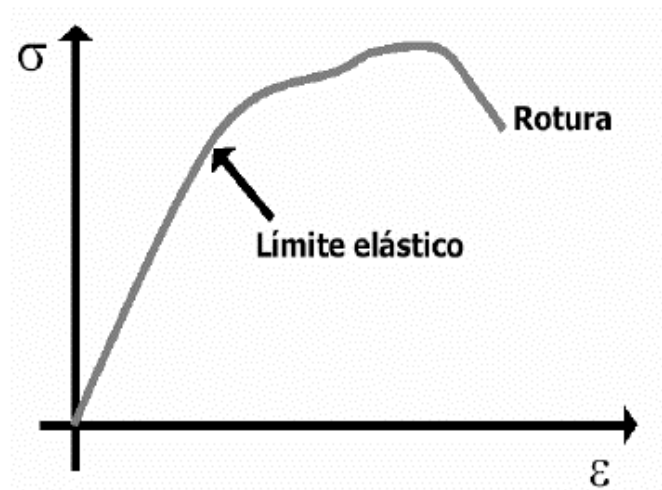


Ilustración 15-Relación entre esfuerzos y deformaciones

Fuente: (E. J. Rodríguez et al., 2007)

Con base al estudio del efecto piezoresistivo, se establece que las galgas poseen un diámetro D y al experimentar un cambio en la longitud L , surge un cambio en la resistencia del material, causando una variación que se aprovecha para captar una magnitud. Mencionado esto, debe ser objeto de estudio el comportamiento de la viga en voladizo para posterior consideración en la función de transferencia que se ha de representar por medio de un modelo matemático.

3.4 MICROCONTROLADOR PIC

Los microcontroladores desempeñan una tarea muy importante en el procesamiento de señales, se encargan de mostrar la información que ha sido entregada por el transductor. Es correcto mencionar que en todo el proceso de transducción se requiere un sensor, acondicionador de señal y microcontrolador, sin estos tres elementos no tiene ningún objetivo la adquisición de datos, ya que se pretende mostrar la información en los procesos industriales complejos. La terminología microprocesador o microcomputadoras suele confundirse con el término microcontrolador, pues a diferencia este ejecuta tareas para funciones específicas, en gran variedad de aplicaciones.

Para definir mejor un microcontrolador, es un dispositivo programable que ejecuta ciertas tareas sin que exista intervención humana teniendo la capacidad para almacenar información y devolverla, es por eso por lo que hoy en día, es tan difícil no encontrarse con uno de estos, hasta los dispositivos más pequeños poseen uno. Gracias al pequeño tamaño y por ser tan compactos, pueden ser utilizados casi para todas las aplicaciones que exige hoy la ingeniería de control a nivel industrial o comercial. (MacKenzie & Phan, 2007)

3.4.1 PROCESAMIENTO DE SEÑALES ANÁLOGAS

En nuestro entorno existen señales análogas que son percibidas consciente o inconscientemente por nosotros, como ser la temperatura, las vibraciones entre otras. Para poder definir las y cuantificarlas deben de ser digitalizadas, es decir pasarlas de un medio a otro, este caso el mundo digital. En la actualidad la digitalización de las señales nos ayuda a medir la realidad en la que vivimos, permitiéndonos tomar decisiones.

Para lograrlo existen métodos para convertirlas; aquí podemos decir que las señales análogas son continuas y las señales digitales son discretas. Para convertir de un tipo de señal a otra es requerido un proceso de muestreo, es decir aproximar valores continuos a valores digitales, esto es posible gracias a que los microcontroladores poseen internamente conversores análogo-digital, que tienen designada la tarea de muestrear todos los valores provenientes de los sensores para poder, permitiéndonos mostrar valores muy aproximados (Ambardar, 2002). Se puede

apreciar en la ilustración 16, como fluye el correcto procesa en el muestreo que ejecutan los conversores análogo-digital para poder entregar valores aproximados de una función.

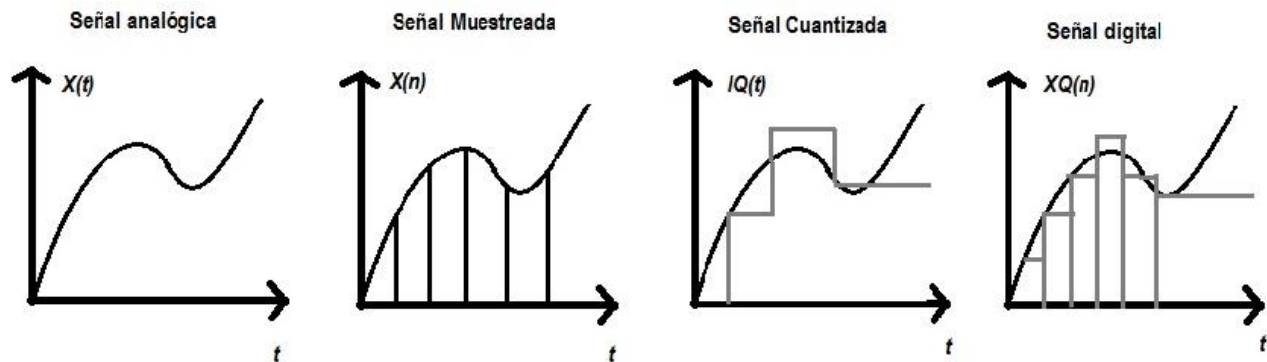


Ilustración 16-Señales análoga, muestreada, cuantizada y digital

Fuente: (Ambardar, 2002)

3.4.1.1 Conversores de Señales

Ambardar (2002) nos plantea que utilizando computadoras lógicas digitales pueden procesarse valores y tratarlos como números discretos, pero el procesamiento de señales se requiere muestrear, aquí es donde comienza la tarea de los conversores análogo-digital (ADC), han sido muchas las tecnologías revolucionarias, basadas en el procesamiento digital por ello la importancia de tomarlas en cuenta a nivel industrial, pues la automatización de procesos se ha vuelto más digital y por ende más compleja. Este proceso consiste en tres etapas fundamentales:

- 1) Adquirir una señal analógica medible.
- 2) Procesar el muestreo de la señal.
- 3) Muestreo de la señal medida.

En el diagrama de bloques de la ilustración 17, se aprecia como ese proceso de llevarse a cabo para poder mostrar una señal digital clara.

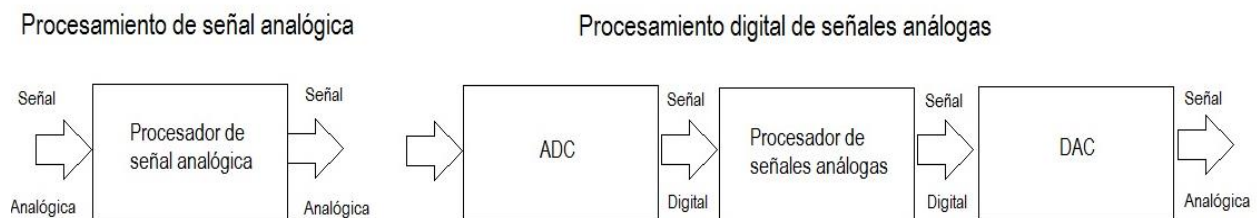


Ilustración 17-Procesamiento de señales análogas y digitales

Fuente: (Ambardar, 2002)

Aunque se debe considerar a los conversores análogo – digital para el estudio de los acondicionadores de señal para que sean capaces de entregar el rango permisible de voltaje, estos vienen internos en los microcontroladores, sin embargo, es adecuado mencionar cómo se comporta para comprender todo el proceso de la señal. El conversor A/D toma una serie de valores continuos invariantes en el tiempo y realizar una aproximación finita muestreando los valores adquiridos para cuantificarlos y posterior procesamiento de bits. Es posible observar como la función de salida (la onda cuadrada) llega a estar muy aproximada a la onda continua de la entrada, es así como los valores muestreados se logran ver en el tiempo para ser procesada por un microcontrolador. (Proakis & Manolakis, 2007)

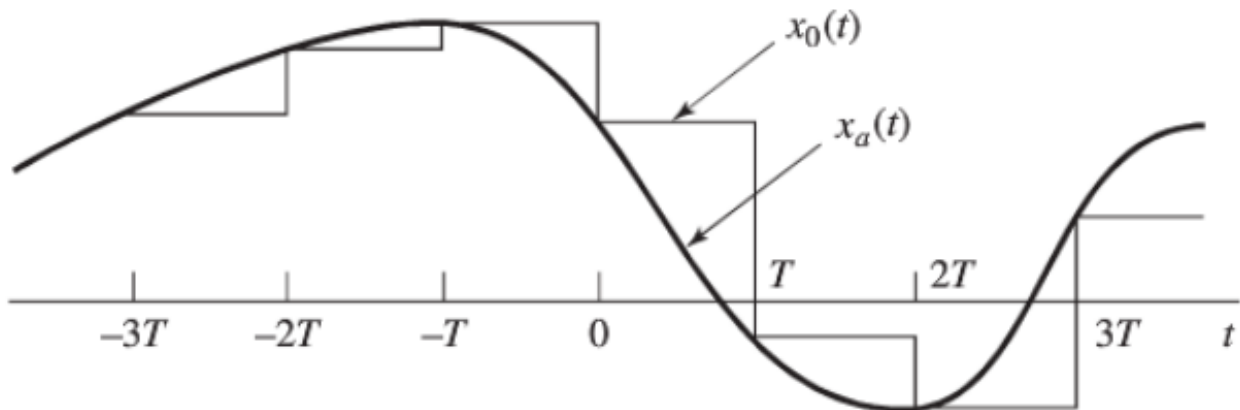


Ilustración 18-Señales de entrada y salida en un sistema de muestreo y retención

Fuente: (Oppenheim & Schaffer, 2011)

3.5 SISTEMAS DE CONTROL DIGITAL

En la mayor parte de las aplicaciones en el campo de la ingeniería, es requerido controlar variables a partir de ciertos parámetros y los transductores a pesar de presentar bastante estabilidad, también se ven expuestos a perturbaciones que obligan a los ingenieros, regular ciertas señales para lograr mantenerlas estables.

Fernández del Busto & Ezeta (2013) nos menciona que los avances que la tecnología y los aportes de la ciencia, han logrado desarrollar microprocesadores más compactos en cuando a respuesta de procesamiento así como más versátiles para aplicaciones; han llegado a la industria para mejorar los procesos de producción y controlarlos, esto lleva consigo al estudio de la ingeniería de control digital a un nivel de análisis más profundo, creando modelos matemáticos que puedan predecir los comportamientos de las plantas.

3.5.1 PLANTA DE UN SISTEMA

La planta de un sistema de transducción puede ser objeto de estudio y análisis, cuando se pretende obtener linealidad a partir de un conjunto de dispositivos físicos logrando manipular las variables que podrían hacer inestable el sistema (Ogata, 2010).

3.5.2 PERTURBACIONES

Al momento de diseñar un transductor es necesario considerar las perturbaciones, que define Ogata (2010) "Una perturbación es una señal que tiende a afectar negativamente el valor de la salida de un sistema" (p.3).

Las perturbaciones pueden llegar a ser internas o externas, las perturbaciones internas son las que surgen a partir de una inestabilidad no deseada dentro del sistema, que pueden darse como resultado de un problema en el diseño de la planta. Luego nos referimos a las perturbaciones externas, estas aparecen cuando existen cambios ajenos al sistema, como en nuestro caso, en el diseño de un acondicionador de señal, ha de considerarse la presión, la temperatura y factores como las vibraciones mecánicas en la celda de carga. Estos factores pueden minimizarse, pero no evitarse por completo, para ello es el estudio y modelado matemático de los sistemas de control.

3.5.3 MODELADO MATEMÁTICO DE LOS SISTEMAS DE CONTROL

El modelado matemático puede ser representativo de un proceso en el cual se manejan muchas variables, y al ser estructuradas en diagramas de bloques, es conveniente para calcular la respuesta o predecir el comportamiento de cualquier sistema que pueda estar vulnerable a los cambios de voltaje, mecánicos, magnéticos, entre otros. Para ello los ingenieros modelan estas

estructuras con la finalidad de comprender y manipular las variables de la planta. (Valdivia Miranda, 2012)

Los amplificadores operacionales También son estudiados por la ingeniería de control, por lo tanto, se vuelven fundamentales para el análisis de los circuitos y configuraciones electrónicas que más adelante se van a desarrollar. Ogata (2010) hace referencia que los amplificadores operacionales, considerando las características de poseer una alta impedancia de entrada y una impedancia baja ha de considerarse como una función de transferencia de elementos en cascada sin carga, esto nos dice que se pueden considerar un bloque para la red de amplificadores, tomando solo en cuenta los circuitos RC que estén conectados a él, de esta manera se obtiene una función de transferencia a razón del voltaje de salida amplificado entre el voltaje de entrada. En la ilustración 19, se muestra como es tratado este circuito eléctrico amplificador.

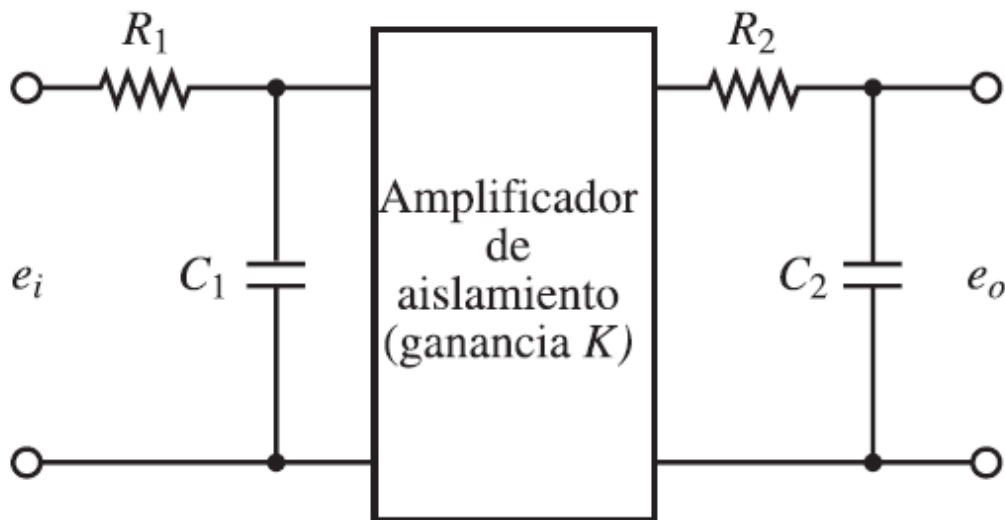


Ilustración 19-Sistema eléctrico

Fuente: (Ogata, 2010)

3.5.4 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA

Todo modelado matemático de un sistema comienza por exponerse la idea de la función de transferencia, es caso de estudio para los transductores para representar una entrada física y una salida de voltaje. Bolton (2001) afirma que: "Un modelo matemático de un sistema es una "réplica" de las relaciones entre entrada y salida o entradas y salidas. Las relaciones reales de la entrada y

la salida de un sistema se sustituyen por expresiones matemáticas" (p.18). Para poder emplear los modelos está representado por diagramas de bloques, ver ilustración 20, en donde se visualizan cuadros representando funciones, que contienen variables de interés.

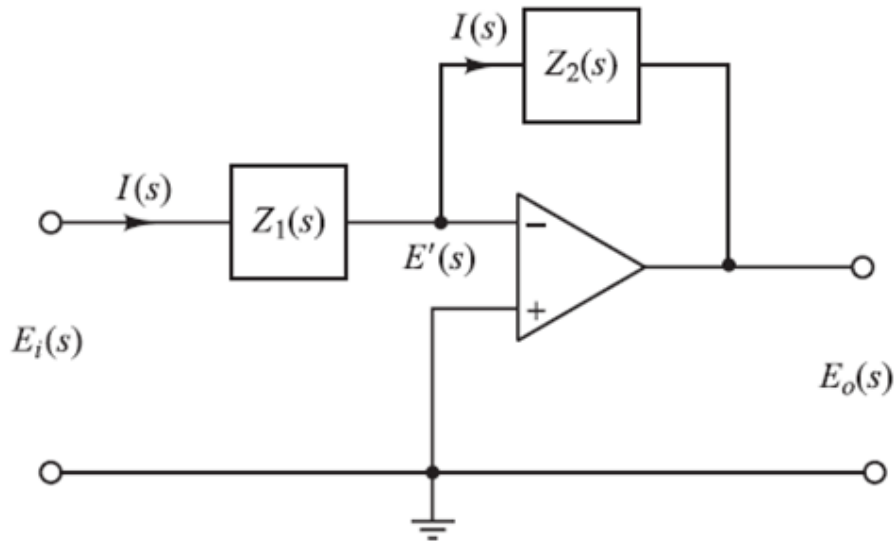


Ilustración 20-Circuito con amplificador operacional

Fuente: (Ogata, 2010)

Ogata (2010) nos expone que los diagramas de bloques son simples representaciones de todas las variables en función del tiempo o la frecuencia, que lleva una secuencia lógica y un sentido de flujo de las señales. Los diagramas de bloque nos permitirán ver de manera clara el procesamiento de señales, desde la función de fuerza en la celda de carga hasta la entrega final de voltajes al microcontrolador, dejando abierto el criterio para la toma de decisiones y mejoras que puedan ser implementadas para hacer as eficiente el sistema.

Pertence Junior (1991) menciona que posible realizar la construcción y diseño de un sistema de control a través de un diagrama de bloques, tal como se propuso, para lograr plantear la función de transferencia, para esto las siguientes variables a considerar son:

- 1) Señal de entrada
- 2) Señal de salida
- 3) Ganancia en lazo abierto
- 4) Un factor de ganancia de realimentación

- 5) Señal diferencial de entrada
- 6) Realimentación en la entrada

Mostrando la forma correcta a considerar se ilustra el diagrama de bloques principal, ver ilustración 21, para la amplificación.

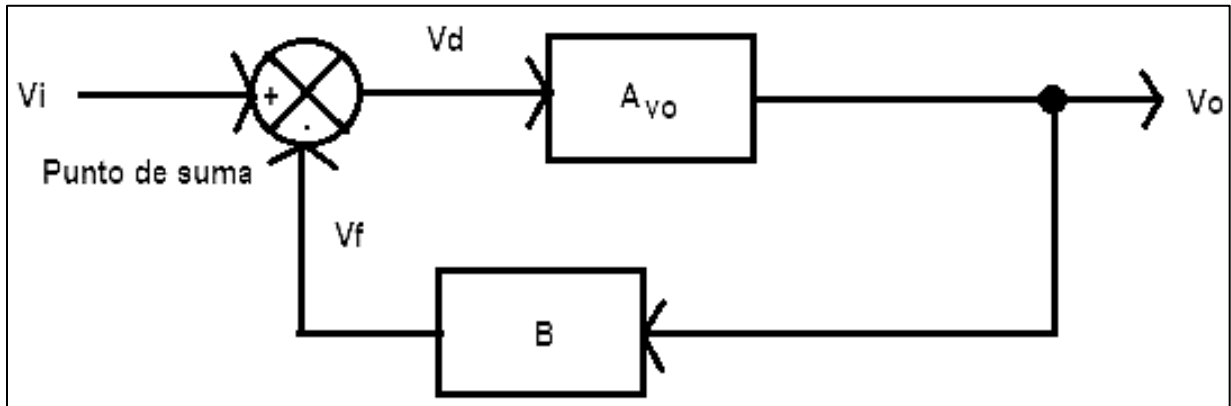


Ilustración 21-Diseño general con realimentación negativa

Fuente: (Pertence Junior, 1991)

3.5.5 CONTROL EN LAZO CERRADO EN AMPLIFICADORES OPERACIONALES

Cuando se requiere estabilizar una señal conforme existe un error en la salida, es necesario tomar esa señal y devolverla para quitar el error, en los circuitos amplificadores de alta ganancia, son casi de común uso, Ogata (2010) menciona que esta configuración mantiene relacionada la variable de salida con la entrada constantemente, anulando así, cualquier posible desviación o error presente en dicha variable.

Hernández Gaviño (2010) habla de las funciones de transferencia para las configuraciones con los amplificadores operacionales, pueden estar basados en el modelo ideal donde se considera una conexión con una resistencia de realimentación y una resistencia en la entrada, en esta ocasión son tratadas como impedancias para que la función de transferencia esté a razón de estas, se realiza un análisis y pretende ajustar las variables de entrada y salida, ya que son los componentes encargados de controlar la planta, ver ilustración 22 y ecuación 10.

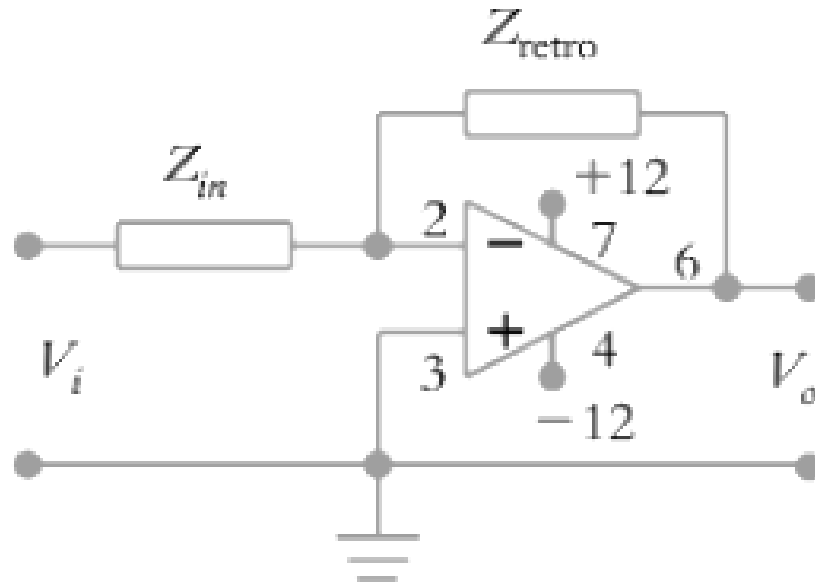


Ilustración 22-Amplificador operacional de entrada inversora con función de transferencia

Fuente: (Hernández Gaviño, 2010)

$$G(s) = -\frac{Z_{retro}}{Z_{in}}$$

Ecuación 10-Función de transferencia con impedancias

3.6 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

Con esto se plantean posibles respuestas para el diseño y fabricación de un transductor acondicionador de señal, que utilizando estas herramientas que nos presta la electrónica digital, la mecánica y el procesamiento de datos, es posible presentar un circuito compacto y adaptado para hacerlo compatible o funcional en los microcontroladores, que hoy en día son tan requeridos para el prototipaje y un abanico de proyectos de aplicación industrial, dándole versatilidad y flexibilidad a los ingenieros para solventar problemas relacionados, con la medición de las masas, utilizando las tres ramas fundamentales de la ingeniería mecatrónica.

3.6.1 SISTEMAS

Los sistemas son un conjunto de elementos que trabajan con la misma finalidad de un mecanismo, Bolton (2009) dice que los sistemas pueden ser vistos como cajas en donde siempre existirá una variable de entrada y una de salida, donde la importancia va alrededor de estas variables y no de

lo que puedan contener dichas cajas, estas cajas pueden ser los subsistemas que conforman un sistema mecatrónico, las cuales pueden contener una gran cantidad de dispositivos, partes o configuraciones, que permiten que exista una alteración en la variable a medir.



Ilustración 23-Configuración de un sistema

Fuente: Elaboración Propia

De esta manera se considera un sistema, el cual puede subdividirse, pero este debe cumplir con la sincronía de los 3 subsistemas de la ingeniería mecatrónica, por ello se debe realizarse una serie de requerimientos necesarios para el sistema, para evaluar posteriormente los requerimientos de los subsistemas, utilizando las herramientas de ingeniería.

El proceso metodológico que ha de implementarse para desarrollar un prototipo comercial es el que se describe en la ilustración 24.

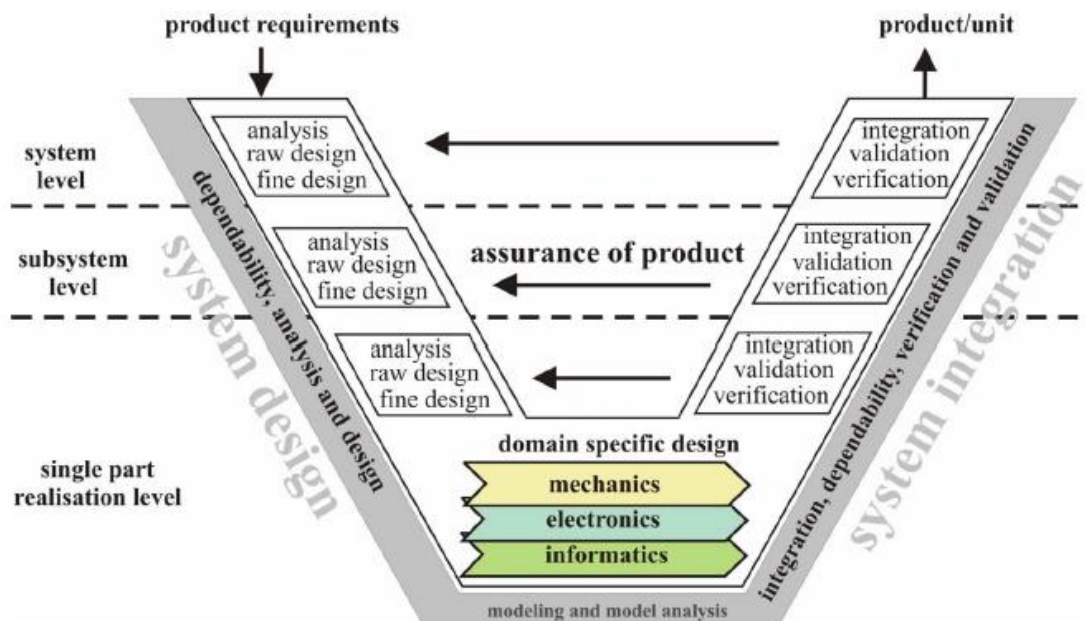


Ilustración 24-Product development guideline for mechanical, electronic and IT product

Fuente: (Vasić & Lazarević, 2008)

Para obtener un sistema mecatrónico completamente funcional y bajo ciertos requerimientos se debe aplicar una metodología de investigación, con el objetivo de reducir riesgos en el proyecto, mejorar la calidad y garantizarla, reducir los gastos totales y mejorar la vida útil de este.

Al describir el método en V se intenta predisponer un camino de aplicación de conceptos técnicos y científicos para la integración de todas sus partes de la siguiente forma:

- 1) Requerimientos del sistema mecatrónico conjunto
- 2) Requerimientos de la arquitectura
- 3) Presentar un diseño en fundamento de análisis
- 4) Integración de las partes del sistema y realizar pruebas
- 5) Validar el funcionamiento del sistema mecatrónico
- 6) Empleo e indicaciones de uso para el mantenimiento

CAPÍTULO IV. METODOLOGÍA

En el presente se describió el proceso metodológico para llevar a cabo un análisis de todos los requerimientos que posteriormente van a ser de utilidad para el desarrollo del proyecto que se implementó, utilizando las herramientas de la ingeniería, se demostró que las variables que son objeto de estudio cumplen un papel importante en la finalidad de esta investigación.

4.1 ENFOQUE

En la presente investigación se aplicó un enfoque cuantitativo, pues se recolectaron datos por medio de la experimentación, para la comprobación de resultados en los acondicionadores de señal y en el sistema mecatrónico conjunto, tal como lo describe Hernández Sampieri (2001) que haciendo recolección de información a partir de una investigación es el camino hacia la comprobación de las hipótesis ayudando a mostrar resultados más convincentes y respaldados por la experimentación, utilizando las herramientas que la ingeniería nos proporcionan. Estas herramientas son de apoyo para el análisis de los tres subsistemas que componen la ingeniería mecatrónica, mecánica, electrónica y sistemas computacionales, brindando como resultado un único sistema mecatrónico que fue unificado o integrado usando la metodología correspondiente.

Este proceso fue llevado a cabo por la experimentación basándose en la ingeniería ágil, que pretende hacer la evaluación del proyecto para la utilización mínima de recursos y en su pleno funcionamiento. Esto permite generar una solución respaldada en análisis detallado de cada componente que forma parte de un sistema mecatrónico y presentar un prototipo funcional que permite comprobar que todos los mecanismos que fueron objeto de estudio hayan sido evaluados con criterios a nivel de ingeniería, generando así un conocimiento o aporte fundamentado en el método científico.

4.2 VARIABLES DE INVESTIGACIÓN

El objetivo de cualquier investigación tiene como punto principal, la evaluación de variables que afecten directa o indirectamente la funcionalidad del proyecto a desarrollar, para considerarlas de

la manera correcta, según la aplicación se sugirió clasificarlas en variables dependientes e independientes.

4.2.1 VARIABLE DEPENDIENTE

Esta variable, ver ilustración 25, es la que se pretende modificar a medida que la razón de cambio de fuerza y voltaje incrementa o decrementa. Es la responsable que de manifestar cambios proporcionalmente a la fuerza aplicada en la celda de carga. La importancia de controlarla está en que el rango permisible de voltaje en los microcontroladores es digital y si supera estos valores podría dañarse.

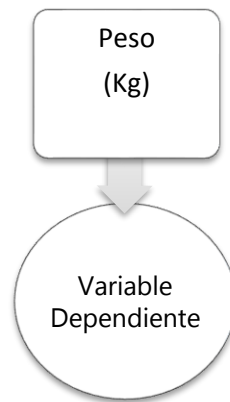


Ilustración 25-Variable dependiente

Fuente: Elaboración Propia

4.2.2 VARIABLES INDEPENDIENTES

Estas variables, ver ilustración 26, permiten el control sobre la variable dependiente. Aquí es donde la importancia de integrar todos los subprocesos del sistema mecatrónico toma valor y precisa determinar los materiales de fabricación, seguimiento de hojas de datos de los componentes, que consideraciones deben tomarse en las variables del comando del programa que interpretara las magnitudes.

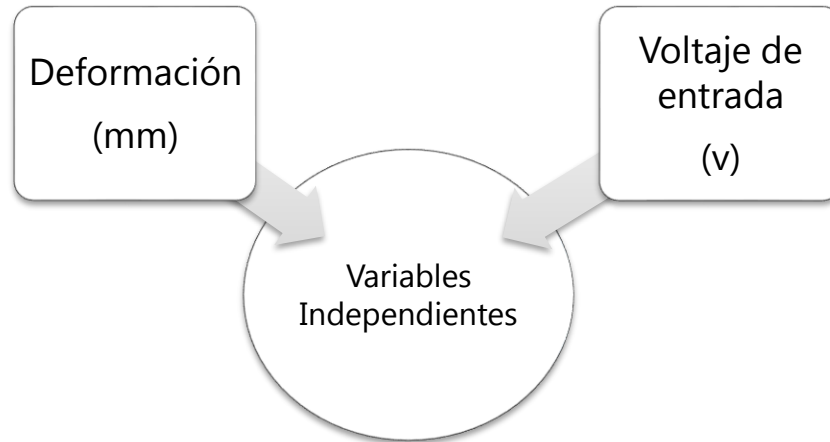


Ilustración 26-Variables independientes

Fuente: Elaboración Propia

- 1) La presión atmosférica es un factor importante para considerar en las mediciones de masa del dispositivo.
- 2) La deformación es un comportamiento de la mecánica y es necesario para que las galgas extensiométricas puedan detectar los cambios y poder transducir esa magnitud en forma de señal eléctrica descrita por la siguiente relación matemática:
- 3) El voltaje de entrada queda a criterio de la aplicación, sin embargo, se recomienda trabajar en voltajes de 8 – 12 voltios, para que no exista auto recalentamiento y esto se vea reflejado en las tomas de lecturas al momento de medir una masa.
- 4) La temperatura afecta directamente la lectura tomada por medio de las galgas extensiométricas, ya que estas son muy sensibles a dichos cambios.

Ilustración 27-Hipótesis de investigación

Fuente: Elaboración Propia

4.4 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS APLICADOS

Existen herramientas en la ingeniería que nos permiten realizar análisis para obtener resultados que puedan predecir el comportamiento o la respuesta de un sistema, como simuladores o diseños asistidos por computadora. Se hace utilización para medir las variables.

- 1) CAD SolidWorks Software CAD SolidWorks, permite diseñar modelos de piezas en 3D, con una práctica interfaz para realizar los dibujos en planos y mostrarlos en vistas.
- 2) MATLAB es un software matemático que permite realizar simulaciones y resolver ecuaciones por medio de su interfaz de comando.
- 3) Proteus 8 profesional es un software de simulación de circuitos eléctricos, que permite graficar, voltajes, corrientes y conectar circuitos avanzados permitiendo predecir el funcionamiento.
- 4) MikroC for PIC, es un compilador de código desarrollado en c++, que permite ensamblar códigos a microcontroladores PIC.
- 5) Timer Calculator permite calcular tiempos, utilizando las interrupciones habilitadas en el microcontrolador y facilitando la interacción con MikroC.
- 6) Fritzing es un software que permite diseñar, conectar y simular circuitos para tarjetas electrónicas.

4.5 MATERIALES

- 1) Celda de carga: compuesto por una configuración del puente de Wheatstone en una red de 4 galgas extensiométricas.
- 2) Microcontrolador PIC: dispositivo procesador de datos en forma programable, utilizado para la adquisición de datos análogos.
- 3) Amplificadores Operacionales: red de transistores de alta ganancia, usado para amplificar señales muy pequeñas provenientes de sensores, usualmente se conecta con resistores, capacitores y reguladores de voltaje.

4.6 METODOLOGÍA DE ESTUDIO

En la siguiente metodología en "V" proporciona una práctica herramienta para el desarrollo de proyectos como producto final, permitiendo realizar una integración de los tres subsistemas de la ingeniería mecatrónica: la mecánica, la electrónica y la informática. Este balance permite diseñar un sistema mecatrónico generando un estudio individual, pero integrando sus componentes para una sincronía en la funcionalidad de éste, ver ilustración 28.

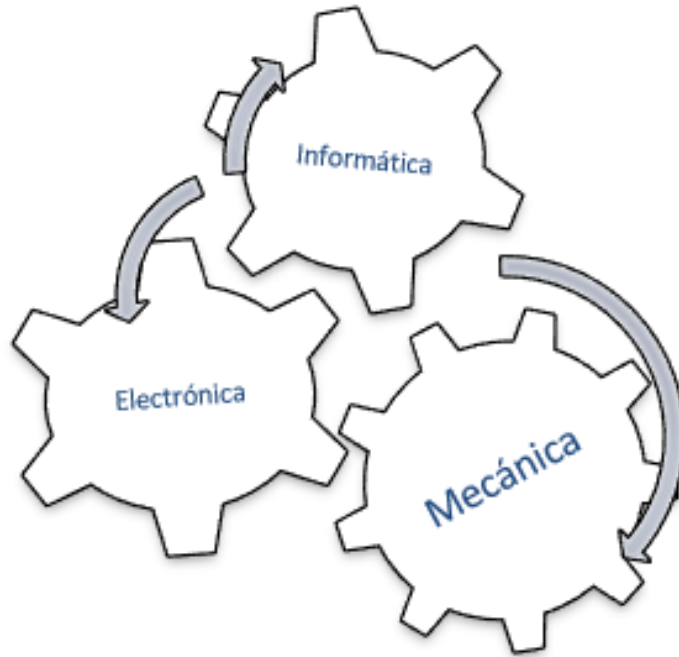


Ilustración 28-Integración de la ingeniería mecatrónica

Fuente: Elaboración Propia

4.6.1 ETAPA INICIAL: REQUERIMIENTOS DEL PRODUCTO

Se requiere un sistema conjunto de medición de peso, en donde se logren integrar los sistemas que conforman la ingeniería mecatrónica, como ser un conjunto mecánico, electrónico e informático, que en sincronía genere un prototipo funcional, en cumplimiento con las normas ISO 9000:2000 para la presentación de un producto.

4.6.2 CICLO A DE LA METODOLOGÍA "V"

4.6.2.1 Etapa I: Nivel de los Sistemas del Ciclo A

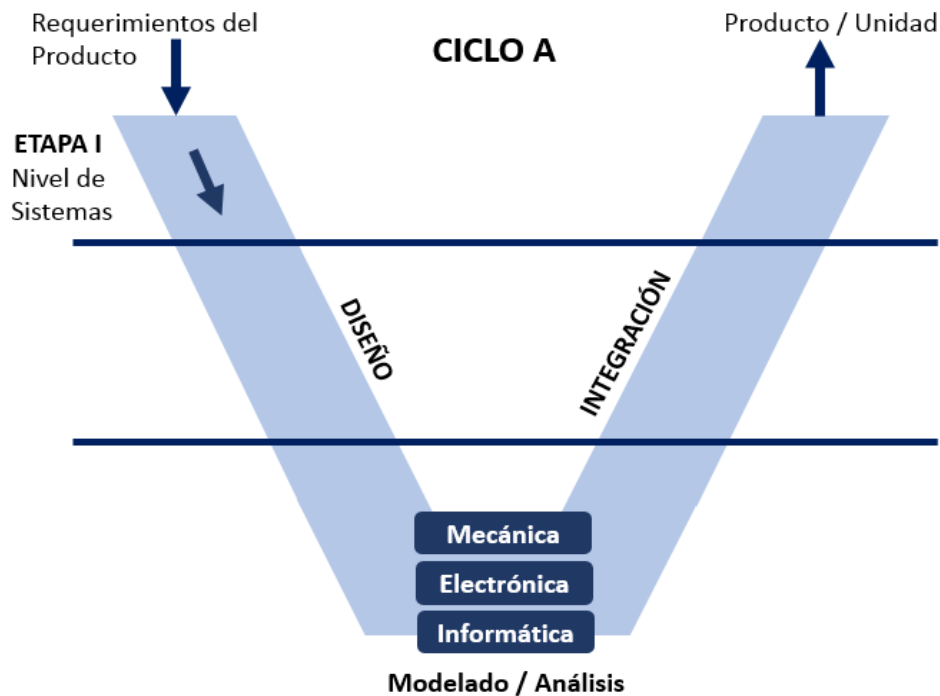


Ilustración 29-Etapa I del ciclo A

Fuente: Elaboración Propia

1) Sistema Mecánico

Se requirió un soporte de base para la estructura del proyecto. En este sistema se evaluaron las propiedades mecánicas de los materiales para encontrar posibles fallas. Por medio de este se determinaron los materiales óptimos para la implementación y la interacción con los demás componentes realizando simulaciones en el software de SolidWorks.

2) Sistema Electrónico

Se requirió una tarjeta de control electrónico para el procesamiento y amplificación de señal proveniente de las galgas extensiométricas, que sea pequeña y compacta, con buena resolución y alta ganancia de voltaje. Dichos dispositivos se sometieron a pruebas para determinar los voltajes y corrientes máximos permisibles, se determinaron valores de capacitores, resistencias y

diodos de acoplamiento electrónico, utilizando las herramientas de simulación como ser proteus profesional.

3) Sistema Informático

Se requirió un algoritmo matemático que sea capaz de interpolar linealmente valores digitales, por medio de una ecuación algebraica que permita linealizar la respuesta en un microcontrolador PIC.

4.6.2.2 Etapa II: Nivel de los Subsistemas del Ciclo A

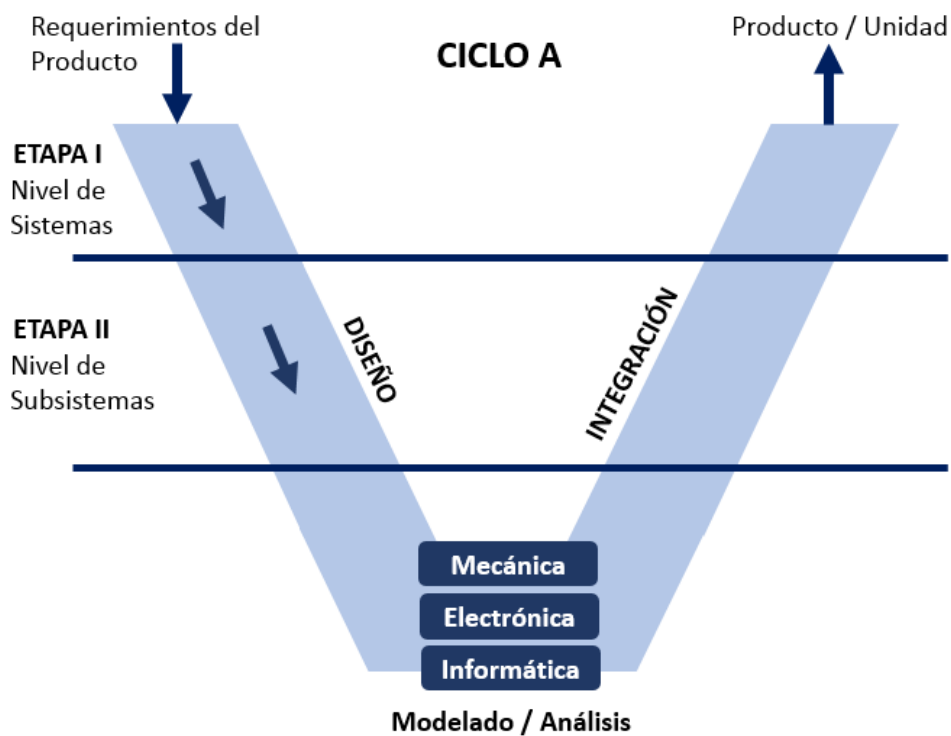


Ilustración 30-Etapa II del ciclo A

Fuente: Elaboración Propia

1) Subsistemas Mecánicos

Este fue conformado por varios subsistemas:

- 1.1) Tornillería: se utilizaron medidas estándar milimétricas en la menor cantidad posible para reducir los costos, evaluando la resistencia de fuerza al ser acoplado con la celda de carga.

1.2) Piezas de soporte: Se diseñaron piezas a la medida para la celda de carga, realizando un estudio de esfuerzos mecánicos, para determinar la carga máxima permisible.

1.3) Viga de la celda de carga: Se calculó la inercia y se analizaron las deformaciones con modelos matemáticos.

2) Subsistemas Electrónicos

Está conformado por los componentes electrónicos:

2.1) Amplificadores operacionales: se utilizaron estos circuitos integrados de alta ganancia de voltaje, con el objetivo de captar hasta la más mínima señal proveniente de las galgas extensiométricas. Se realizaron simulaciones a diferentes tipos de circuitos integrados con el fin de determinar cuál es el que mejor responde a los cambios de voltaje.

2.2) Capacitores: Se realizaron pruebas de voltaje máximo por medio de simulador, para evitar la explosión de estos, pudiendo dañar la tarjeta electrónica.

2.3) Resistencias: Se calcularon los valores de los resistores los cuales, se acoplaron a los amplificadores operacionales, Se calculó cuanta potencia disipan en forma de calor para no interferir con la señal proveniente de las galgas extensiométricas.

2.4) Diodos Zener: Se calcularon los valores a partir de los voltajes aplicados por la fuente, se estudió el calentamiento de estos.

3) Subsistemas Informáticos

Está compuesto por variables de entrada y salida. A través de un simulador se realizaron pruebas para la adquisición de datos análogos en los puertos de entrada del microcontrolador, para procesar las señales del acondicionador de señal y poder mostrar las mediciones en una LCD, como una variable de salida. Estos fueron simulados para garantizar el funcionamiento del algoritmo conectado a una señal análoga.

4.6.2.3 Etapa III: Realización de Parte del Ciclo A

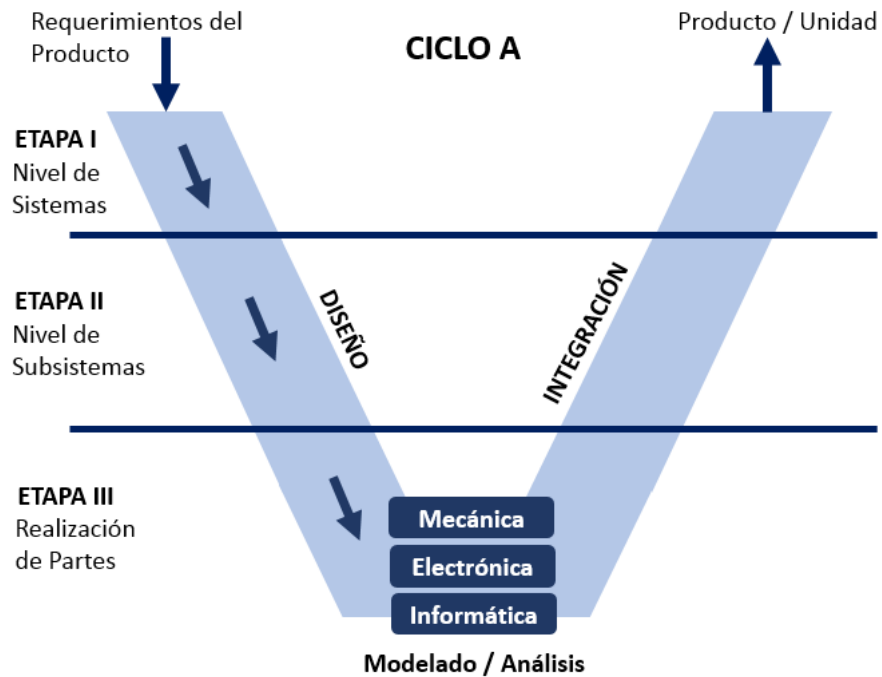


Ilustración 31-Etapa III del ciclo A

Fuente: Elaboración Propia

1) Partes Mecánicas

Se evaluaron la resistencia de los materiales realizando pruebas experimentales a los soportes, tornillos y celda de carga por separado.

2) Partes Electrónicas

Se realizaron pruebas experimentales de voltaje y corriente con las configuraciones comunes de los amplificadores operacionales, capacitores, resistores y diodos Zener.

3) Partes Informáticas

Se realizaron pruebas experimentales de las variables de entrada y salida, conectando un regulador de voltaje para observar la respuesta del microcontrolador a los valores análogos.

4.6.2.4 Etapa IV: Integración de Partes del Ciclo A

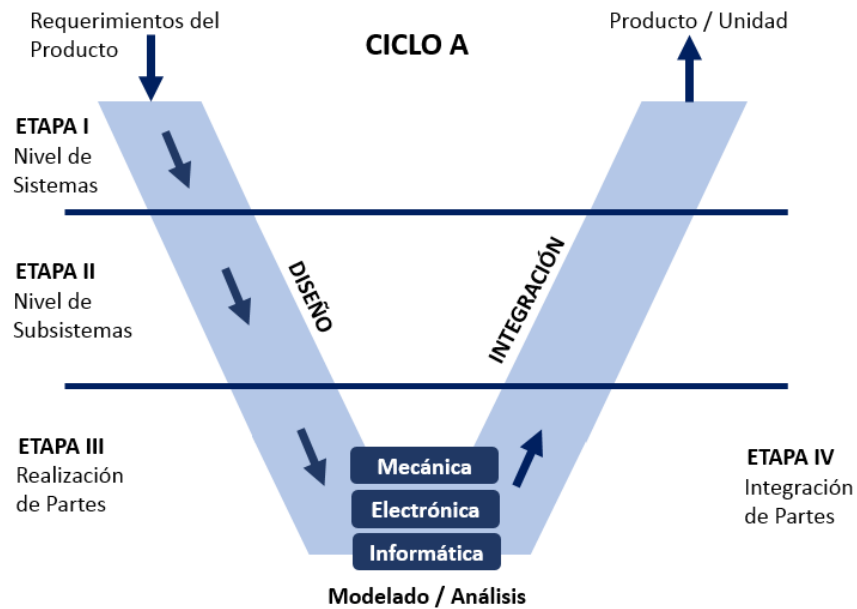


Ilustración 32-Etapa IV del ciclo A

Fuente: Elaboración Propia

1) Integración de Partes Mecánicas

Al integrar las partes mecánicas, se realizaron las pruebas de esfuerzos permisibles, colocando pesas de valores conocidos para validar la integración de todos los componentes mecánicos y por observación en base a resultados ver el comportamiento ante la fatiga de los elementos. Se conectó la celda de carga al circuito acondicionador de señal, montado en una tarjeta de prototipaje, de igual manera se conectó con el microcontrolador PIC.

2) Integración de Partes Electrónicas

Se integraron los componentes para validar el correcto funcionamiento en conjunto, para ello se fabricó una tarjeta electrónica prototipada para verificar que los voltajes máximos y mínimos medidos, tuvieran el mismo comportamiento al estar en las configuraciones diseñadas y simuladas; de igual forma se evaluaron las condiciones térmicas por disipación de potencia de la tarjeta, analizando la influencia sobre el material del soporte y las lecturas provenientes del microcontrolador PIC.

3) Integración de Partes Informáticas

Se diseñó un algoritmo básico para comprobar el funcionamiento del acondicionador de señal y poder mostrar valores.

4.6.2.5 Etapa V: Integración de los Subsistemas del Ciclo A

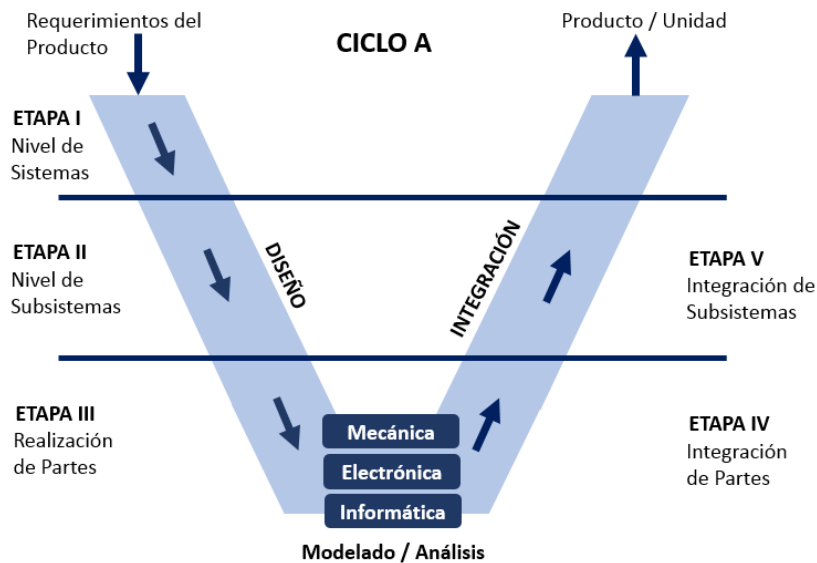


Ilustración 33-Etapa V del ciclo A

Fuente: Elaboración Propia

- 1) Tornillería: Se verificó que ninguno de los tornillos sufriese desgaste o por medio de la observación a partir de los análisis planteados.
- 2) Piezas de soporte: Se verificó que las piezas no sufrieran deformaciones plásticas o elásticas por la carga mecánica o debido al calor generado por la tarjeta electrónica un incremento en la temperatura del material, infiriendo con las galgas extensométricas afectando el algoritmo de interpolación lineal a presentar una lectura errónea.
- 3) Viga de celda de carga: Se verificó que no sufriera abolladuras o deformaciones plásticas debido a la carga o calentamiento por exceso de corriente en la tarjeta electrónica.
- 4) Amplificadores operacionales: Se incorporaron a la tarjeta electrónica de prototipaje con el circuito diseñado acoplado las dimensiones espaciales a la base del soporte.
- 5) Se incorporaron a la tarjeta electrónica de control: los capacitores, resistores y diodos Zener.
- 6) Se conectó el microcontrolador PIC a la tarjeta de control con un algoritmo básico.

4.6.2.6 Etapa VI: Integración de los Sistemas del Ciclo A

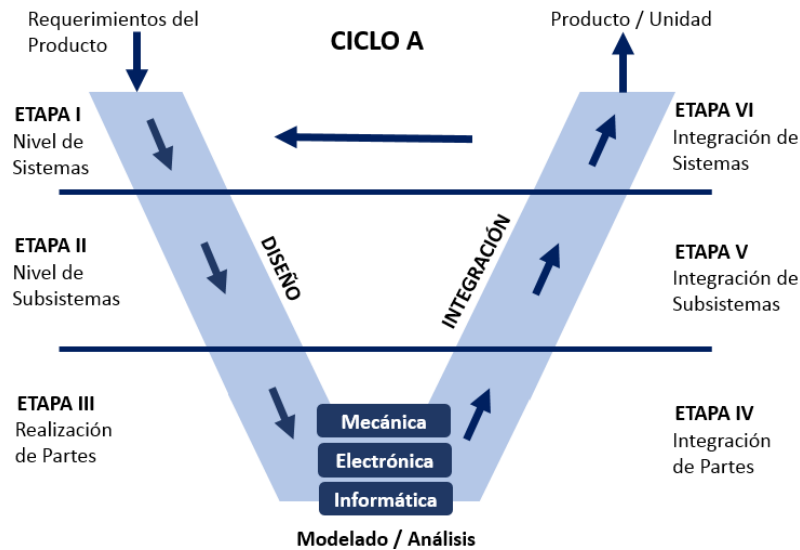


Ilustración 34-Etapa VI del ciclo A

Fuente: Elaboración Propia

- 1) Sistema mecánico: Se integró un soporte con una base para observar el comportamiento de los componentes mecánicos en conjunto, considerando los factores espaciales para el acoplamiento de los demás sistemas, se evaluó el funcionamiento.
- 2) Sistema Electrónico: Se incorporó la tarjeta electrónica de control a la base del soporte y se conectó la celda de carga al acondicionador de señal.
- 3) Sistema Informático: Se desarrolló un algoritmo en código programable para mostrar los valores procesados desde la celda de carga hasta el procesamiento de datos en el microcontrolador PIC.

4.6.2.7 Resultado del Prototipo Final del Ciclo A

Se obtuvo un prototipo integrando tres sistemas conjuntos, considerando los factores espaciales y analíticos, proporcionados por los resultados de las pruebas experimentales y simuladas, dando validación al producto como un prototipo sujeto a cambios por imprecisiones expuesto a funcionamiento no ideal.

4.6.3 CICLO B DE LA METODOLOGÍA “V”

Con base al resultado del prototipo de laboratorio, se tomaron medidas correctivas sobre las afectaciones directas o indirectas en los sistemas por los que está compuesto.

4.6.3.1 Etapa I: Nivel de los Sistemas del Ciclo B

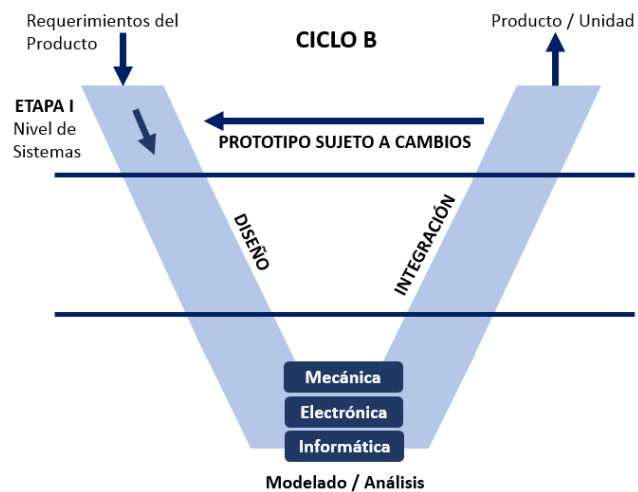


Ilustración 35-Etapa I del ciclo B

Fuente: Elaboración Propia

1) Sistema Mecánico

Se requirió un soporte de base para la estructura del proyecto. En donde se revisaron los inconvenientes que presentaron todas las partes mecánicas juntas.

2) Sistema Electrónico

Se requirió una tarjeta de control electrónico para el procesamiento y amplificación de señal proveniente de las galgas extensiométricas, que sea pequeña y compacta, con buena resolución y alta ganancia de voltaje. Se sometió a revisión tras haberse presentado como prototipo funcional, para implementar mejoras y respaldo de su funcionalidad.

3) Sistema Informático

Se requirió un algoritmo matemático que sea capaz de interpolar linealmente valores digitales, por medio de una ecuación algebraica que permita linealizar la respuesta en un microcontrolador PIC. Se observaron ciertos comportamientos lineales y estables.

4.6.3.2 Etapa II: Nivel de los Subsistemas del Ciclo B

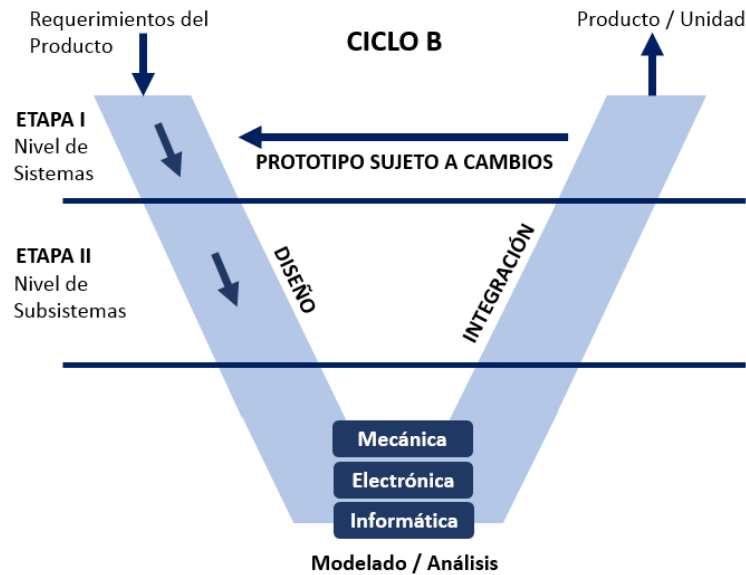


Ilustración 36-Etapa II del ciclo B

Fuente: Elaboración Propia

1) Subsistemas Mecánicos

1.1) Tornillería: se utilizaron medidas estándar milimétricas en la menor cantidad posible para reducir los costos, evaluando la resistencia de fuerza al ser acoplado con la celda de carga, se renovaron ciertas posiciones de los tornillos principales para ayudar a la sujeción de las demás partes.

1.2) Piezas de soporte: Se diseñaron piezas a la medida para la celda de carga, realizando un estudio de esfuerzos mecánicos, para determinar la carga máxima permisible. La cual no presentó anomalías.

1.3) Viga de la celda de carga: no se realizaron modificaciones.

2) Subsistemas Electrónicos

2.1) Amplificadores operacionales: se utilizaron estos circuitos integrados de alta ganancia de voltaje, con el objetivo de captar hasta la más mínima señal proveniente de las galgas extensiométricas. No se observó averías en los amplificadores operacionales.

2.2) Capacitores: Se cambiaron unos capacitores del diseño original para optimizar el área de la tarjeta electrónica y ahí reducir espacio dentro de la base.

2.3) Resistencias: Se rediseñó el circuito y se acomodaron en otras posiciones para optimizar los espacios.

2.4) Diodos Zener: se implementó un diodo Zener adicional para regular el voltaje de la entrada de la fuente.

3) Subsistemas Informáticos

Está compuesto por variables de entrada y salida. Para una mejor experiencia de la interfaz, se implementó una mejora, añadiendo un menú interactivo con el usuario, permitiéndole cambiar las unidades de medida, según la necesidad y los últimos valores de medida en la memoria EPROM del microcontrolador, permitiendo hacer revisión de medidas anteriores.

4.6.3.3 Etapa III: Realización de Partes del Ciclo B

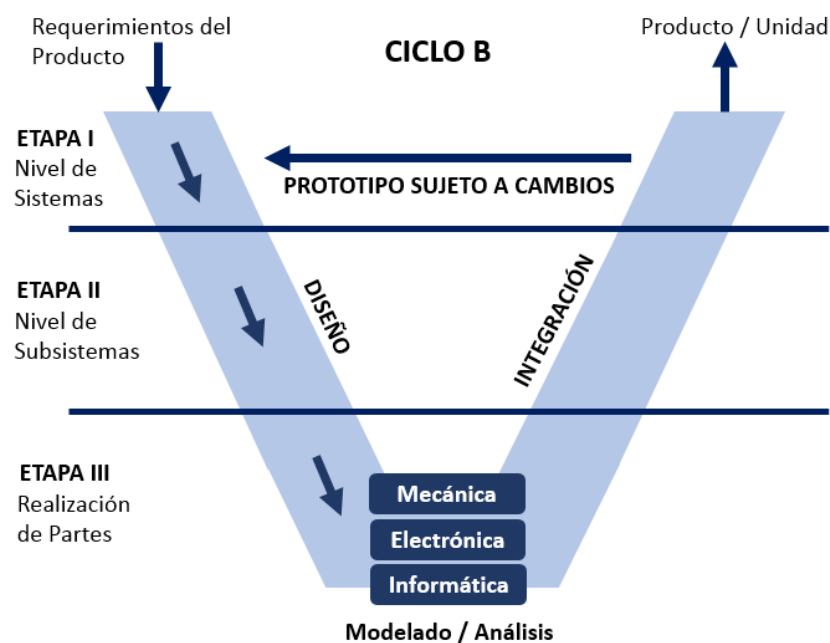


Ilustración 37-Etapa III del ciclo B

Fuente: Elaboración Propia

1) Partes Mecánicas

Se reevaluó la funcionalidad mecánica de las nuevas modificaciones en las piezas, como procedimiento para asegurar una mejora aditiva a la funcionalidad.

2) Partes Electrónicas

Se realizaron pruebas experimentales de voltaje y corriente con las configuraciones comunes de los amplificadores operacionales, capacitores, resistores y diodos Zener.

3) Partes Informáticas

Se realizaron pruebas experimentales de las variables de entrada y salida, cambiando la interfaz del menú, para la facilidad de funcionalidad.

4.6.3.4 Etapa IV: Integración de Partes del Ciclo B

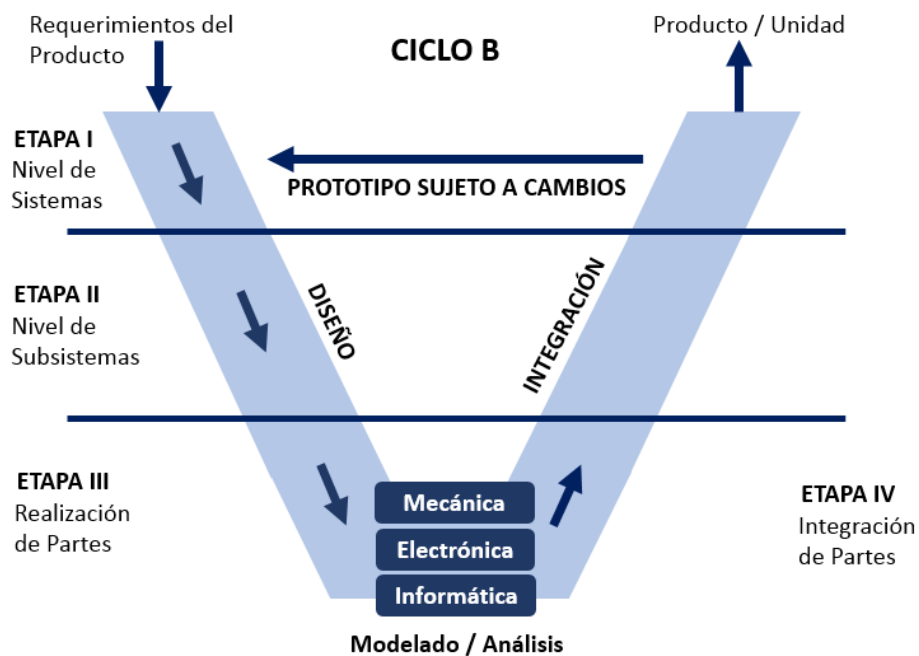


Ilustración 38-Etapa IV del ciclo B

Fuente: Elaboración Propia

- 1) Partes Mecánicas: Al integrar las nuevas partes mecánicas, se realizaron las pruebas de esfuerzos permisibles, colocando pesas de valores conocidos para validar la integración de los nuevos componentes.
- 2) Partes Electrónicas: Se integró la nueva tarjeta electrónica y se verificaron las condiciones espaciales

- Partes del domino informático: Se diseñó y simuló el nuevo algoritmo para facilitar el manejo de las unidades por medio del menú del usuario.

4.6.3.5 Etapa V: Integración de los Subsistemas del Ciclo B

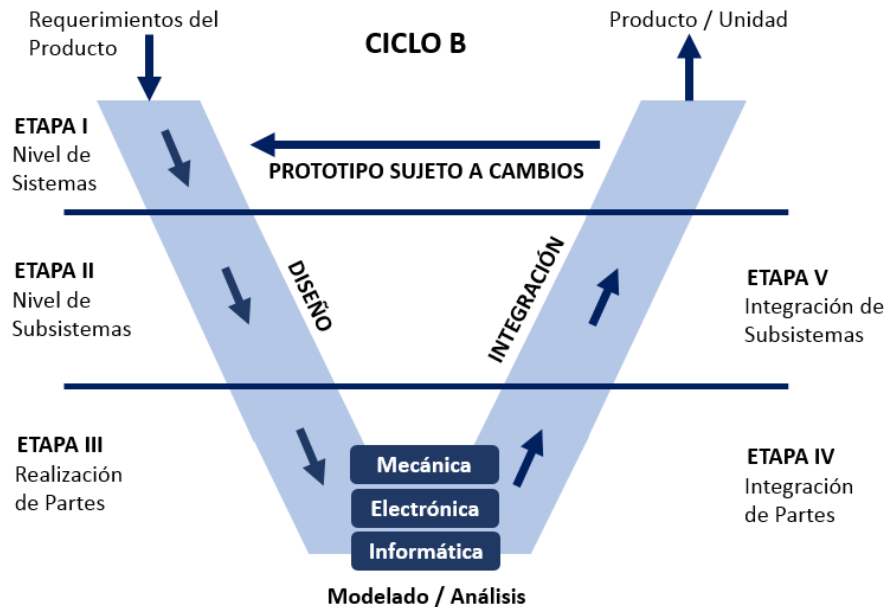


Ilustración 39-Etapa V del ciclo B

Fuente: Elaboración Propia

- Tornillería: Se realizó el cambio de las posiciones de los tornillos y se utilizaron tuercas para mejorar la sujeción en este diseño.
- Piezas de soporte: Se cambió la estructura, gracias a un nuevo diseño que mejora espacio y aprovecha las propiedades mecánicas para la disipación de calor y garantiza durabilidad.
- Viga de celda de carga: Se mantuvo la misma celda de carga.
- Amplificadores operacionales: Se soldaron en la nueva tarjeta electrónica y se sujetaron del soporte nuevo.
- Se incorporaron a la tarjeta electrónica de control: los capacitores, resistores y diodos Zener en un nuevo diseño reducido de espacio.
- Se conectó el microcontrolador PIC a la tarjeta de control con el algoritmo funcional implementando el menú y guardado de memoria en este.

4.6.3.6 Etapa VI: Integración de los Sistemas del Ciclo B

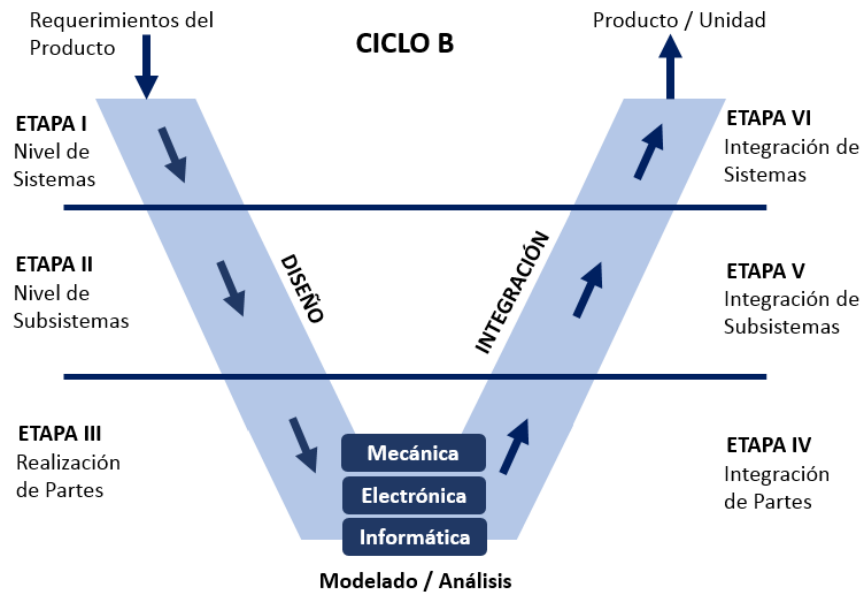


Ilustración 40-Etapa VI del ciclo B

Fuente: Elaboración Propia

- 1) Sistema mecánico: Se integró un nuevo y mejorado soporte con una base para observar el comportamiento de los componentes mecánicos en conjunto, considerando los factores espaciales para el acoplamiento de los demás sistemas, se evaluó el funcionamiento.
- 2) Sistema Electrónico: Se incorporó la nueva tarjeta electrónica de control a la base del soporte y se conectó la celda de carga al acondicionador de señal.
- 3) Sistema Informático: Se desarrolló un algoritmo en código programable para mostrar los valores procesados desde la celda de carga hasta el procesamiento de datos en el microcontrolador PIC adicionando un menú para el cambio de unidades de peso y guardado en memoria EPROM para la revisión de las últimas mediciones.

4.6.3.7 Análisis de Riesgos Mecánicos

Se planteó que, debido a la fatiga de los materiales al estar sometido a deformaciones mínimas, podría presentarse abolladuras, deformaciones plásticas o desgaste o por calentamiento de componentes electrónicos internos o por sobre corrientes.

4.6.3.8 Análisis de Riesgo Electrónico

La tarjeta electrónica, puede dañarse por picos de voltaje en la alimentación y mal suministro de corriente, se han pruebas para ver el comportamiento del sistema al someterse a estas condiciones.

4.6.3.9 Análisis de Riesgo Informático

Todo el procesamiento depende en gran parte de la señal proveniente del acondicionador de señal, existen riesgos, como desbordamiento del microcontrolador PIC, provocando el reinicio de este, adicionalmente afectaciones por el calentamiento en la disipación de calor de los dispositivos de potencia, generando perturbaciones para generar valores por medio del algoritmo matemático.

4.6.3.10 Resultado del Producto: Final del Ciclo "B"

Se obtuvo un producto integrando los tres sistemas mecatrónicos completamente funcional.

4.7 METODOLOGÍA DE VALIDACIÓN

Este proyecto ha de ser validado hasta comprobar el correcto funcionamiento de los componentes integrados. Se realizaron 60 pruebas en tarjetas de prototipaje y se comprobaron las señales provenientes de la celda de carga, aplicando cargas puntuales, en donde fueron mostrados los valores de voltaje.

4.8 CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

Considerando que el periodo de investigación consta de diez semanas, es adecuado organizar las tareas a realizar, llevando así un mejor control de todas las actividades y cerciorándose que ninguna de ellas quede sin ejecutarse, asegurando obtener los resultados en un tiempo aproximado, como se presenta en la ilustración 41.

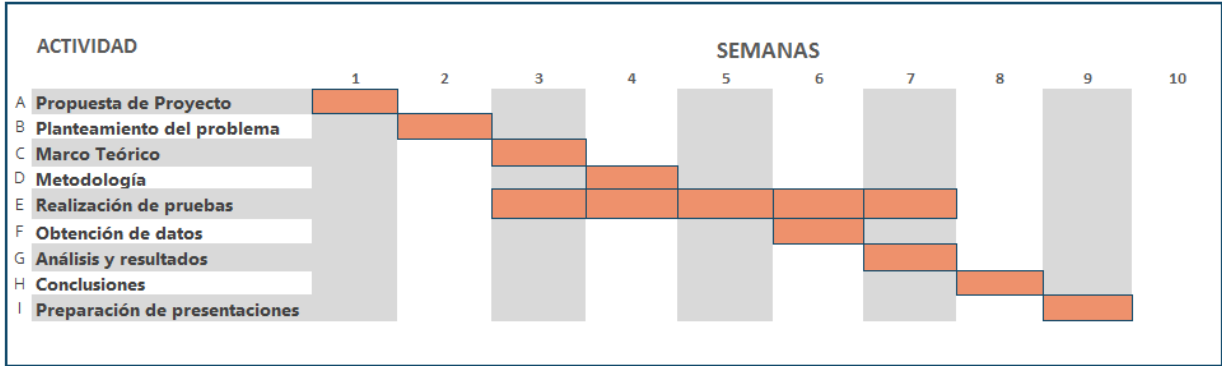


Ilustración 41-Cronograma de actividades

Fuente: Elaboración Propia

CAPÍTULO V. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se muestra el resultado y análisis a través del desarrollo de la metodología del proyecto de investigación, donde se realizaron pruebas y simulaciones para la validación de resultados.

5.1 ANÁLISIS DE SUSTENTO DEL MARCO TEÓRICO

En este apartado se recabó la información para la realización de cálculos necesarios para el desarrollo del acondicionador de señal. Para lograr tomar medidas de peso, es requerido un conjunto de sistemas, los cuales en sincronía pueden generar valores de voltaje y de esta manera procesar esos datos en un microcontrolador utilizando el conversor análogo - digital. Para esto se requiere el diseño de un circuito de amplificadores con ganancia de voltaje, para convertir valores muy pequeños a valores permisibles en los microcontroladores. Se realizaron los cálculos y simulaciones para estudiar los comportamientos de los materiales, componentes electrónicos y sistema a nivel de software.

5.2 DESARROLLO CICLO A: SISTEMA MECÁNICO

Requiere una estructura de un material resistente a las deformaciones mecánicas, que está sujetado por una viga en voladizo de aluminio.

5.2.1 CÁLCULOS DE MECÁNICA

Se realizó el cálculo de momento de inercia para la viga de sección cuadrada:

$$I = \frac{bh^3}{12}$$
$$I = \frac{(0.011 \text{ m})(0.011 \text{ m})^3}{12}$$
$$I = 1.22 \times 10^{-9} \text{ m}^4$$

Para luego obtener la constante de rigidez de la viga:

$$K = \frac{3EI_{yy}}{l^3}$$

$$K = \frac{3 (7 \times 10^{10} \frac{N}{m^2})(1.22 \times 10^{-9} m^4)}{(50 \times 10^{-3} m)^3}$$

$$K = 2.0496 \times 10^6 \frac{N}{m}$$

La fuerza aplicada a la viga quedará expresada en función del cambio de deformación elástica como:

$$F(x) = (2.0496 \times 10^6) \Delta x$$

Esto nos indica, que el valor de constante K es un valor muy grande debido a que los cambios Δx en la viga donde se encuentran las galgas extensiométricas, se expone a deformaciones de elongación muy pequeñas.

5.2.2 DISEÑO DE SISTEMA DE CONTROL MECÁNICO

El presente sistema de control nos permite relacionar la fuerza aplicada sobre la plataforma con el voltaje que son capaces de entregar las galgas extensiométricas. Se expresa de esta forma en el dominio de la frecuencia, donde el voltaje está en función de la deformación unitaria ϵ del conductor del cual está fabricada la galga extensiométrica.

$$v_i(s) = \frac{F(s) i(s)}{E \epsilon}$$

5.2.3 SIMULACIÓN DE ESFUERZOS EN EL SISTEMA MECÁNICO

Se realizó un estudio para visualizar como los esfuerzos mecánicos pueden deformar la plataforma y afectar así, directamente la celda de carga, ver ilustración 42. Esto fue crucial para determinar la longitud y el grosor de la plataforma de pesaje, de esta manera se garantiza que la masa que será pesada no deforme o no la incline para evitar errores adicionales con las muestras de masa y de esta forma lograr tomar consideraciones al integrar el sistema de control electrónico y el informático.

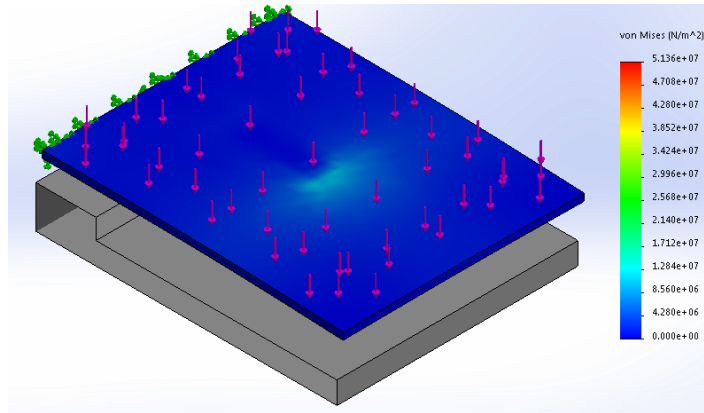


Ilustración 42-Análisis de Esfuerzos mecánicos sobre la plataforma

Fuente: Elaboración Propia

El análisis llevado a cabo demuestra las deformaciones, siendo azul la menor deformación y rojo la mayor. Según la ecuación que relaciona fuerza con deformación la constante K determina la máxima fuerza para desplazar 1 metro de deformación, por lo tanto, $7 \times 10^{10} \frac{N}{m^2}$ es el módulo máximo permisible, al buscar este valor en la escala de color, se comparó que se encuentra en la zona segura y que no es posible la ruptura dentro de sus rangos de medición de la báscula.

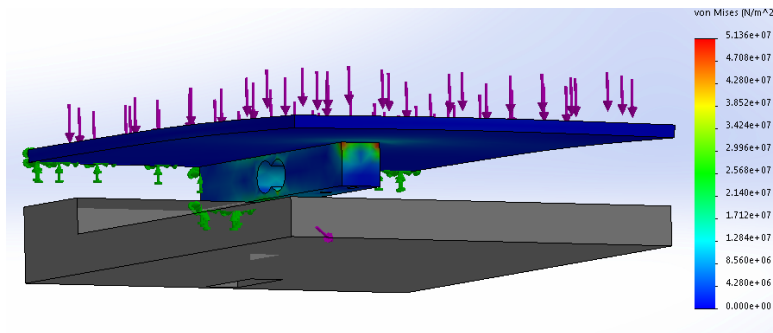


Ilustración 43-Análisis de esfuerzos mecánicos en la celda de carga.

Fuente: Elaboración Propia

Al observar este comportamiento de flexión sobre la plataforma, elaborada con el material ABS, se sugiere que la plataforma aumente su grosor para evitar la deformación o implementar una plataforma de un aluminio.

5.3 DESARROLLO CICLO A: SISTEMA CONTROL ELECTRÓNICO

5.3.1 PRUEBAS EXPERIMENTALES Y CÁLCULOS MATEMÁTICOS

Se requiere un acondicionador de señal con amplificadores de ganancia para convertir valores de voltaje muy pequeños a un voltaje permitido por los conversores ADC. Se realizaron los cálculos de los circuitos amplificadores.

Se aplicó 12.35 voltios a la celda de carga, para determinar cuál es el voltaje máximo entregado por esta gracias al divisor de tensión que genera el puente de Wheatstone incorporado. Se obtiene una medida máxima de voltaje en la celda de carga, al estar alimentada con 12.35 voltios:

Tabla 2-Voltaje proveniente de las galgas extensiométricas

| | |
|---------------------------|--------|
| Voltaje Máximo de entrada | 1.4 mV |
| Voltaje Mínimo de Entrada | 0.0 mV |

Fuente: Elaboración Propia

Se calcula la sensibilidad partiendo del voltaje aplicado, de acuerdo con la ecuación 1, el voltaje de fondo entregado por la celda de carga dividido por el voltaje de alimentación se obtiene:

$$sensibilidad = \frac{1.4 \times 10^{-3} v}{12.35 v}$$

$$sensibilidad = 0.11 \frac{mV}{V}$$

Esto nos indica que es requerido 0.11 mV por parte de la celda de carga para generar 1 voltio a la salida del acondicionador de señales, permitiendo establecer los rangos de peso en la báscula digital.

Al conectarse en la primera etapa de amplificación al amplificador operacional, se obtuvo un valor máximo de voltaje amplificado respectivamente a lo anterior:

Tabla 3-Voltaje proveniente de los amplificadores

| Voltaje proveniente del amplificador operacional LM358 | |
|--|---------|
| Voltaje Máximo de Salida | 10.10 V |
| Voltaje Mínimo de Salida | 0.010 V |
| Voltaje proveniente del amplificador operacional LM324N | |
| Voltaje Máximo de Salida | 9.960 V |
| Voltaje Mínimo de Salida | 0.012 V |
| Voltaje proveniente del amplificador operacional UA741 | |
| Voltaje Máximo de Salida | 9.560 V |
| Voltaje Mínimo de Salida | 0.010 V |

Fuente: Elaboración Propia

Obtenido estos valores, se determina utilizar el amplificador operacional LM358, el fabricante proporciona la razón de rechazo en modo común (80 decibeles) y nos es posible determinar el valor de ganancia en modo común; debido a su mayor ganancia en modo diferencial, así se puede calcular está en la primera etapa amplificadora como:

$$A_0 = \frac{V_o}{V_i - V_g}$$

$$A_0 = \frac{10.01 \text{ v}}{1.4 \times 10^{-3} \text{ v} - 0 \text{ v}}$$

$$A_0 = 7214.28$$

En la primera etapa de amplificación configurada en modo diferencial puede entregar un voltaje de ganancia, que se describe como:

$$V_o = 7214.28 (V_i - V_g)$$

Esto sugiere que los cambios de voltaje pequeños, en el orden de los milivoltios, pueden llegar a generar un voltaje de salida mayor, proporcionalmente a este, brindando a cualquier configuración conectado a un amplificador operacional, una ganancia alta de voltaje. Esto nos permite calcular la ganancia en modo común, con los datos proporcionados por el fabricante; están conectadas de esta forma las galgas extensiométricas por medio del puente de Wheatstone, la ecuación describe la razón de rechazo en modo común en decibeles como:

$$CMRR = 20 \log_{10} \left(\frac{A_{ol}}{A_{cm}} \right)$$

$$80 \text{ dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{7214.28}{A_{cm}} \right)$$

$$A_{cm} = 0.7214$$

Esto nos indica que el 72.14 % es de la ganancia y permite rechazar 80 decibeles de ruido para amplificar las pequeñas diferencias de voltaje generados por el puente de Wheatstone a tensión o compresión en la galga.

Una vez realizada la conexión de la etapa diferencial, se obtiene una salida de voltaje filtrada por medio de un capacitor electrolítico de $0.81\mu\text{F}$, donde el valor de este capacitor fue determinado con base a pruebas experimentales. Se realiza un divisor de voltaje con la finalidad de minimizar más la señal de entrada del segundo amplificador, ayudando a disminuir el ruido eléctrico. Se obtiene la corriente que circula a la salida del amplificador y según la ecuación describe una malla en el circuito de salida como:

$$V_i = \frac{(R_3 + R_4)}{A_0} i$$
$$1.4 \times 10^{-3} = \frac{(100 + 220)}{7214.28} i$$
$$i = 31.5 \text{ mA}$$

Luego es posible determinar el valor de voltaje de la siguiente etapa por medio del siguiente cálculo de circuitos; asumimos que la circulación de corriente por la terminal no inversora de amplificador es despreciable, se obtiene que:

$$V_{R4} = V_{i2} = iR_4$$
$$V_{R4} = (31.5 \times 10^{-3} \text{ A})(220\Omega)$$
$$V_{R4} = 6.93 \text{ v}$$

Esto es comprobado por medio de la aproximación realizada en el simulador, donde utilizamos un voltímetro virtual para ver el resultado.

5.3.2 PRUEBAS A NIVEL DE SIMULADOR

Estos estudios por medio de simulaciones, se realizaron con la finalidad de validar el funcionamiento del circuito, proporcionando facilidad para constatar los fundamentos teóricos y matemáticos expuestos anteriormente, se garantizó la reducción de costos y tiempo pues se evitó dañar o emplear un dispositivo erróneamente, en razón a la metodología implementada.

Se realizó una simulación para hacer sustento del análisis matemático, relacionado al voltaje de entrada, salida y la ganancia producida por el amplificador operacional en esta primera etapa de amplificación. Se conecta un filtro de pasa bajas, así evitamos los ruidos eléctricos provenientes de las galgas extensiométricas y así reducir valores que vuelven inexacta la lectura. Los valores de los capacitores son determinados bajo pruebas experimentales y en fundamento a los circuitos comunes para dichos filtros pasa bajas, como se muestra en la ilustración 44.

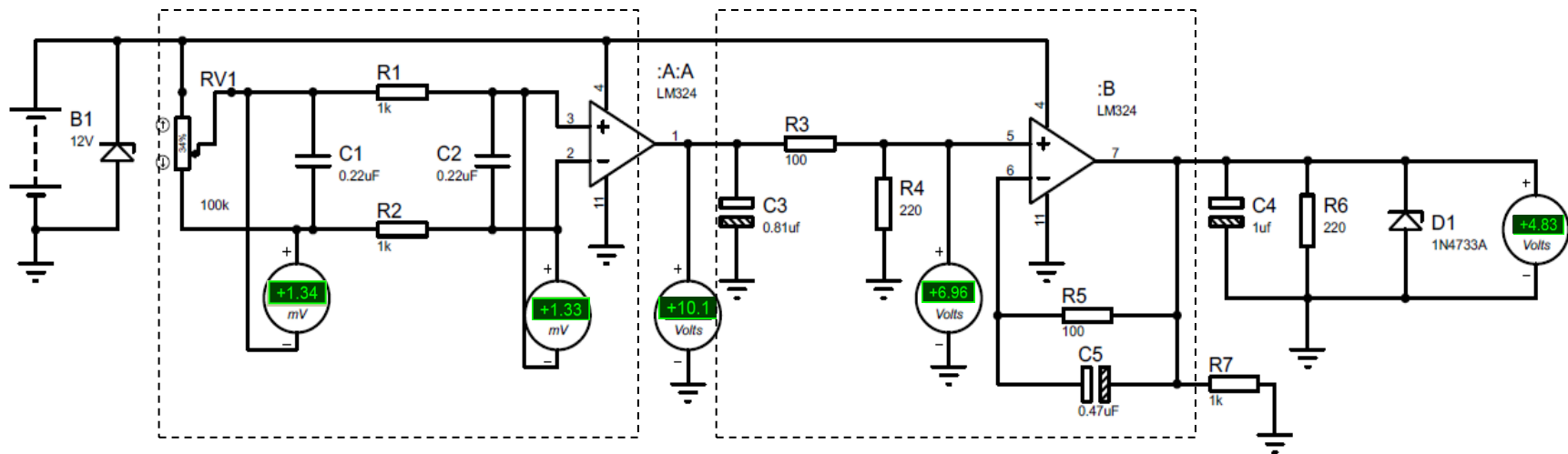


Ilustración 44-Dos etapas de amplificación

Fuente: Elaboración Propia

Debido a la alta ganancia en modo diferencial en el divisor de tensión que se genera en el puente de Wheatstone, es posible entregar un voltaje mayor, para ello se aseguró reducir los picos de voltaje conectando un capacitor para reducir voltajes bruscos durante las mediciones, a continuación, se muestran los resultados de la simulación comprobando los valores tomados por las lecturas del voltímetro

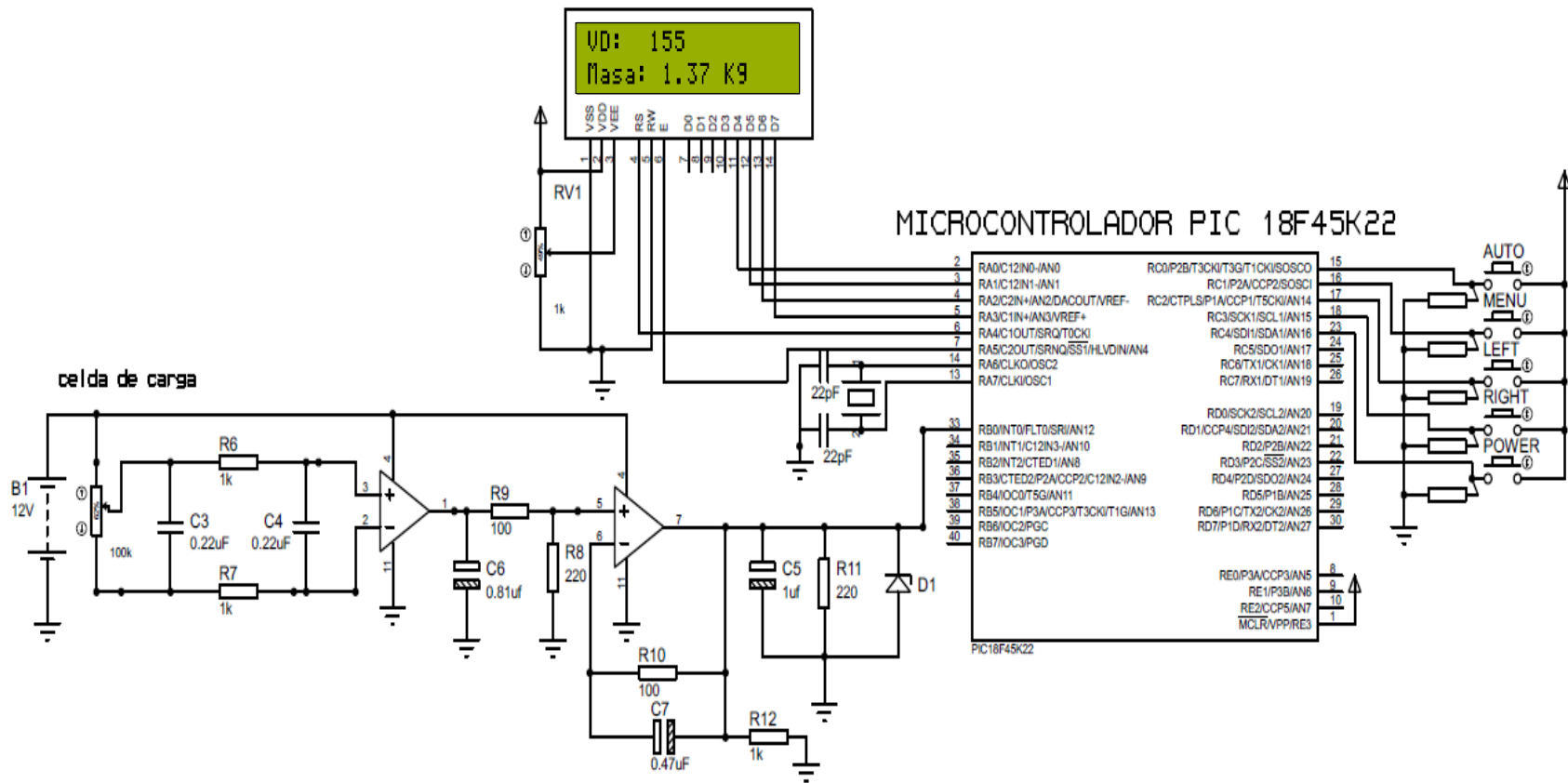


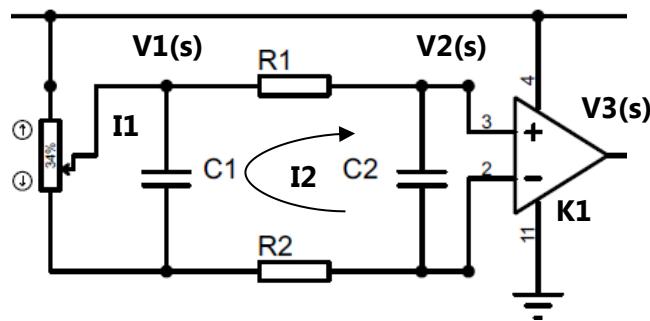
Ilustración 45-Integración de subsistemas electrónicos

Fuente: Elaboración Propia

Al validar el funcionamiento de los subsistemas electrónicos se integran estos para ser conectados con el microcontrolador PIC, la pantalla LCD y la matriz de botones, a continuación, se presenta el diagrama de conexiones y se muestran los puertos del microcontrolador que se utilizaron para esta aplicación. Al integrar estos dispositivos se garantizó que los valores de las resistencias y capacitores, fueran los mas acertados, asimismo con los amplificadores operacionales, considerando la razón de rechazo en modo común (CMRR); luego de haber insertado un algoritmo basico, se obtuvo un resultado esperado, donde muestra valores digitales de 10 bits virtual.

5.3.3 DISEÑO DE SISTEMA DE CONTROL ELECTRÓNICO

En la primera etapa se obtuvo la función de transferencia relacionando el voltaje de entrada y salida al aplicar el concepto de circuitos eléctricos en la malla cerrada, considerando que la circulación de corriente en las terminales del amplificador operacionales es nula:



$$\frac{1}{c_1} \int (i_1 - i_2) dt + R_1 i_2 + \frac{1}{c_2} \int (i_2) dt + R_2 i_2 = 0$$

Se cambian los valores al dominio de la frecuencia utilizando el concepto de la transformada de Laplace, se sabe que el voltaje de los capacitores se expresa como:

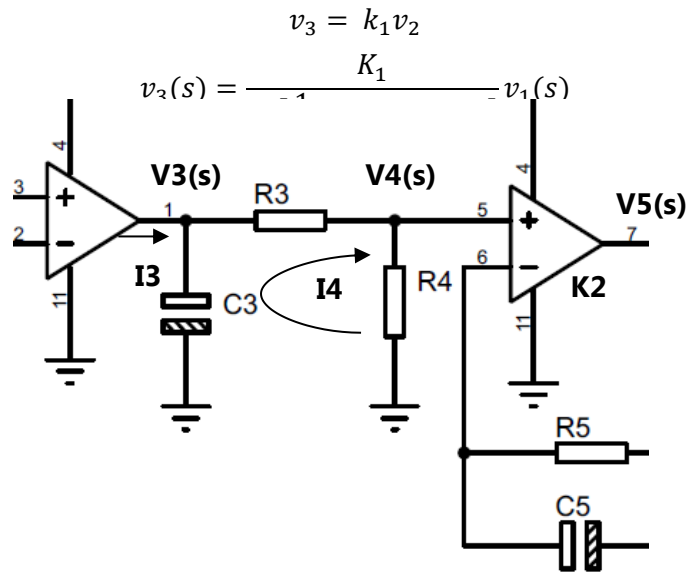
$$v_1(s) = \frac{1}{c_1 s} i_1(s) \quad v_2(s) = \frac{1}{c_2 s} i_2(s)$$

$$\frac{1}{c_1 s} i_1(s) - \frac{1}{c_1 s} i_2(s) + \frac{1}{c_2 s} i_2(s) + R_2 i_2(s) + R_3 i_3(s) = 0$$

Al sustituir la función de la corriente en esta ecuación, se expresa en términos del voltaje y al despejar se obtiene:

$$\frac{v_2(s)}{v_1(s)} = \frac{1}{C_2[\frac{1}{C_1} - s(R_3 + R_4)]}$$

Se determinó que el voltaje a la salida del amplificador operacional es producto de la ganancia por el voltaje de entrada, por eso se considera y se sustituye en la función para relacionar v_3 con v_1 :



Calculando la función de transferencia para la segunda etapa, en la malla cerrada del circuito, se obtiene en el dominio del tiempo:

$$\frac{1}{c_3} \int (i_3 - i_4) dt + i_4(R_3 + R_4) = 0$$

Aplicando la transformada de Laplace para la ecuación de la malla, se encuentra la función de transferencia y se relaciona el voltaje v_4 con el voltaje v_3 :

$$v_3(s) = \frac{1}{c_3 s} i_3(s) \quad v_4(s) = R_4 i_4(s)$$

$$\frac{1}{c_3 s} i_3(s) - \frac{1}{c_3 s} i_4(s) + i_4(s)(R_3 + R_4) = 0$$

$$\frac{v_4(s)}{v_3(s)} = \frac{R_4}{(c_2 s)^2 [\frac{1}{C_3 s} + R_3 + R_4]}$$

El voltaje de salida v_5 en la segunda etapa de amplificación se expresa como producto de la ganancia por el voltaje v_4 de la entrada:

$$v_5 = K_2 v_4$$

$$v_5(s) = \frac{R_4 K_2}{(c_2 s)^2 \left[\frac{1}{C_3 s} + R_3 + R_4 \right]} v_3$$

Al haber relacionado todas las funciones de transferencia por etapas se sustituye la función de transferencia del sistema mecánico con la del voltaje de entrada y se obtiene una completa respuesta en el dominio del tiempo donde la fuerza $F(s)$ es la entrada y el $V(s)$ es el voltaje de entrada en la celda de carga.

$$G(s) = \frac{V_o(s)}{F(s)} = \frac{R_4 K_1 K_2}{E \epsilon C_2 (C_3)^2 \left(\frac{1}{C_3 s} + R_3 + R_2 \right) \left(\frac{1}{C_1} - R_1 s - R_2 s \right)} i(s)$$

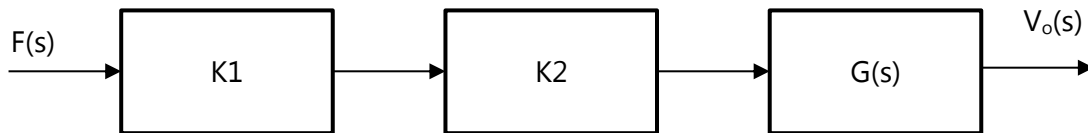


Ilustración 46 – Diagrama de bloques del sistema simplificado.

Fuente: Elaboración propia

Al evaluar la función de transferencia se obtiene la respuesta en el dominio del tiempo, utilizando el software Matlab, se insertan los valores del numerador y denominador en el comando y este generó una grafica, que permite visualizar como la respuesta tarda aproximadamente de 25 a 40 segundos para llegar al valor ideal o esperado gracias al acondicionador de señal y la adquisición de datos en el microcontrolador PIC; esta función es un sistema de control en lazo abierto, donde no existe control directo sobre la respuesta del pesaje. Se muestra a continuación la respuesta natural del sistema:

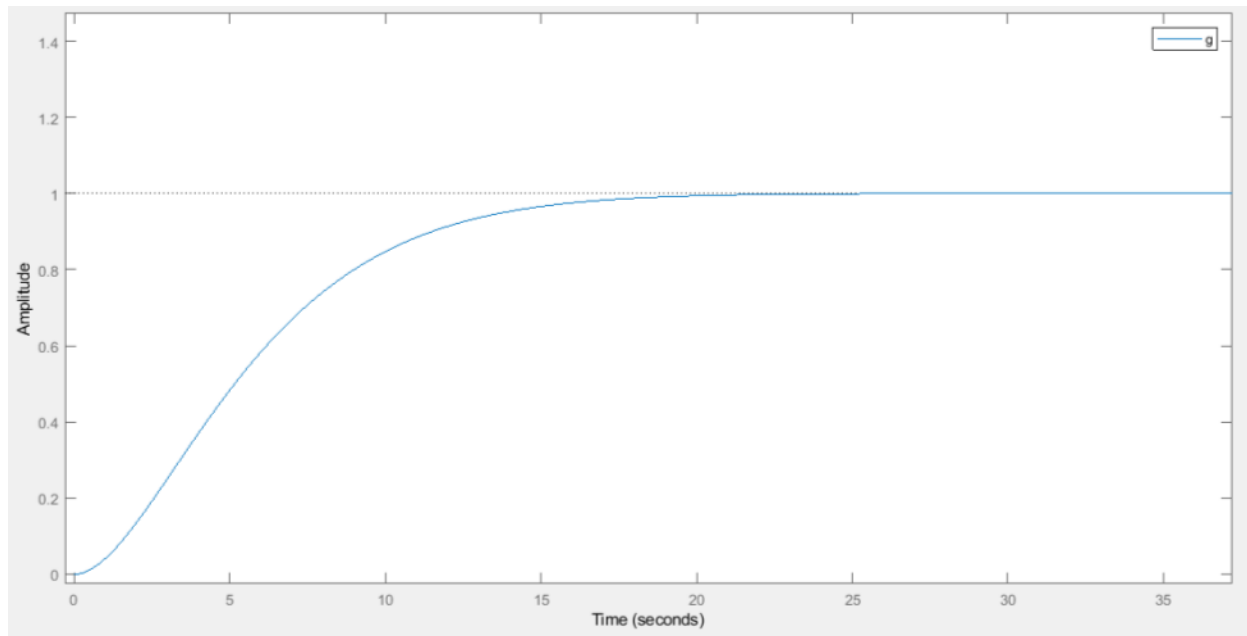


Ilustración 47-Respuesta natural en el sistema en el dominio del tiempo

Fuente: Elaboración Propia

Este estudio nos permite analizar como la respuesta del sistema en la planta puede afectar debido a factores como las minimas vibraciones mecánicas que no son perceptibles y pueden llegar a alterar la lectura final de los valores mostrados en la pantalla LCD, factores que se tomaron en cuenta para la estructura del algoritmo, a este se le establece el tiempo reflejado de espera para el procesamiento, adicionalmente, esta respuesta fue consiferada para cambiar valores de los capacitores de la ultima de etapa de amplificación, los cuales son responsables de este tiempo.

5.4 DESARROLLO CICLO A: SISTEMA INFORMÁTICO

Se requirió un algoritmo para lograr mostrar las conversiones realizadas por el microcontrolador PIC, el cual permita por medio de una variable, almacenar valores digitales, posteriormente evaluar la ecuación característica de la interpolación lineal, mostrando finalmente un valor de peso o masa con las unidades respectivas.

5.4.1 ALGORITMO PARA DETERMINAR VALORES DIGITALES

Se empleó un compilador en lenguaje de programación C y se realizó el algoritmo básico para tomar la lectura de los valores, utilizando la librería de conversión ADC (Analog Digital Converter),

se configuró un puerto análogo como entrada, se asignó una variable para almacenar el valor, de esta forma se observó que no eran estables, pero a pesar de ello los valores tienen una tendencia de convergir en un punto. Se muestra el diagrama lógico de bloques empleado para detectar este error en la ilustración 47.

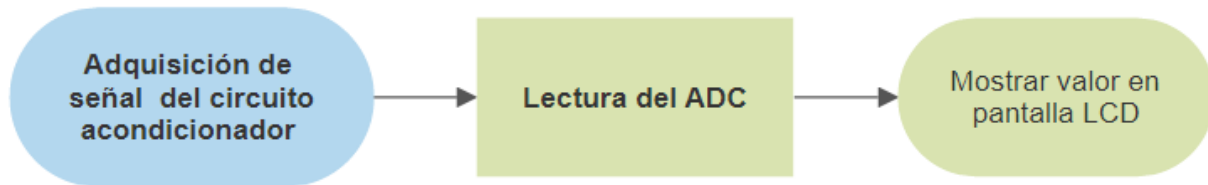


Ilustración 48-Diagrama lógico de bloques básico para adquisición de señal

Fuente: Elaboración Propia

Para realizar la calibración y encontrar una ecuación lineal, se debe asignar otras variables dentro de los comandos, para almacenar valores. Debido a la inestabilidad que se presenta en la lectura de estos, es requerido utilizar un concepto estadístico, para precisar un valor acertado basándose en este teorema, con este corregimos los valores aleatorios. Fundamentándonos en el teorema débil de los grandes números de la estadística, hacen devolver un valor esperado cuando la muestra tiende al infinito, se describe como se muestra en la ecuación 11.

$$\bar{X}_n = \frac{X_1 + X_2 \dots X_n}{n}$$

Ecuación 11-Media de la ley débil de los grandes números

Esto nos indica que al sumar números aleatorios dentro de un rango permisible o convergiendo un valor específico, devuelve el valor que se espera, cuando en esta muestra llega existir una convergencia en la probabilidad donde μ es el valor esperado y esta diferencia se es menor que ϵ que es un valor cualquiera, esto es igual a 1, por lo tanto, el valor a obtener es el deseado:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P(|\bar{X}_n - \mu| < \epsilon) = 1$$

Ecuación 12-Ley débil de los grandes números

Aplicando el concepto expuesto, se desarrolla otro algoritmo en el cual, se toma la muestra de los valores que aleatoriamente; primero toma las señales de voltaje provenientes del circuito acondicionador de señal, para luego tomar los primeros 1000 valores y presentar una muestra

corregida y estable en la pantalla LCD, también se permite verificar si hay alguna irregularidad en el muestreo, brindando reiniciar el proceso para volver las variables a 0, tal como se visualiza en la ilustración 48.

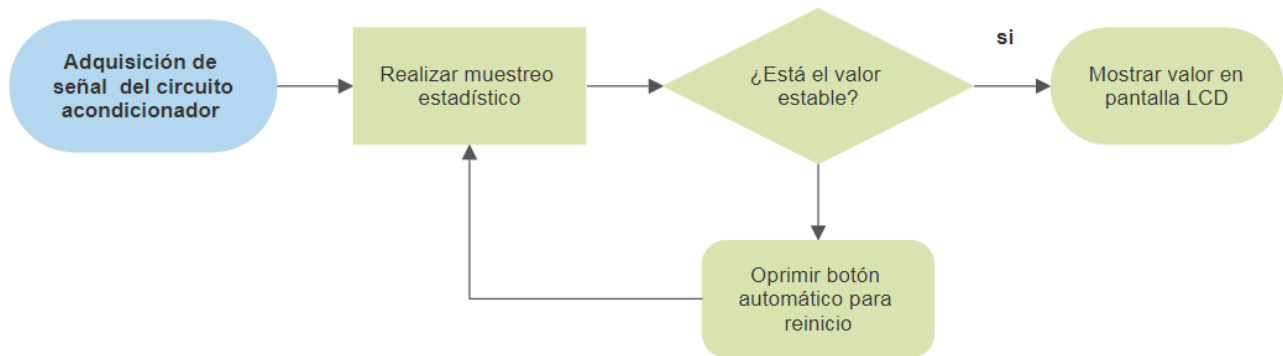


Ilustración 49-Diagrama lógico de bloques corrector de lectura

Fuente: Elaboración Propia

En la adquisición de señal del acondicionador, se presentan valores de voltaje entre 0 y 5 voltios, estos son interpretados por el puerto análogo del microcontrolador, como una señal de 10 bits, tomado de 0 a 9, guardando en su muestreo 1024 valores, tomado de 0 a 1023, siendo este el representativo a 5 voltios; adquiridos estos valores, son expuestos a la aplicación de un comando que realiza la muestra final, primeramente realiza una sumatoria de 1000 valores tomados del puerto y almacena los valores en una variable de tipo "Long", debido a que esta tiene rangos muy amplios que van desde -2,147,483,648 hasta el otro extremo positivo, esto permite que la sumatoria no se limite o devuelva muestras erróneas; La sumatoria de estos valores se divide entre la cantidad de muestras tomadas, en esta ocasión son 1000 números, esta media obtenida debe de ser guardada en otra variable, en este caso será tipo "Int" debido a que el rango de la muestra no supera los 1024 caracteres además, estos valores no pueden contener decimales debido a que es una conversión de una señal análoga a digital. Finalmente, este valor se muestra por medio de la pantalla LCD, y está listo para comenzar la calibración.

```

. ////////////////////////////////////////////////////
. void calcular_valor() {
.     for(i=0;i<1000;i++) {
.         valor=adc_read(12);
.         sumatoria=sumatoria+valor;
.     }
.     muestra = sumatoria/1000;
. }
. ////////////////////////////////////////////////////

```

30

Ilustración 50-Algoritmo de muestra

Fuente: Elaboración Propia

Estos comandos están incluidos en una estructura de función, la cual es invocada en la función principal de ejecución, se utiliza el bucle "For", este repite el código interno mil veces para obtener la muestra y luego esta ser presentada en la pantalla LCD para este proceso de calibración.

Este código está basado en la ecuación de la ley débil de los grandes números para encontrar la media, por lo tanto, en esta resolución se utilizarán 1000 valores para determinar la media en la lectura de los valores digitales, matemáticamente se interpreta de la siguiente manera:

$$\bar{Y} = \sum_{n=1}^{n=1000} \frac{k_1 + k_2 \dots k_n}{n}$$

5.4.2 ANÁLISIS Y OBTENCIÓN DE ECUACIÓN LINEAL

Para realizar un código de programación que pueda interpretar los valores que entrega el puerto análogo del microcontrolador, se requiere una ecuación matemática que represente la recta lineal con respecto a la masa, la cual al momento de calibrarse son conocidas. Esta ecuación será la responsable de almacenar valores en una variable, para ser mostrados en una pantalla LCD; Los resultados de esta calibración se colocan en la tabla 4.

Tabla 4-Resultados de calibración

| Valor digital | Voltaje | Masa | Valor digital | Voltaje | Masa |
|---------------|---------|---------|---------------|---------|---------|
| 76 | 0.37 V | 1.10 kg | 510 | 2.49 V | 2.67 kg |
| 112 | 0.54 V | 1.20 kg | 576 | 2.81 V | 2.81 kg |
| 122 | 0.59 V | 1.40 kg | 601 | 2.93 V | 3.01 kg |
| 152 | 0.74 V | 1.60 kg | 646 | 3.15 V | 3.21 kg |
| 201 | 0.98V | 1.80 kg | 698 | 3.41 V | 3.41 kg |
| 257 | 1.25V | 2.01 kg | 731 | 3.57 V | 3.61 kg |
| 302 | 1.47 V | 2.21 kg | 835 | 4.08 V | 3.81 kg |
| 365 | 1.78 V | 2.41 kg | 904 | 4.41 V | 4.01 kg |
| 419 | 2.04V | 1.10 kg | 1022 | 4.99 V | 4.41 kg |

Fuente: Elaboración Propia

Al haber obtenido estos resultados, se toman estos valores para interpolarlos y evaluar los posibles rangos de error presentes debido a la inestabilidad en la lectura del puerto análogo del microcontrolador PIC. Al analizar los valores se obtiene una gráfica con tendencia lineal, donde, además, se obtiene la ecuación característica lineal:

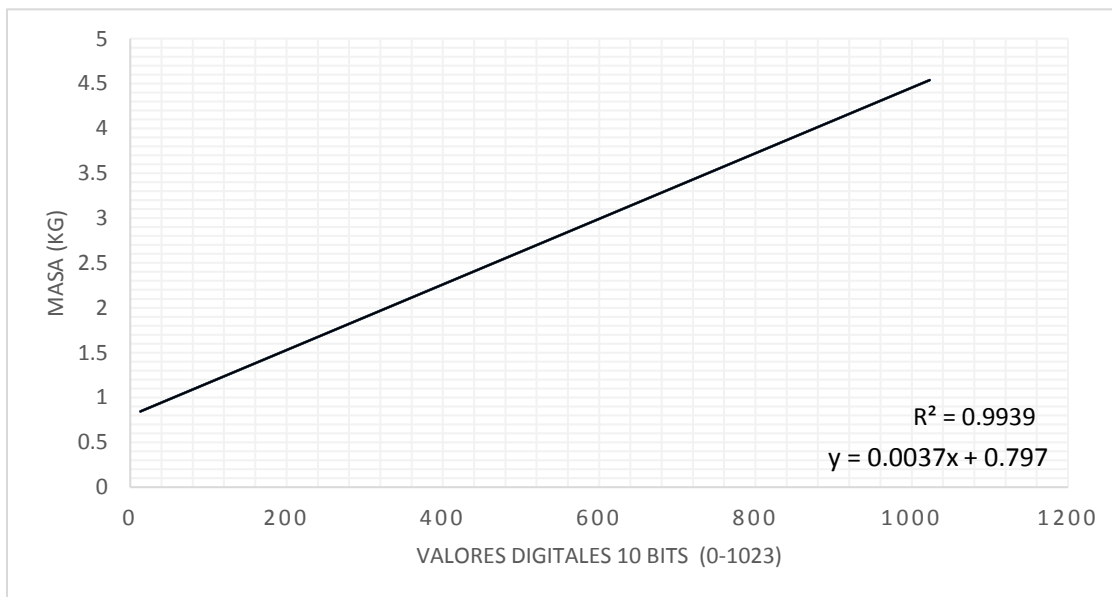


Ilustración 51-Interpolación lineal

Fuente: Elaboración Propia

En este gráfico mostrado, nos devuelve el coeficiente de determinación, también es conocido como R cuadrado; Determina la precisión que tendrán los futuros valores al ser calculados por la

ecuación de interpolación lineal, esta se determina mediante una ecuación que explica la razón entre la varianza y la media de los valores al cuadrado, se expresa como:

$$R^2 = \frac{\sum_{t=1}^{T=1000} (\hat{Y} - \bar{Y})^2}{\sum_{t=1}^{T=1000} (Y - \bar{Y})^2}$$

Se logra apreciar la tendencia de linealidad que resulta como respuesta del acondicionador de señal y la aplicación de un algoritmo básico, para la lectura de valores de 10 bits, es decir dentro del rango de 0 a 1023 valores cuando el voltaje máximo en el puerto análogo es de 5 voltios. Para este caso se determinó la siguiente ecuación, en la cual Y representa la masa en Kg y el valor de x representa los valores digitales de 10 bits.

$$m = 0.0037x + 0.797$$

Ecuación 13-Ecuación lineal para determinar masa

Para determinar el porcentaje de error en la lectura, luego de haber aplicado el concepto de la ley débil de los números grandes, se aplica la ecuación:

$$\% \text{ error lineal} = \frac{|\text{Valor medido} - \text{Valor real}|}{\text{Valor real}} \times 100$$

Para calcular el porcentaje de error máximo en el proceso de calibración se utiliza el punto de dispersión más alejado de la recta, pero primero se realiza el cálculo de la masa con la ecuación lineal encontrada:

$$m = 0.0037(576) + 0.797$$

$$m = 2.92 \text{ kg}$$

Esta masa encontrada a través del cálculo representa la mostrada en la pantalla LCD, puesto que la ecuación lineal definitiva dispone los valores generales, se determina que el error máximo entre el valor real y el aproximado por medio de:

$$\% \text{ error lineal} = \frac{|2.92 \text{ kg} - 2.89 \text{ kg}|}{2.89 \text{ kg}} \times 100$$

$$\% \text{ error lineal} = 1.03 \%$$

Este margen de error máximo representa que puede variar por 1.03% por encima o debajo del valor real, debido a la varianza en la calibración. En el caso del punto dispersado más lejano de la recta lineal. En el caso anterior se interpreta que 2.92 kg tiene un error de 10 gramos máximo.

5.5 RESULTADOS DEL CICLO A

Se obtuvo un prototipo funcional, donde se integraron los sistemas mecatrónicos para poder analizar, diseñar e implementar un dispositivo auténtico para el pesado, utilizando un microcontrolador PIC. Se diseñó un sistema de control electrónico acondicionador de señales para las celdas de carga, donde se acopló a un sistema mecánico adecuado para presentar un prototipo funcional, validando la hipótesis establecida, se logró apreciar la funcionalidad a nivel de simulación para los esfuerzos mecánicos y correcciones electrónicas utilizando estas herramientas ingenieriles, que tienen a la disposición los ingenieros tomar decisiones para mejorar y evitar imprevistos durante la creación de un producto en la mecatrónica; empleando la metodología V.

5.6 DESARROLLO CICLO B: SISTEMA MECÁNICO

Se requirió Rediseñar una estructura de base con características de acoplamiento por partes, para facilitar la ubicación de la tarjeta electrónica, que contiene el microcontrolador PIC y el acondicionador de señales. Por esta razón al cambiar las características físicas y las dimensiones, se realizó un análisis estructural para los esfuerzos. Debido a que los rangos de pesaje son pequeños, no se presenta deformación significativa en la viga en voladizo de la celda de carga, así que se determinó un grosor de 5 mm para la plataforma, porque aunque el material no llega a su punto de ruptura es necesario deformar mínimamente las galgas extensiométricas, para que estas puedan generar un cambio de voltaje y poder procesar esa información, Esto limita a la celda a tener un valor mínimo en la lectura, sin embargo posee buena resolución. Adicionalmente se realizó un ajuste en la fijación, por medio de tuercas, para ajustar la libertad de deformación en la celda de carga

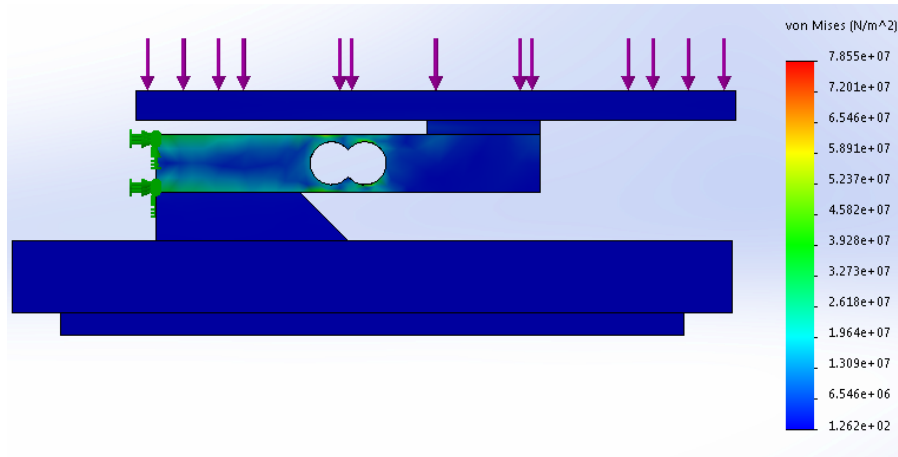


Ilustración 52-Análisis de esfuerzos sobre la plataforma de pesaje

Fuente: Elaboración Propia

En este estudio se muestra en la estructura de material compuesto de ácido poliláctico (PLA) como una carga de 15 kg, suponiendo la carga máxima, genera una imperceptible deformación; en la celda de carga se aprecia una coloración verde, este estudio no posee una alta precisión, sin embargo esto nos indicó que una fuerza externa sobre la plataforma puede afectar la parte trasera de esta, permitiendo a la celda de carga que devuelva valores de voltaje, para que el circuito amplificador diseñado, pueda convertir estos valores en fuerza.

Al realizar una prueba física, tomamos la masa máxima de lectura en la celda; se colocó 4 kg sobre la plataforma de pesado y se obtuvo que la máxima deformación es de 0.0000191 m, esto se interpreta por medio de la ecuación.

$$F(x) = (2.0496 \times 10^6 \frac{N}{m}) \Delta x$$

$$F(x) = (2.0496 \times 10^6 \frac{N}{m})(0.0000191 m)$$

$$F(x) = 39.12 N$$

Esto demuestra que la plataforma no fallará o llegará a estar en el punto de deformación plástica, puesto que está diseñada para soportar cargas mucho mayores pero justas para poder transmitir esa energía mecánica a la celda de carga, que como ya se ha aclarado, requiere esto para poder medir magnitudes físicas.

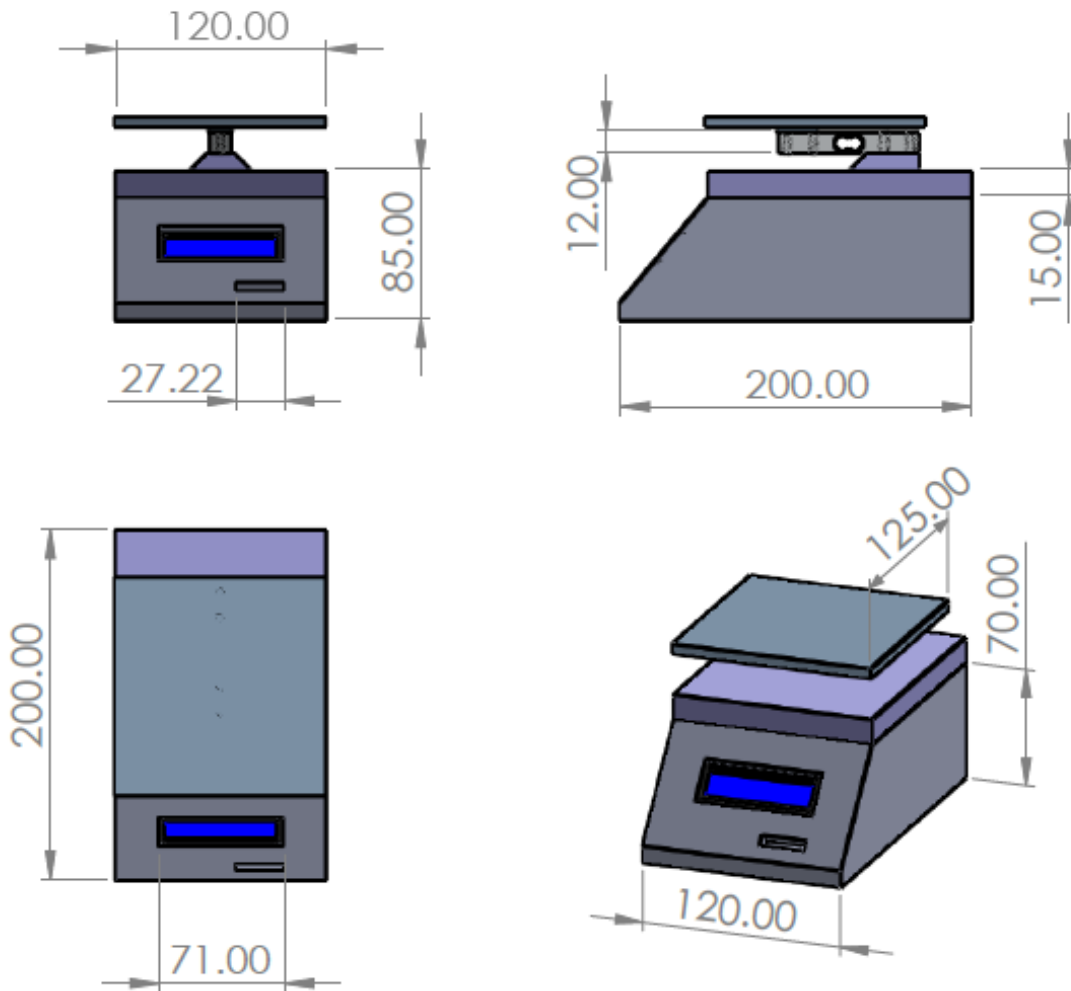


Ilustración 53-Diseño del sistema mecánico con medidas en centímetros

Fuente: Elaboración Propia

Como resultado del estudio estructural y físico, se diseñó un dispositivo conformado por el material, ácido poliláctico (PLA) de la familia de los polímeros sintéticos, esto debido a su alta densidad (1240 kg/m³) y su adquisición en el mercado de la impresión 3D, que permitió adaptarse a un diseño compacto y funcional para esta aplicación. El tiempo de fabricación tardó un total de 72 horas en total; está compuesto por tres partes, la base que posee un compartimiento para guardar la tarjeta de control, la tapadera del compartimiento que es completamente acoplable, esta tiene la camilla donde va colocada la celda de carga, por último, se encuentra sobre esta la plataforma, el cual tiene dos perforaciones para fijarla con tuercas atravesando la celda de carga.

5.7 DESARROLLO CICLO B: SISTEMA DE CONTROL ELECTRÓNICO

Se requirió un sistema de control electrónico, para ello se diseñó un circuito acondicionador integrando los subsistemas como amplificadores operacionales, capacitores electrolíticos y cerámicos, resistencias, diodos Zener y reguladores de voltaje. Se irán exponiendo cada una de las partes detalladamente. Este circuito acondicionador de señal fue implementado después de haber realizado numerosas pruebas experimentales, Se presenta por etapas, donde cada etapa representa un amplificador operacional.

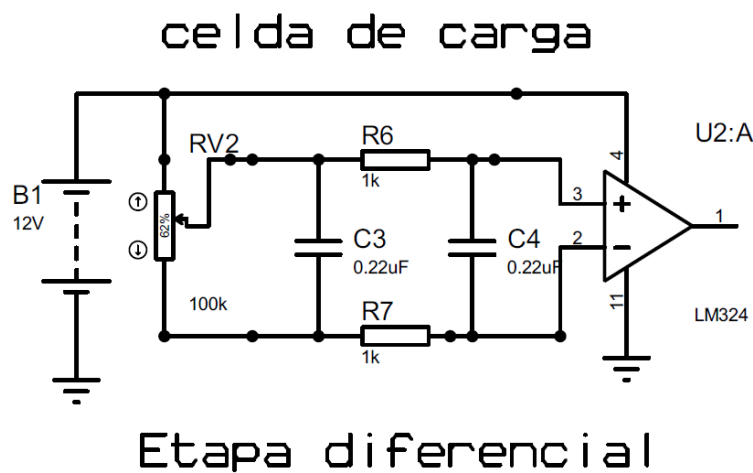


Ilustración 54-Etapa diferencial

Fuente: Elaboración Propia

El puente de Wheatstone es una configuración de divisor de tensión para sensores resistivos, los fabricantes de las celdas de carga equilibran el puente colocando cuatro galgas extensiométricas volviendo aún más lineal la respuesta; En este caso el potenciómetro representa el divisor de tensión proveniente de las galgas, se observa que hay 2 capacitores y 2 resistores, estos son parte de un circuito de filtrado de pasa bajas, esta configuración reduce en un 40% el ruido eléctrico, permitiendo que no haya interferencias, sin este filtro existen perturbaciones de voltaje debido a la alta sensibilidad de las galgas. Este modo de operación es diferencial, es decir que el amplificador operacional, realiza la operación de restar el voltaje de la terminal no inversora con la inversora, ya que está configurado en lazo abierto y es un amplificador de alta ganancia de voltaje, es susceptible a los pequeños cambios de tensión.

Etapa de Filtro Electrico

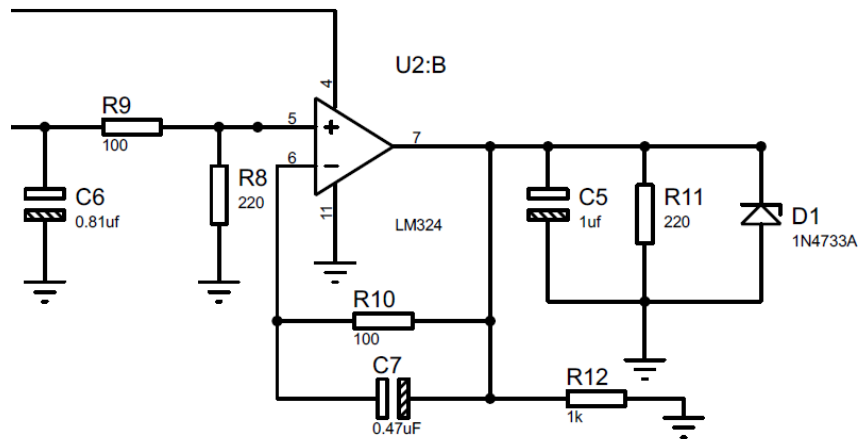


Ilustración 55-Etapa de filtrado eléctrico

Fuente: Elaboración Propia

Los rangos de voltaje que entrega la primera etapa de amplificación están entre 0 y 12 voltios, este voltaje aún contiene perturbaciones, para corregir este problema, se conectó un capacitor electrolítico de 0.8 μf para reducir imprecisiones, posteriormente se conecta con dos resistencias para reducir el voltaje mediante un divisor, esto con la finalidad de regular la zona de saturación de los amplificadores, entre más voltaje reciba la terminal no inversora, más pronto entrará en su máxima ganancia de voltaje. Para simplificar la inestabilidad se conecta un capacitor de 0.47 μF en la terminal no inversora con una resistencia de 100 Ω , permitiendo cargarse esto permite mantener la salida del amplificador más estable precisando el voltaje de salida, también se conecta otro capacitor de 1 μF en paralelo con una resistencia, para cargarlo y reducir aún más el ruido eléctrico. Por último y no menos importante, se conecta un diodo Zener, que tiene una función crucial en la interpretación de la señal, puesto que el amplificador operacional está conectado a una fuente de voltaje de 12.35 voltios, el diodo Zener se encargará de limitar el voltaje a 5 voltios, que como ya fue discutido, el puerto análogo del microcontrolador opera en ese rango, rangos superiores a este pueden causar lecturas erróneas o en el peor de los casos dañar irreversiblemente el microcontrolador. Una vez que estos dispositivos son acoplados se integran en un solo circuito acondicionador de señales, comparten la misma característica de tomar un voltaje en sus terminales de entrada, para posteriormente amplificar a uno mayor.

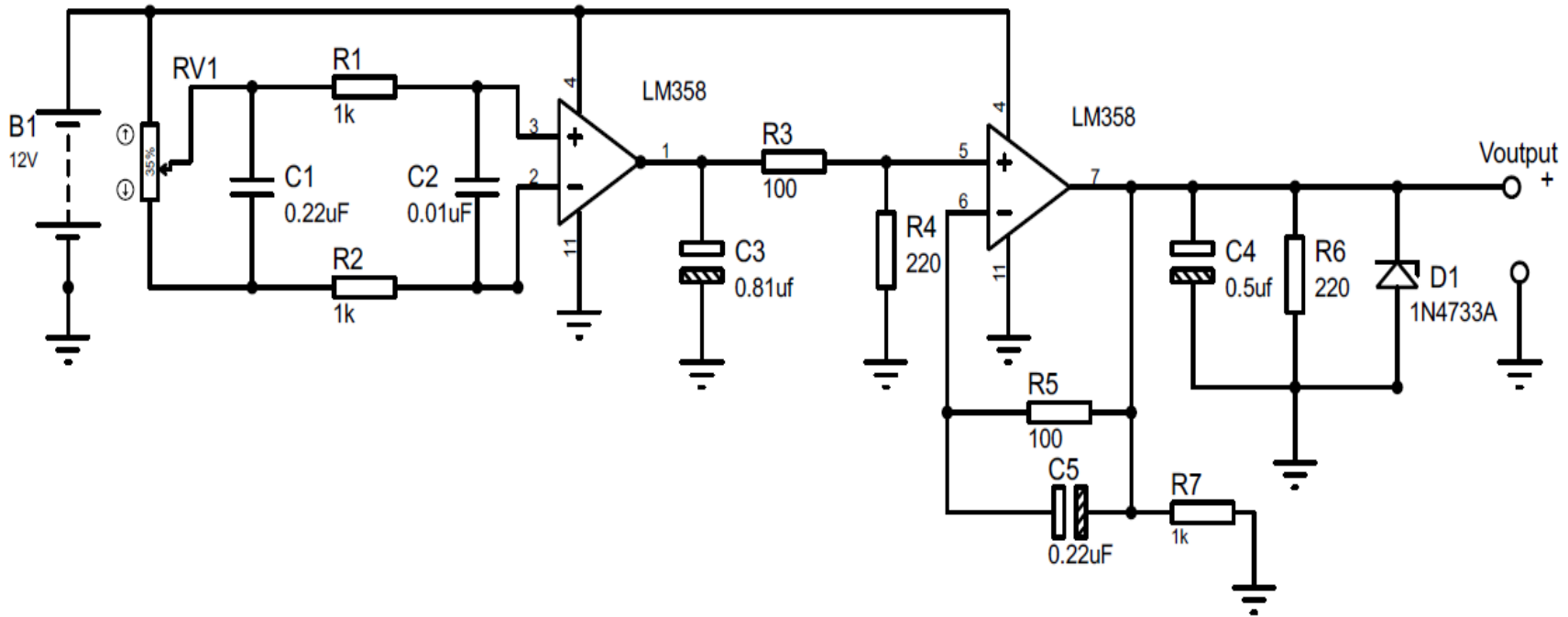


Ilustración 56-Circuito acondicionador de señal

Fuente: Elaboración Propia

Los componentes electrónicos empleados fueron expuestos a pruebas experimentales con la finalidad de probar la funcionalidad de todas las etapas de amplificación. Luego se integran todos los subsistemas electrónicos, conectando este circuito al microcontrolador juntamente con los demás periféricos necesarios para el control, como ser la pantalla LCD que muestra los valores al usuario y la matriz de botones, que permite navegar por un menú para cambiar las unidades de peso internacionales. Este circuito está diseñado para devolver voltajes entre 0 y 5 voltios y por medio de un diodo Zener, se regula y se priva a no superar este rango, posee en su mayoría filtros que eliminan el ruido eléctrico producido por la alta sensibilidad de este tipo de sensor resistivo, por esa razón es para uso

exclusivo de celdas de carga, basadas en la conexión con galgas extensiométricas, puesto que esas variaciones de resistencia son imperceptibles, el circuito no funciona para otro tipo sensor.

Al integrar estos dispositivos se valida el funcionamiento con base a numerosas pruebas experimentales y basadas en los cálculos realizados anteriormente, a continuación, se muestra el diagrama de integración de los subsistemas:

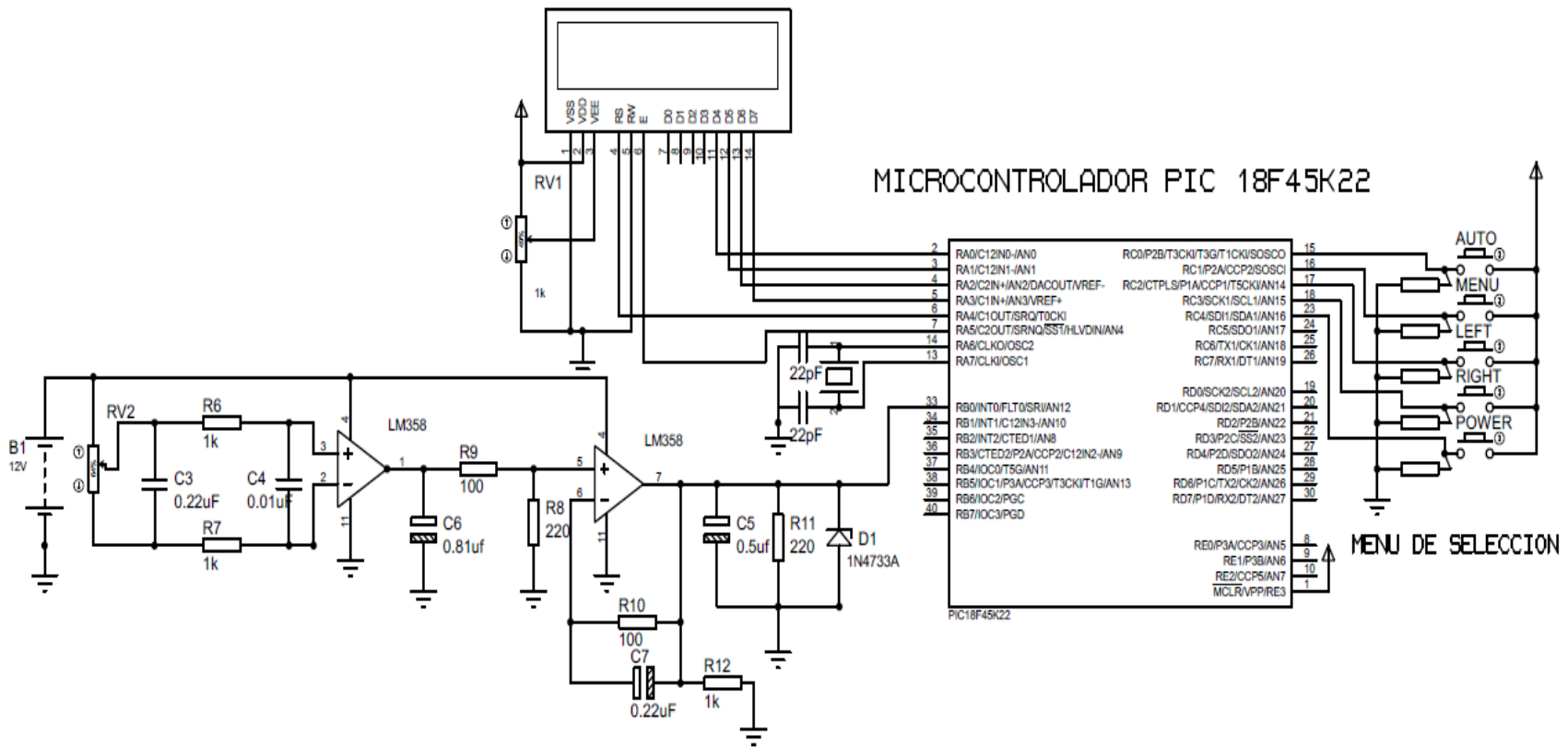


Ilustración 57-Integración de subsistemas electrónicos

Fuente: Elaboración Propia

Para poder presentar un sistema de pesaje como producto final, es requerido diseñar una tarjeta de circuito impreso donde de forma permanente y práctica se instala en el dispositivo final. A continuación, se muestra el diseño que se implementó para la integración de los subsistemas. Con la finalidad de entregar un producto mejorado y confiable, se implementó la norma IPC 2221 para el diseño de PCB (Printed Circuit Board) de la tarjeta de control electrónico definiendo los requisitos e implementando las recomendaciones para los componentes de tipo THT o de hueco pasante.

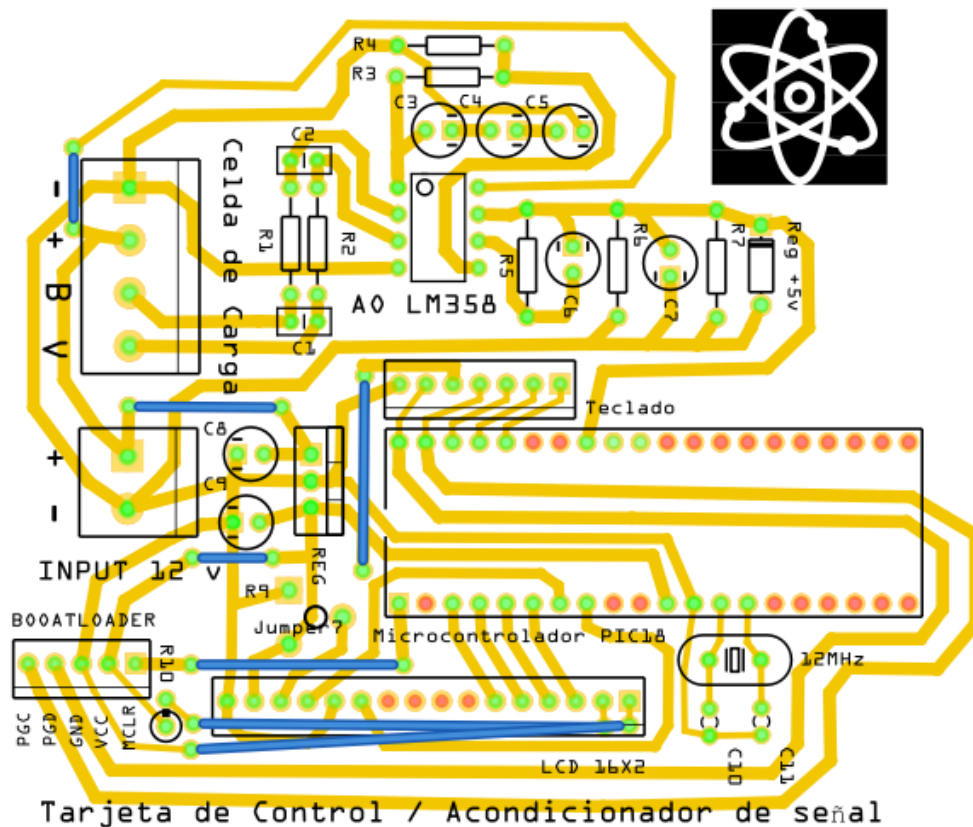


Ilustración 58-Diseño de tarjeta electrónica

Fuente: Elaboración Propia

5.8 DESARROLLO CICLO B: SISTEMA INFORMÁTICO

Se requirió un algoritmo para representar los valores de peso expresados en kilogramos, libra u onza utilizando una ecuación lineal como resultado de una calibración. Para este apartado se explicará el algoritmo en diagrama lógico de bloques y como comando de programación en C.

5.8.1 INTERPRETACIÓN DE ECUACIÓN LINEAL

Al haber obtenido la ecuación de interpolación lineal por medio de la calibración, esta será la responsable de devolver los valores de masa los cuales, deben respetar los márgenes de error establecidos anteriormente, para comprobar el resultado se documentó los valores de masa y se graficaron con respecto al voltaje que entrega el circuito amplificador, mediante pruebas experimentales. Para implementar el algoritmo definitivo y que pueda mostrar los valores de las lecturas en la pantalla LCD, se utilizó la siguiente lógica y se explica por medio del diagrama de bloques que se expone como se muestra en la ilustración 58.

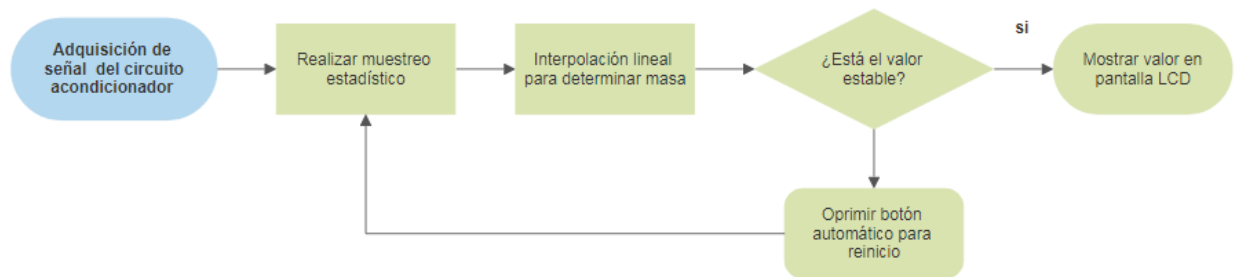


Ilustración 59-Integración de la ecuación lineal al algoritmo

Fuente: Elaboración Propia

Se cargó este código al microcontrolador PIC para ver la respuesta al colocar masas con valores conocidos, esto con la finalidad de comprobar la linealidad ante los puntos de interpolación descritos por la ecuación, esto permite documentar la precisión. Se muestra el código comando que se le cargó al microcontrolador donde realiza la muestra y posteriormente inserta ese valor a la ecuación, por medio de la variable de tipo Flotante, la que permite visualizar las centésimas del valor devuelto.

```

- ///////////////////////////////////////////////////////////////////
. void calcular_Valor() {
.     for(i=0;i<1000;i++){
.         valor=adc_read(12);
.         sumatoria=sumatoria+valor;
30     }
.     muestra = sumatoria/1000;
.     masa = (0.0037*muestra) + (0.797);
.     }
. ///////////////////////////////////////////////////////////////////

```

Ilustración 60-Integración de la ecuación lineal al código

Fuente: Elaboración Propia

En este algoritmo, la función donde se realiza este calculo, se le integró la ecuación determinada por microsoft excel bajo los criterios de estadística, se sabe que la media encontrada es de los valores digitales, una vez estabilizado y luego de haber corregido la inestabilidad en la lectura este valor es insertado en la ecuación lineal, obteniendo este valor en kilogramos, se expresó:

$$\bar{Y} = \sum_{n=1}^{n=1000} \frac{k_1 + k_2 \dots k_n}{n}$$

$$m = 0.0037\bar{Y} + 0.797$$

Al incorporar esta ecuación se realizó un muestreo y se documentó en una tabla los valores de masa relaciona con el voltaje que devuelve la tarjeta de control acondicionadora de señal para la celda de carga, esto es de importancia porque valida que los valores devueltos tengan congruencia y se respetan los márgenes de error.

Las celdas de carga a pesar de estar construidas para un peso específico tienen un mínimo permitido en las lecturas de valores, en esta ocasión el acondicionador de señal tiene un mínimo registrado de 1kg, es decir que puede pesar masa de este valor o más.

Tabla 5-Muestras del algoritmo implementado

| Muestra | Voltaje | Masa registrada |
|---------|---------|-----------------|
| 1 | 0.66 v | 1.30 kg |
| 2 | 1.07 v | 1.56 kg |
| 3 | 2.22 v | 2.48 kg |
| 4 | 3.03 v | 3.09 kg |
| 5 | 4.64 v | 4.31 kg |

Fuente: Elaboración Propia

Los valores descritos en la tabla anterior reflejan la estabilidad y la linealidad que se corrigió por medio de la ley débil de los grandes números, por medio de mediciones tomadas a masa con valores conocidas se demuestra gracias al coeficiente de determinación que la precisión alcanza el 99.98 %, con esto se reduce la incertidumbre en la lectura final.

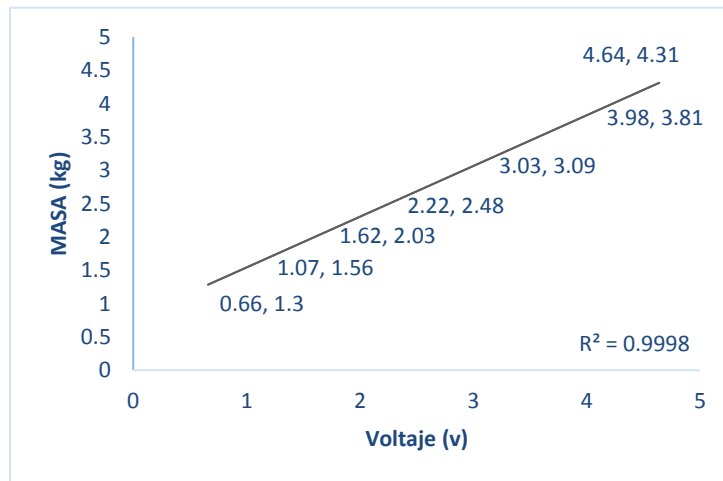


Ilustración 61-Respuesta lineal de la masa con respecto al voltaje

Fuente: Elaboración Propia

En relación con otras investigaciones, el acondicionador de señal que se diseñó y con las correcciones en la lectura inestable, se obtuvo gracias a las herramientas matemáticas que la báscula digital es precisa en un 99.98% en comparación a los resultados de este grupo de investigadores que obtuvieron 99.96% de precisión (E. J. A. Rodríguez et al., 2007).

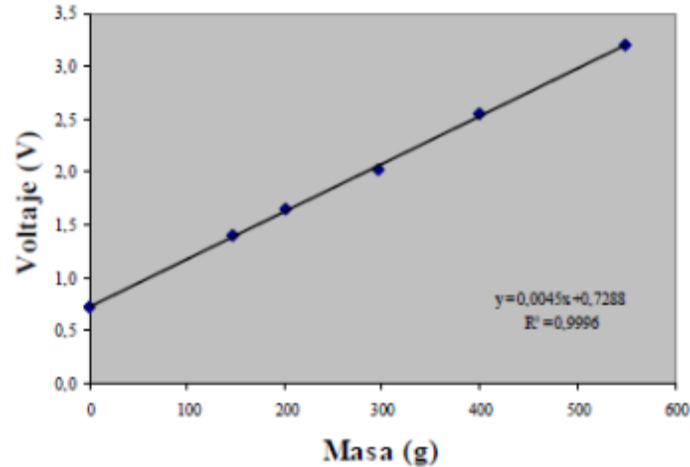


Ilustración 62-Relación entre el voltaje de salida del puente y la masa sobre la viga

Fuente: (E. J. A. Rodríguez et al., 2007)

5.9 RESULTADOS DEL CICLO B

Por medio del análisis y estudio de los sistemas mecatrónicos, se desarrolló un dispositivo acondicionador de señal, utilizando un puerto análogo del microcontrolador PIC 18F45K22 permitiendo volver el sistema de pesado a una manera más versátil a las aplicaciones en prototipado o al nivel de ingeniería avanzada, donde se toman las consideraciones desde el sistema mecánico y físico, hasta la muestra final; se integraron estos sistemas para desarrollar un producto práctico, versátil y en un contexto de programación básico, resolviendo la problemática con la conexión de buses i2c con todas las gamas de microcontroladores PIC.

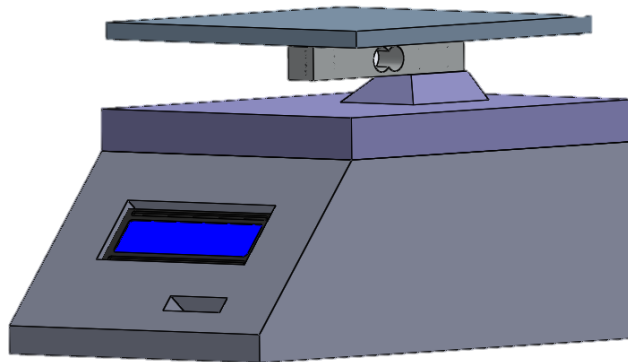


Ilustración 63-Diseño del prototipo final

CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES

AL completar el proyecto de investigación se exponen las conclusiones partiendo de los análisis y resultados obtenidos.

1) En la presente investigación se realizaron los estudios y análisis a los sistemas y subsistemas que conforman un circuito acondicionador de señales, para diseñarlo se consideraron los dispositivos electrónicos adecuados para que pueda entregar un rango de voltaje entre 0 y 5 voltios, esto para hacer compatible la utilización de estos con los microcontroladores PIC y ampliar la utilización del pesaje en aplicaciones dentro de la ingeniería.

2) Se determinó que este circuito de control está diseñado para un acondicionador de señal específico para la toma de lecturas de valores análogos de las celdas de carga que posean galgas extensiométricas, conectados a los microcontroladores PIC.

3) Utilizando la electrónica se logró diseñar un circuito acondicionador de señal que es capaz de ser preciso en un 99.98% en las lecturas de peso registradas en la pantalla LCD.

4) Por medio de la estadística y procesos de muestreo de ésta, se logró reducir al 1.03% los errores de las lecturas debido a las imprecisiones que se producen por perturbaciones en los puertos análogos de los microcontroladores PIC, eliminando la incertidumbre y obteniendo respuestas acertadas y estables, mejorando la repetibilidad y trazabilidad de este.

CAPÍTULO VII. RECOMENDACIONES

1. Los circuitos diseñados están basados en la teoría de los circuitos eléctricos, en donde se han utilizado condensadores, resistores y amplificadores operacionales. Para hacer más efectivo el tiempo de respuesta del acondicionador de señales, los valores de estos componentes están sujetos a sustituciones por otros de diferente valor, garantizando una respuesta en la lectura, mucho más rápida.
2. Las celdas de carga llevan consigo una red de cuatro galgas extensiométricas conectadas en la configuración de un puente de Wheatstone, proporcionando linealidad en la entrega de voltaje de esta, por lo que esta celda puede ser sustituida por otra de rangos inferiores, teniendo en cuenta la recalibración.
3. El microcontrolador PIC18 utilizado en este proyecto de investigación es de gama alta, cuenta con 40 pines, sin embargo, puede ser reemplazado por un microcontrolador de la misma gama en cantidad de pines inferior, con la finalidad de optimizar el tamaño de la tarjeta electrónica y el espacio requerido por esta.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvarado de Chumen, I., & Chinchay Ulloa, I. (1993). Acondicionador de señales para transductores «Strain Gauge» con microcontrolador. *Escuela Politécnica Nacional*, 14, 47–53.
- Amaya, E., & Goitia, A. (1997). *Instrumentación Industrial* (1a Ed). PCI Entrenamiento S. A.
- Ambardar, A. (2002). *Procesamiento de Señales Analógicas y Digitales*. Thomson Learning.
- Artero, C., Nogueras Cervera, M., & Lázaro, M. A. (2012). PH Sensor. *Instrumentation Viewpoint*, Winter(13), 23–25.
- Bolton, W. (2001). *Ingeniería de Control* (2a Ed). Editorial Alfaomega.
- Bolton, W. (2009). *Mecatrónica, Sistemas de Control Electrónico en Ingeniería Mecánica y Eléctrica* (4a Ed). Editorial Alfaomega.
- Cooper, W., & Helfrick, A. (1991). *Instrumentación Electrónica Moderna y Técnicas de Medición*. Pearson Educación, S. A.
- Coughlin, R. F., & Driscoll, F. F. (1999). *Amplificadores Operaciones y Circuitos Integrados Lineales* (5a ed.). Pearson Educación, S. A.
- Creus, A. (2009). *Instrumentos Industriales, su Ajuste y Calibración* (3a Ed). Editorial Marcombo S. A.
- Creus Solé, A. (2011). *Instrumentación industrial: Antonio Creus Solé* (8a Ed). Editorial Marcombo S. A.
- Fernández del Busto, R., & Ezeta. (2013). *Análisis y Diseño de Sistemas de Control Digital* (1a Ed). McGraw-Hill Interamericana.

- Floyd, T. L. (2008). *Dispositivos Electrónicos* (8a Ed). Pearson Educación, S. A.
- Hayt, W., Kemmerly, J., & Durbin, S. (2012). *Análisis de Circuitos en Ingeniería* (8a Ed). McGraw-Hill Interamericana.
- Henao, S. A. F., Luna, R. A. F., & Rendón, J. F. L. (2009). Comparación entre el amplificador operacional real y su modelo ideal: Un análisis estadístico. *Scientia et Technica*, 3(43), 118–123.
- Hernández Gaviño, R. (2010). *Introducción a los Sistemas de Control: Conceptos, Aplicaciones y Simulación con MATLAB* (1a Ed). Pearson Educación, S. A.
- Hernández Sampieri, R. (2001). *Metodología de la Investigación* (2a Ed). McGraw-Hill Interamericana.
- HTC. (2008). LM324N Datasheet. *High Tech Computer Corporation*, 1.
- MacKenzie, I. S., & Phan, R. C. (2007). *Microcontrolador 8051* (4a Ed). Pearson Educación, S. A.
- Morcelle del Valle, P. (2018). *Transductores—Instrumentación*. Universidad Nacional de la Plata.
- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de Control Moderna* (4a ed.). Pearson Educación, S. A.
- Oppenheim, A. V., & Schaffer, R. W. (2011). *Tratamiento de Señales en Tiempo Discreto* (1a Ed). Pearson Educación, S. A.
- Otero Valladares, P. E. (2007). *Diseño y construcción de una balanza electrónica con una interfaz gráfica para visualización*. Escuela Politécnica Nacional.
- Pallás Areny, R. (2007). *Sensores y Acondicionadores de Señal* (4a ed.). Editorial Marcombo S. A.

- Pertence Junior, A. (1991). *Amplificadores Operacionales y Filtros Activos* (1a Ed). McGraw-Hill Interamericana.
- Phellan, S., & Kevin, W. (2019). *Ingeniería inversa y diseño de la automatización de un dosificador de polvos, utilizando celda de carga a través de microcontrolador atmega para la empresa Jacs* [Pregrado]. Universidad Ricardo Palma.
- Proakis, J., & Manolakis, D. (2007). *Tratamiento Digital de Señales* (4a ed.). Pearson Educación, S. A.
- Quiles, F., Moreno, C. D., Moreno García, I., Rivera, J., & Ortiz, M. (2018). Diseño del interfaz de una balanza electrónica basada en una celda de carga. *Conferencia: SAAEII 2018 - XXV Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación, En Barcelona, España, 1, 272–277.*
- Rodríguez, E. J. A., Ocampo, J. W. M., & Ortega, C. A. S. (2007). Medidores de deformacion por resistencia: Galgas extensiométricas. *Univerdiad Tecnologica de Pereira, 1(34), 7–12.*
- Rodríguez, E. J., Ocampo, J. W. M., & Ortega, C. A. S. (2007). Medidores de deformación por resistencia: Galgas extensiométricas. *Universidad Tecnológica de Pereira, 1(34), 7–12.*
- Tello, D., Orellana, J., & Yapur, M. (2012). Medición de esfuerzos y deformaciones en barras metálicas utilizando galgas extensiométricas. *Escuela Superior Politécnica Del Litoral.*
- Valdivia Miranda, C. (2012). *Sistema de Control Continuos y Discretos* (1a Ed). Ediciones Paraninfo.
- Vargas, A. M., & Jaramillo, I. J. (2018). La industria de sensores en Colombia. *Tecnura, 22(57), 44–54.*

Vasić, V. S., & Lazarević, M. P. (2008). Standard Industrial Guideline for Mechatronic Product Design. *FME Transactions*, 36, 103–108.