

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**DISEÑO DE UN SISTEMA DE MONITOREO PARA
MEDICIONES DE DEFORMACIÓN EN ENSAYOS DE
FATIGA CON CARGAS DE AMPLITUD VARIABLE**

**Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero
Mecatrónico**

AUTOR:

Franz Kevin Contreras Mendoza

ASESOR:

Daniel Lavayen Farfán

Lima, febrero, 2025


Informe de Similitud

Yo, **Daniel Lavayen Farfán**, docente de la Escuela de Posgrado de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor de la tesis titulada “**Diseño de un sistema de monitoreo para mediciones de deformación en ensayos de fatiga con cargas de amplitud variable**”, del autor **Franz Kevin Contreras Mendoza**, dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 11%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 24/02/2025. Todas las fuentes indican similitud de menos de 1%.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha:

Lima, 24 de febrero de 2025

Apellidos y nombres del asesor: <u>Lavayen Farfán, Daniel</u>	
DNI: 72965380	Firma 
ORCID: 0000-0003-2932-0238	

RESUMEN

En el presente documento se muestra el desarrollo de un sistema de monitoreo para ensayos de fatiga. Este sistema mide la deformación de una probeta normalizada y determina su falla por fatiga empleando la teoría de daño acumulado de Miner. Así mismo, en este trabajo se presentan el diseño del sistema de monitoreo, su implementación y las pruebas de medición realizadas con dicho sistema.

Este trabajo está dividido en seis capítulos. En los dos primeros capítulos se describen la problemática, los objetivos, el alcance de la tesis, el marco teórico y el estado del arte. En el tercer capítulo se desarrolla el diseño conceptual; es decir, se evalúan las propuestas de solución y se determina una solución óptima. En el cuarto capítulo se muestra el desarrollo y la implementación del diseño óptimo que se seleccionó considerando cada uno de los componentes presentes en un sistema mecatrónico. En el quinto capítulo se muestran las pruebas de funcionamiento y las pruebas de medición del prototipo desarrollado. Finalmente, en el sexto capítulo se estiman los costos de diseño e implementación del sistema de monitoreo. Adicionalmente, después del capítulo final, se describen las conclusiones de este trabajo.

Además del diseño de un sistema de hardware, se desarrolló un software de adquisición de datos que cuenta con un algoritmo de cálculo de fatiga y una interfaz gráfica (GUI) que permite mostrar la medición de deformación en tiempo en real. Esta aplicación fue desarrollada para visualizar las pruebas, y además, sirve como una interfaz gráfica de usuario para el sistema de monitoreo.

A mis padres Sonia y Francisco.

A mi hermano Bryam.

A mi hermana Yajita.

A mi cuñada Alessandra

A mi sobrina Ana Lua.



Esta tesis es fruto del trabajo de muchos años de esfuerzo y creo que una página no es suficiente para incluir a todos los amigos y docentes que me ayudaron de alguna u otra forma durante mi periodo de formación en la PUCP. Sin embargo, quiero agradecer especialmente a mi asesor y amigo Daniel Lavayen, sin su apoyo y confianza esta tesis nunca habría sido posible.



Die Schwachen kämpfen nicht.

Die Stärkeren kämpfen vielleicht eine Stunde lang.

Die noch stärker sind, kämpfen viele Jahre.

Aber die Stärksten kämpfen ihr Leben lang.

Diese sind unentbehrlich.

Bertolt Brecht



ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN	i
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABLAS	xi
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Problemática	1
1.2 Objetivo general	2
1.3 Objetivos específicos	3
1.4 Alcance	3
1.5 Metodología	4
1.6 Resumen por capítulo	4
2 MARCO TEÓRICO	6
2.1 Fundamentos de la fatiga	6
2.1.1 Análisis de fatiga con cargas de amplitud constante	7
2.1.2 Análisis de fatiga con cargas de amplitud variable	8
2.1.3 Teorías de daño acumulativo	10
2.2 Espectros de carga	15
2.2.1 Conteo de ciclos	15
2.2.2 Medición de deformación empleando transductores	20
2.3 Estado del arte	25
2.3.1 ADMET: eXpert 9300 Series	25
2.3.2 TQ: SM1090V	26
2.3.3 Zwick/Roell Control Cube y software Cubus	27
2.3.4 Zwick/Roell LTM 1/2/3	28
2.3.5 Tabla comparativa de máquinas equivalentes	29
3 DISEÑO CONCEPTUAL	31
3.1 Lista de exigencias	31
3.2 Black-Box	33
3.3 Estructura de funciones	34
3.4 Concepto de solución	35
3.4.1 Concepto de solución óptimo	36
4 DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN	38

4.1	Consideraciones generales	38
4.1.1	Consideraciones del subsistema de medición	38
4.1.2	Consideraciones del subsistema mecánico	40
4.1.3	Consideraciones del subsistema electrónico	41
4.1.4	Consideraciones de software	42
4.2	Lógica de control y subsistema electrónico	42
4.2.1	Lógica de control del sistema	42
4.2.2	Diagramas de flujo	44
4.2.3	Descripción de sensores y dispositivos	51
4.2.4	Diagrama de bloques general	57
4.3	Implementación del sistema de monitoreo	58
4.3.1	Circuito de acondicionamiento de señal	58
4.3.2	Circuito de amplificación y ADC	59
4.3.3	Módulo de procesamiento	59
4.3.4	Sistema integrado	60
4.4	Implementación del software	61
4.4.1	Desarrollo de los algoritmos de cálculo de fatiga	61
4.4.2	Desarrollo de interfaz gráfica (GUI)	62
4.5	Diagrama de operaciones	68
5	PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO	70
5.1	Análisis de repetibilidad	70
5.2	Pruebas con cargas estáticas	74
5.2.1	Modelo teórico empleado	75
5.2.2	Prueba con diez magnitudes sucesivas	76
5.2.3	Prueba con cuatro magnitudes distintas	78
5.3	Pruebas del sistema de monitoreo con cargas alternantes	80
5.3.1	Primera prueba de obtención de un gráfico de cargas alternantes	81
5.3.2	Segunda prueba de obtención de un gráfico de cargas alternantes	83
5.3.3	Cálculo de daño acumulado y fatiga	85
5.4	Pruebas complementarias	89
5.4.1	Pruebas en un recipiente a presión	89
5.4.2	Prueba de comparación con una máquina de ensayos	92
6	COSTOS	96
6.1	Costos de elementos normalizados y dispositivos electrónicos	96
6.2	Costos del banco de pruebas	97
6.3	Costos de fabricación	99
6.4	Costos del servidor	99
6.5	Costos de diseño y programación	99
6.6	Costo total	100
	CONCLUSIONES	102
	BIBLIOGRAFÍA	104
	ANEXO A: Descripción de requerimientos	106
	ANEXO B: Descripción de la estructura de funciones	109

ANEXO C: Evaluación de conceptos de solución	115
ANEXO D: Implementación del banco de pruebas	123

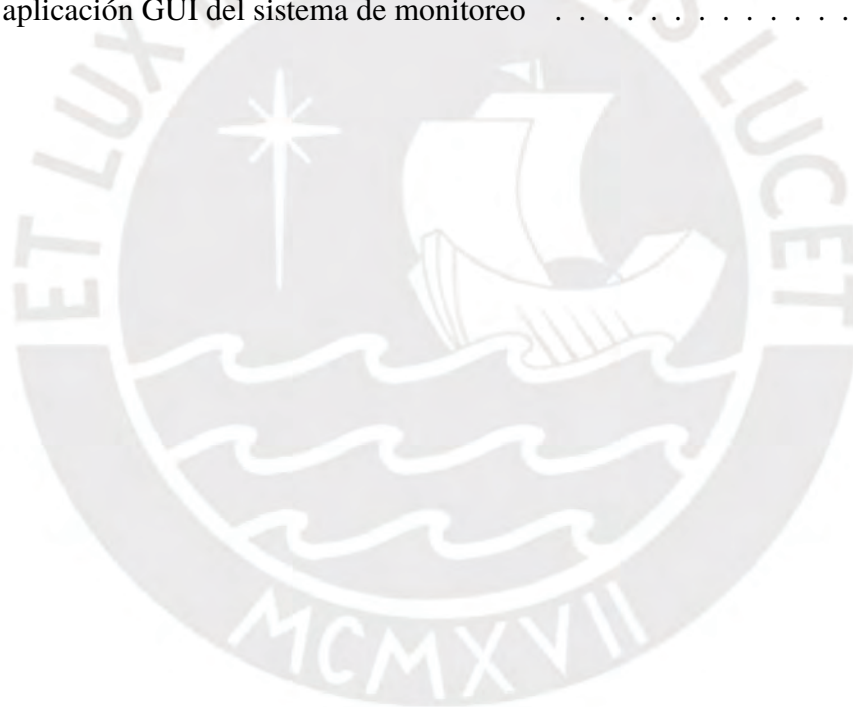


LISTA DE FIGURAS

2.1	Máquina de ensayos de fatiga de Wohler (Fuente: Pook 2007)	7
2.2	Máquina de ensayos de fatiga de flexión rotativa (Fuente: Bhandari 2010)	7
2.3	Curva S-N de una aleación de aluminio obtenida a través de un ensayo de flexión rotativa (Fuente: Pook 2007)	8
2.4	Ejemplos de cargas de amplitud variable (Fuente: adaptado de Haibach 2006)	9
2.5	Gráfico de carga de amplitud variable y curva S-N	10
2.6	Curva S-N logarítmica	12
2.7	Curva S-N Miner modificada (Fuente: Kondo 2003)	12
2.8	Curva S-N con modificación de Haibach (Fuente: Kondo 2003)	13
2.9	Curva S-N Corten-Dolan (Fuente: Kondo 2003)	14
2.10	Gráfica de daño lineal(a) y daño no lineal(b) (Fuente: Schijve 2009)	14
2.11	Historial de la fuerza de torsión en la transmisión de un vehículo (Fuente: adaptado de Stephens et al. 2001)	15
2.12	Método Level-Crossing: conteo inicial (Fuente: ASTM 2017)	16
2.13	Método Level-Crossing: identificación de ciclos (Fuente: ASTM 2017)	16
2.14	Método Peak: identificación de picos y valles (Fuente: ASTM 2017)	17
2.15	Método Peak: identificación de ciclos (Fuente: ASTM 2017)	17
2.16	Método Simple-Range: identificación de ciclos (Fuente: ASTM 2017)	18
2.17	Método Simple-Range: identificación de rangos (Fuente: ASTM 2017)	18
2.18	Método Rainflow: ejemplo de historial (Fuente: Stephens et al. 2001)	19
2.19	Método Rainflow: ejemplo de conteo (Fuente: Stephens et al. 2001)	19
2.20	Método Rainflow: resultado (Fuente: Stephens et al. 2001)	20
2.21	Cable metálico sometido a una fuerza.	21
2.22	Strain gauge y sus partes.	22
2.23	Tipos de strain gauges (Fuente: MicroMeasurements 2016).	23
2.24	Circuito puente Wheatstone (Fuente: Lee et al. 2004).	24
2.25	Circuitos puente Wheatstone de compensación de temperatura (Fuente: Figliola and Beasley 2019).	24
2.26	ADMET eXpert 9300 Series (Fuente: Adaptado de ADMET 2024)	26
2.27	TQ SM1090V (Fuente: Adaptado de TecQuipment 2024)	27
2.28	Control Cube (Fuente: Adaptado de Zwick/Roell 2023) y software Cubus (Fuente: Adaptado de Zwick/Roell 2024).	28
2.29	Zwick/Roell LTM 1 (Fuente: Adaptado de Zwick/Roell 2024)	29
3.1	Caja negra.	33
3.2	Estructura de funciones del sistema de monitoreo.	34
3.3	Ubicación del gabinete del sistema de monitoreo en el banco de pruebas	35
3.4	Concepto de solución óptimo.	36
3.5	Concepto de solución óptimo - detalles de la solución.	37
3.6	Concepto de solución óptimo - panel de control.	37

4.1	Circuito puente Wheatstone quarter-bridge	39
4.2	Modelo CAD del banco de pruebas de carga alternante	41
4.3	Etapas de funcionamiento del sistema	43
4.4	Etapas de funcionamiento del módulo de medición de deformación	43
4.5	Etapas de funcionamiento del panel de control	44
4.6	Conexión entre el microcontrolador y el servidor	45
4.7	Diagrama de flujo de inicialización de variables	45
4.8	Diagrama de flujo de captura de deformación	46
4.9	Diagramas de flujo verificación de captura de datos	47
4.10	Diagramas de flujo de las funciones de cálculo de fatiga.	48
4.11	Diagramas de flujo de muestra de gráficos y resultados.	49
4.12	Diagrama de flujo de la máquina	50
4.13	Representación de circuito de puente Wheatstone	51
4.14	Módulo ADS1256	53
4.15	ESP32-DevKitC	54
4.16	Componentes del módulo de procesamiento de datos	56
4.17	Diagrama de bloques	57
4.18	Vistas del sistema de monitoreo	58
4.19	Implementación del circuito de acondicionamiento	59
4.20	Implementación del circuito de amplificación y ADC	59
4.21	Implementación del módulo de procesamiento	60
4.22	Vista lateral de los módulos integrados	60
4.23	Vista exterior e interior del sistema de monitoreo de deformación	61
4.24	Algoritmo de cálculo de fatiga	62
4.25	Sección de opciones de la interfaz gráfica.	63
4.26	Sección de visualización del ensayo en tiempo real.	64
4.27	Sección de visualización del ensayo total.	64
4.28	Sección de visualización de la curva SN.	65
4.29	Sección de conteo de ciclos.	66
4.30	Sección de cálculo de fatiga.	66
4.31	Sección de simulaciones.	67
4.32	Diagrama de operaciones	68
4.33	Diagrama de operaciones: instrumentación de probeta	69
5.1	Dispersión de las treinta medidas tomadas con el peso de 1N	70
5.2	Dispersión de las treinta medidas tomadas con el peso de 2N	71
5.3	Dispersión de las treinta medidas tomadas con el peso de 3N	71
5.4	<i>Box plot</i> que muestra la variación de las medidas de deformación	72
5.5	Modelo de flexión de 3 puntos	74
5.6	Disposición empleada para la prueba de medición	74
5.7	Diagrama de fuerzas y dimensiones de la viga de aluminio	75
5.8	Esquema de transferencia de datos de las pruebas	75
5.9	Gráfico de deformación vs tiempo de la primera prueba	77
5.10	Gráfico de deformación vs tiempo de la primera prueba sin oscilaciones	77
5.11	Gráfico de deformación vs tiempo de la segunda prueba	79
5.12	Banco de pruebas y fuerzas sobre la probeta	81
5.13	Gráfico deformación vs tiempo de la primera prueba con carga variable	82
5.14	Gráfico deformación vs tiempo de carga alternante extendido	82

5.15	Detalles del gráfico de deformación vs tiempo de la primera prueba	83
5.16	Gráfico deformación vs tiempo de la segunda prueba con carga variable	84
5.17	Gráfico deformación vs tiempo de la segunda carga alternante	84
5.18	Detalles del espectro de deformación vs tiempo de la segunda prueba	85
5.19	Curva S-N Aluminio 6061-T6 (adaptado de Rice et al. 2003)	86
5.20	Gráfico S-N lineal de Aluminio 6061-T6	86
5.21	Espectro de cargas repetitivo	87
5.22	Disposición de las strain gauge en los recipientes a presión	90
5.23	Gráfico de deformación vs tiempo del tanque con ruido	90
5.24	Elementos de la prueba en un recipiente a presión	91
5.25	Gráfico de deformación vs tiempo del tanque sin ruido	92
5.26	Gráfica deformación vs tiempo de dos strain gauge en un recipiente a presión	92
5.27	Gráfico de fuerzas y reacciones de la placa compuesta	93
5.28	Máquina de tracción y ubicación de la placa compuesta	93
5.29	Partes del sistema del ensayo de tracción en la placa compuesta	94
5.30	Gráficos del ensayo de tracción obtenidos por sistema de monitoreo	94
5.31	Comparación cualitativa entre los gráficos obtenidos por el software testXpert y la aplicación GUI del sistema de monitoreo	95



LISTA DE TABLAS

2.1	Tabla de comparativa de sistemas de monitoreo encontrados en el mercado.	30
2.2	Tabla de comparativa de la interfaz gráfica GUI de los sistemas de monitoreo.	30
3.1	Lista de exigencias.	31
4.1	Comparación de amplificadores y convertidores analógicos digitales.	53
4.2	Comparación de microcontroladores con capacidad inalámbrica.	54
4.3	Características del microcontrolador.	54
4.4	Características del regulador de voltaje.	55
4.5	Características del indicador luminoso de panel.	55
4.6	Características de la pantalla LED.	55
4.7	Determinación de la corriente y potencia total.	56
5.1	Tabla de mediciones de repetibilidad.	71
5.2	Variables estadísticas de las treinta mediciones para cada peso	72
5.3	Valores empleados para el ensayo.	76
5.4	Resultados de la primera prueba.	78
5.5	Resultados de la segunda prueba.	80
5.6	Conteo de ciclos de rainflow.	88
6.1	Lista de elementos normalizados y otros elementos de sujeción.	96
6.2	Lista de costos de componentes del sistema de monitoreo.	97
6.3	Costos del banco de pruebas.	98
6.4	Costos de fabricación y montaje.	99
6.5	Costos de fabricación y montaje.	99
6.6	Costos de diseño y programación.	100
6.7	Costo total del sistema de monitoreo.	100
6.8	Costo total del sistema de monitoreo incluyendo el banco de pruebas	101

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

En este capítulo introductorio primero se plantea la problemática para luego definir los objetivos generales y específicos de la tesis. Así mismo, se define el alcance y se describe la metodología de diseño que se empleará. Finalmente, se muestra un resumen de cada uno de los capítulos que forman parte de este documento.

1.1 Problemática

La evaluación de la durabilidad de los componentes y de las estructuras mecánicas es un factor crucial para el desarrollo de la industria en general; por esta razón, un análisis apropiado de esta característica garantiza la reducción de costos y el desarrollo de productos finales más seguros (Sonsino 2004). Así mismo, la durabilidad estructural es un factor que determina la vida útil de un producto y que, principalmente, depende de las cargas excesivas, impactos o de las cargas cíclicas (Berger 2002). Por esta razón, para lograr un análisis apropiado de la vida útil de un elemento, se emplean métodos experimentales como ensayos mecánicos en probetas para determinar la falla por fatiga en el componente que se analizará.

La fatiga se define como el desgaste gradual y la falla eventual que ocurre cuando un elemento está sometido a cargas variables en el tiempo (Pook 2007). Debido a que las fallas originadas por la fatiga son las más comunes en la industria (Wulpi 2013), el estudio de este fenómeno es más que relevante. Los resultados y la complejidad de un ensayo de fatiga dependen de la forma en la que se aplican las cargas y del modelo matemático que se emplea para evaluar este tipo de falla. Por ejemplo, en un ensayo de fatiga de flexión rotativa, estos procedimientos comúnmente se realizan aplicando cargas de amplitud constante y modelos

matemáticos simples. Sin embargo, en la realidad, la mayoría de los elementos de máquina siempre están sometidos a cargas de amplitud variable y, si se desea evaluar su comportamiento de forma adecuada, se deben realizar ensayos más complejos y que tomen en cuenta los efectos de estas cargas fluctuantes.

Un ensayo de fatiga que considera cargas de amplitud variable requiere del uso de modelos matemáticos que permitan procesar esta señal de entrada para poder determinar características como la amplitud y el número de ciclos de la fuerzas aplicadas. Por consiguiente, una alternativa para realizar este tipo de procedimiento implica el desarrollo de un dispositivo de captura y procesamiento de datos en tiempo real que sea capaz de medir la deformación de un elemento sometido a cargas variables. Además, este sistema también dependerá del tipo de máquina de ensayos, la ubicación de los sensores, del tipo de material y del modelo teórico con el que se determinará la falla por fatiga. Es decir, se requiere de un sistema mecatrónico que estará compuesto por los subsistemas electrónico, mecánico y de procesamiento de datos.

Es por ello que se propone el desarrollo de un sistema de monitoreo en tiempo real que sea capaz de medir las variables involucradas en un ensayo de fatiga de un elemento sometido a cargas de amplitud variable. Con el fin de lograr este objetivo, se implementará un algoritmo de procesamiento de datos que permita analizar los datos relevantes de un historial de cargas que varía en el tiempo (σ vs t) para, posteriormente, obtener un gráfico S - N (σ vs n). Finalmente, mediante el desarrollo de este sistema, se pretende obtener los resultados de un modelo experimental de un ensayo de fatiga con cargas de amplitud variable para poder compararlo con un modelo teórico.

1.2 Objetivo general

Diseñar e implementar un sistema de monitoreo en tiempo real para ensayos de fatiga con cargas de amplitud variable que mida la deformación de una probeta con el fin de obtener datos relevantes del ensayo.

1.3 Objetivos específicos

- Revisar el estado de las tecnologías actuales que son empleadas para la medición de la deformación en ensayos de fatiga.
- Diseñar un software de interfaz gráfica que permita mostrar los datos obtenidos y los datos procesados en tiempo real para luego compararlos con los modelos teóricos.
- Implementar el sistema de monitoreo considerando los requerimientos y limitaciones definidos en la etapa del diseño.
- Desarrollar un algoritmo que permita obtener los datos de fatiga a partir de los datos del historial de carga empleando varios modelos de acumulación de daño.
- Realizar pruebas de funcionamiento de medición de deformaciones en distintos sistemas con cargas variables y comparar las mediciones obtenidas con resultados teóricos y numéricos. Estas pruebas incluyen: medición de cargas estáticas en probetas sometidas a flexión en tres puntos, medición de deformación en probetas sometidas a flexión alternante y pruebas complementaria con recipientes a presión.
- Estimar los costos de diseño e implementación del sistema de monitoreo para mediciones de deformación.

1.4 Alcance

Durante el diseño y la implementación del sistema de monitoreo se considerará lo siguiente: se seleccionaran y diseñaran los componentes necesarios para implementar un sistema de monitoreo que permita obtener los datos de deformación de una probeta y que también pueda ser acoplado a otros sistemas (hardware). Así mismo, se implementará un algoritmo que permita el procesamiento de los datos obtenidos por los sensores de deformación para luego mostrarlos en una interfaz gráfica que será empleada por el usuario (software). No concierne a esta tesis el diseño de los sensores, ni la creación de los algoritmos que se emplearan para determinar el número de ciclos presentes en un historial de cargas. Adicionalmente, con el

propósito de realizar pruebas de medición, se implementó previamente un banco de pruebas de carga alternante que no forma parte del sistema de monitoreo (ver Anexo D).

1.5 Metodología

El diseño del sistema de monitoreo será desarrollado empleando la norma de diseño VDI 2221. Esta norma indica que se debe seguir un proceso iterativo durante el diseño. Inicialmente, se debe definir el problema a resolver e identificar características significativas para luego plantear una lista de requerimientos. En el siguiente paso, se realiza un proceso de abstracción en el que se definen las posibles funciones que cumplirá el sistema a diseñar y el resultado final de este proceso se representa en una “estructura de funciones”. Luego de plantear las funciones del sistema estas se agrupan tomando como referencia los dominios que usualmente componen un sistema mecatrónico: dominio mecánico, electrónico y de control. Posteriormente se elabora una matriz que se emplea para definir conceptos de solución que serán evaluados tomando en cuenta aspectos técnicos y económicos. Finalmente se selecciona un concepto de solución óptimo y se inicia el diseño e implementación de este concepto. Este proceso es iterativo y el concepto de solución puede ser modificado durante su desarrollo. En las próximas páginas se mostrará la aplicación del proceso de diseño explicado en el desarrollo del sistema de monitoreo.

1.6 Resumen por capítulo

Capítulo 1. En el primer capítulo se definen la problemática, el objetivo principal, los objetivos específicos, el alcance de la tesis, la metodología, y además, se resumen cada uno de los capítulos que se desarrollaron en esta tesis.

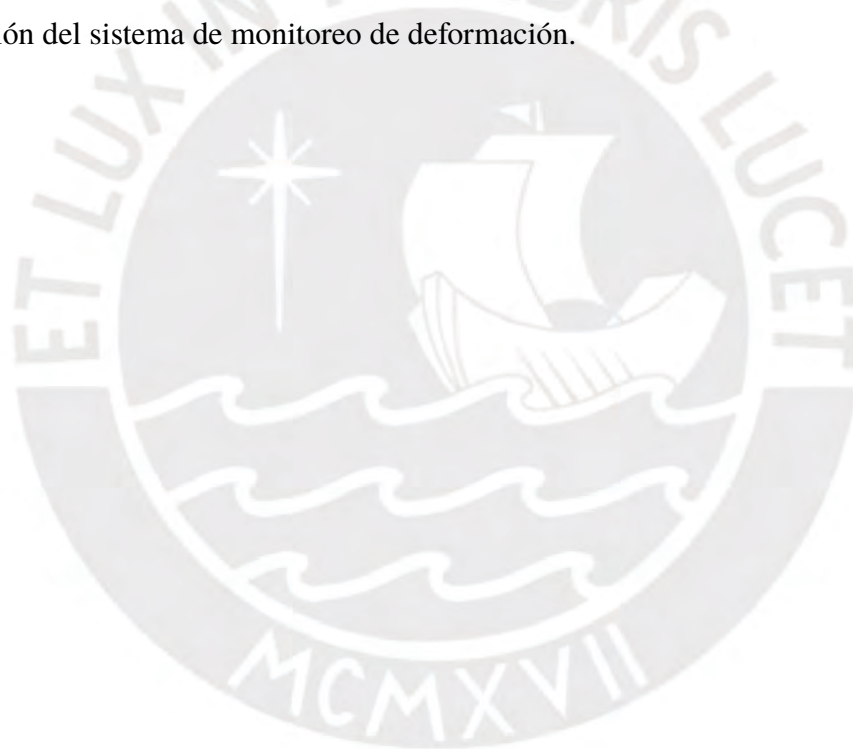
Capítulo 2. En el segundo capítulo se desarrolla el marco teórico. Primero, se definen los fundamentos teóricos de la fatiga para cargas de amplitud constante y variable. Segundo, se definen las teorías de daño acumulativo, de conteo de ciclos y se describe la medición de deformaciones empleando *strain gauges*. Finalmente, se realiza una revisión del estado del arte. En esta sección, se describen dispositivos o máquinas similares al sistema de monitoreo que se diseñará en la tesis.

Capítulo 3. En el tercer capítulo se describe el diseño conceptual de la solución. En esta sección se mencionan los requerimientos y limitaciones que se tomarán en cuenta para tener una visión general de la configuración del sistema y su principio de funcionamiento.

Capítulo 4. En el cuarto capítulo se describe el desarrollo de la solución y su implementación. Se describen todos los subsistemas que fueron desarrollados. Así mismo, se describen la programación del sistema de monitoreo y la interfaz gráfica (GUI).

Capítulo 5. En el quinto capítulo se realizan las pruebas de funcionamiento del sistema de monitoreo. Se describen pruebas preliminares empleando cargas estáticas, pruebas del sistema integrado con cargas alternantes, y adicionalmente, pruebas complementarias.

Capítulo 6. En el sexto capítulo se describe la estimación de costos de diseño, fabricación e implementación del sistema de monitoreo de deformación.



CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se describen los fundamentos teóricos de la fatiga, las teorías de daño acumulativo, el concepto de espectro de carga y cómo se realiza el conteo de ciclos. Así mismo, se explica cómo se realiza la medición de deformación empleando *strain gauges*. Finalmente, se describen y comparan productos comerciales equivalentes al sistema de monitoreo.

2.1 Fundamentos de la fatiga

La fatiga es la principal causa de las fracturas en elementos de máquina y es un tipo de falla que se relaciona con el tiempo de vida o durabilidad de estos elementos. En la actualidad, las roturas causadas por la fatiga son consideradas como el tipo de falla más seria porque representan el 90% de todas las fallas de servicio (Wulpi 2013). En general, la mayoría de las roturas en los materiales son causadas debido a los esfuerzos y, en el caso de elementos sometidos a cargas que no varían en el tiempo (cargas estáticas), las fracturas se originan cuando la aplicación de estos esfuerzos sobre un punto supera la resistencia del material. Sin embargo, en el caso de la fatiga el comportamiento de las fallas es distinto porque estas son originadas debido a que los elementos son sometidos a esfuerzos repetitivos a lo largo del tiempo (cargas variables).

Las fallas en elementos originadas por la fatiga son difíciles de detectar porque ocurren sin aviso. Se pueden reducir las probabilidades de fatiga garantizando que no existan sobrecargas, ambientes corrosivos u otras condiciones pero esto no significa que se pueda determinar cuando ocurrirá la falla de un elemento. Debido a las características y a la complejidad de este fenómeno, se han formulado teorías y modelos que permitan el entendimiento de sus efectos durante el proceso de diseño. A continuación se presenta un resumen de algunos conceptos relevantes para entender el fenómeno de la fatiga.

2.1.1 Análisis de fatiga con cargas de amplitud constante

El estudio de la fatiga es conocido desde el siglo diecinueve cuando se reportaron diversas fallas causadas por este fenómeno (Suresh 2004). La investigación más relevante de este periodo fue realizada por August Wöhler que diseñó una máquina de ensayos de fatiga (ver figura 2.1) e identificó que cuando se aplica una carga muy por debajo del límite resistencia estática en una estructura esta no sufre ningún daño. Sin embargo, si es que la misma carga se aplica de forma cíclica esta puede originar una falla total de la estructura (Schijve 2009). El procedimiento que Wöhler empleó para llegar a esta conclusión fue realizado a través de la aplicación una fuerza constante y repetitiva sobre una probeta. Este experimento se tomó como modelo y se inició el estudio de la fatiga para amplitudes constantes en diversos materiales (Pook 2007).

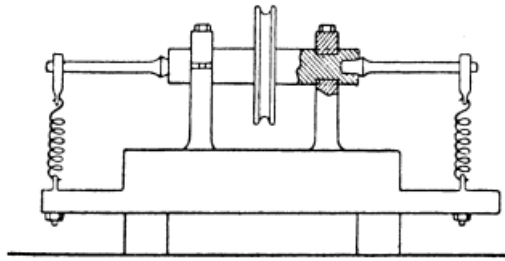


Figura 2.1: Máquina de ensayos de fatiga de Wohler (Fuente: Pook 2007)

En la actualidad existen diversos tipos de ensayos para analizar la fatiga de un material y uno de los ensayos más comunes se denomina *ensayo de fatiga a flexión rotativa*. En las máquinas de flexión rotativa (ver figura 2.2) se hace rotar a una probeta sometida a dos cargas hasta su rotura. Estas cargas son verticales y son aplicadas en cada extremo de la probeta, esta disposición produce flexión pura. Con este procedimiento es posible determinar el número de ciclos necesarios hasta que se produzca la falla por fatiga en la probeta.

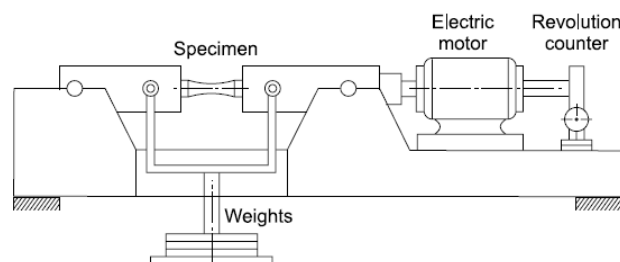


Figura 2.2: Máquina de ensayos de fatiga de flexión rotativa (Fuente: Bhandari 2010)

Una forma de representar los resultados de los ensayos de fatiga es empleando una curva S-N (también conocida como curva de Wöhler). En este gráfico se representan al esfuerzo alternante (S) y al número de ciclos (N) en los que se produce la falla. Cuando las fallas se originan en la región que se encuentra a menos de 10^4 ciclos se considera una falla por fatiga a bajos ciclos y cuando se encuentra por encima de este valor denomina una falla por fatiga de altos ciclos.

En la figura 2.3 se muestra un gráfico de una curva S-N de una aleación de aluminio obtenida a través de un ensayo de flexión rotativa. Se puede observar que para obtener una aproximación de la curva Wöhler se requieren de varios ensayos en un grupo de probetas. Es decir, para el procedimiento se deben preparar varias probetas normalizadas que no presenten diferencias significativas. De no cumplir con estos requerimientos el ensayo se verá afectado y no se podrá obtener muestras apropiadas. En este caso, para la aleación de aluminio, se realizaron ensayos en trece probetas (ver los 13 puntos del gráfico) para obtener una aproximación de la curva S-N.

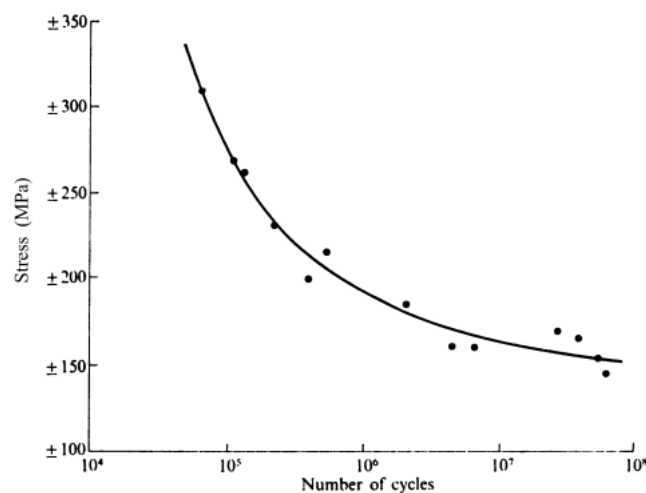


Figura 2.3: Curva S-N de una aleación de aluminio obtenida a través de un ensayo de flexión rotativa (Fuente: Pook 2007)

2.1.2 Análisis de fatiga con cargas de amplitud variable

Como se describió en la sección anterior, los ensayos de fatiga inicialmente fueron desarrollados empleando modelos de elementos sometidos a cargas de amplitud constante. Estos análisis pueden ser útiles para tener un entendimiento práctico del efecto de la fatiga en diversos

componentes; no obstante, en el mundo real los elementos son sometidos, en su mayoría, a cargas con amplitud variable. Estas cargas pueden ser simples e incluso repetitivas pero también pueden ser de naturaleza aleatoria (ver figura 2.4).

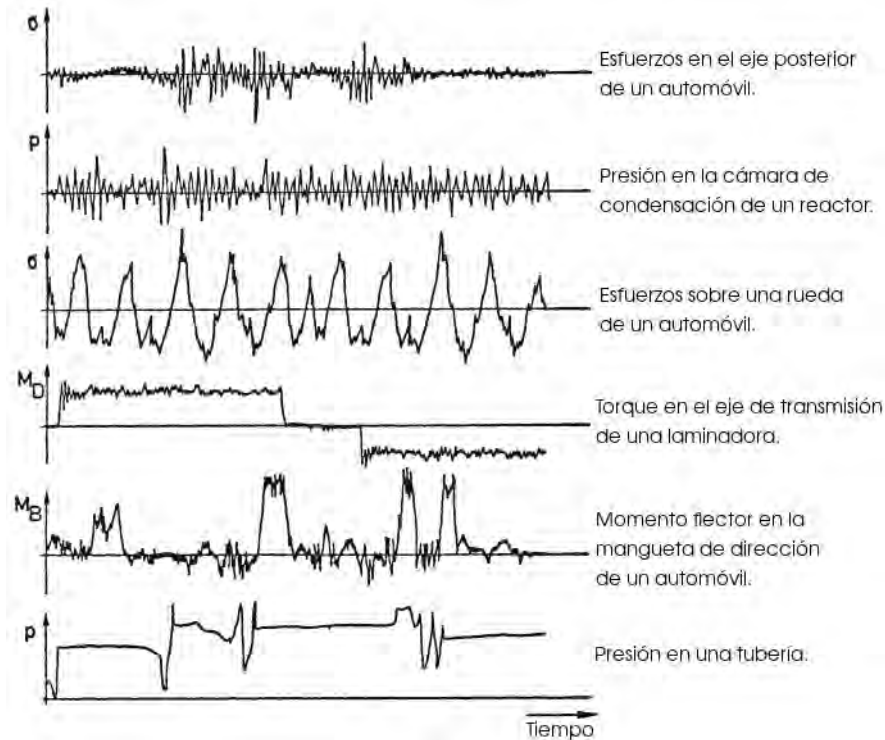


Figura 2.4: Ejemplos de cargas de amplitud variable (Fuente: adaptado de Haibach 2006)

Estas cargas son usualmente conocidas como *historial de cargas* o *espectro de cargas*. Si se desea realizar un análisis o diseño de fatiga adecuado, es necesario tener una representación real de este historial. Por ello, se debe garantizar que las mediciones que se realicen de las fuerzas aplicadas sobre un componente o una estructura sean precisas. Para obtener estas mediciones usualmente se emplean transductores (usualmente *strain gauges*) que son adheridos en las partes críticas de los componentes. Una forma de analizar elementos sometidos a cargas cíclicas variables es empleando el concepto de *daño* que es definido como *una fracción de la vida útil que ha sido consumida a causa de un evento o una serie de eventos* (Stephens et al. 2001). Cuando la suma de estas fracciones resulta en 1 o 100% se espera o se predice una falla. Este análisis también es conocido como estudio del *daño acumulativo* (Pook 2007) y se han propuesto varias teorías para describir este comportamiento. En la siguiente sección se describen las teorías más relevantes.

2.1.3 Teorías de daño acumulativo

El estudio del daño acumulativo en la fatiga es un problema antiguo que aún no ha sido resuelto pero se han propuesto diversas teorías para explicar este fenómeno. El primer concepto relacionado con el daño fue propuesto hace más de noventa años por Palmgren (1924) y posteriormente fue expresado matemáticamente por Miner (1945) (Fatemi and Yang 1998).

Teoría de Palmgren-Miner

En la teoría o regla de Palmgren-Miner, se asume que el daño (D) se acumula de forma lineal para distintos ciclos. Por ejemplo, supongamos que se aplica una carga σ_{A1} sobre un elemento de máquina durante N_1 ciclos y de la curva S-N se obtiene que los ciclos necesarios para la falla bajo este esfuerzo es N_{f1} (ver figura 2.5). Entonces la fracción de daño que ha sido acumulado será N_1/N_{f1} . Además, en la figura se observa que después se aplica un esfuerzo σ_{A2} durante N_2 ciclos. Ahora como resultado se añade una nueva fracción de daño N_2/N_{f2} . La teoría de Palmgren-Miner establece que el elemento fallará por fatiga cuando la suma de estas fracciones sea igual a uno:

$$D = \frac{N_1}{N_{f1}} + \frac{N_2}{N_{f2}} + \frac{N_3}{N_{f3}} + \dots + \frac{N_n}{N_{fn}} = \sum_{i=1}^n \frac{N_i}{N_{fi}} = 1 \quad (2.1)$$

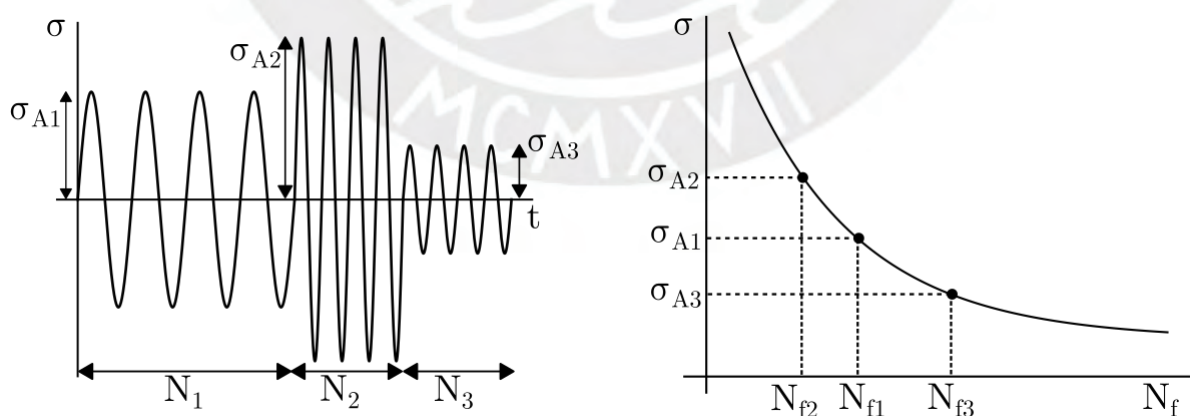


Figura 2.5: Gráfico de carga de amplitud variable y curva S-N

La teoría lineal de Miner nos brinda una primera aproximación para analizar elementos

sometidos a cargas de amplitud variable; no obstante, esta posee dos importantes limitaciones. Primero, esta teoría solo toma en cuenta el daño causado por esfuerzos mayores al esfuerzo límite de fatiga y en la industria; sin embargo, es común encontrar máquinas que continuamente están sometidas esfuerzos por debajo de este límite. Las pruebas de laboratorio han demostrado que estos tipos de ciclos de carga si producen daño en los componentes (Kondo 2003). La segunda limitación es que no se considera el orden en el que las cargas son aplicadas. Si es que un elemento es inicialmente sometido a un esfuerzo de amplitud considerable, este influenciará en el daño que causaran las siguientes cargas (como sugiere la evidencia experimental en Fatemi and Yang 1998).

Con el fin de corregir las deficiencias del modelo de Miner, se plantearon nuevos enfoques: teorías que consideran el efecto de los esfuerzos menores al límite de fatiga y teorías que consideran una acumulación de daño no lineal. A continuación se presentan tres teorías que consideran el daño de los ciclos de carga que son menores al límite de fatiga (Miner modificada, Haibach y Corten-Dolan) y una teoría que considera la no linealidad de las cargas (Marco-Starkey).

Teoría de Miner modificada

Con el fin de entender esta teoría es necesario describir un modelo simplificado del diagrama S-N. La curva de Wöhler puede ser representada como una línea recta empleando una relación logarítmica entre los esfuerzos ($\log(S)$ o $\log(\sigma)$) y los ciclos ($\log(N)$). Esta relación fue propuesta por (Stephens et al. 2001) y se expresa con la siguiente relación:

$$\sigma = aN^b \quad (2.2)$$

El coeficiente a representa el valor del esfuerzo en un ciclo y el coeficiente b representa la pendiente de la curva $\log(\sigma)$ vs $\log(N)$ (ver figura 2.6). De la expresión de la pendiente b (ecuación 2.3) se puede obtener una relación para cualquier N y σ (ecuación 2.3):

$$b = \frac{\log\sigma_1 - \log\sigma_2}{\log N_1 - \log N_2} \quad (2.3)$$

$$\frac{N_1}{N_2} = \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2}\right)^{1/b} \quad (2.4)$$

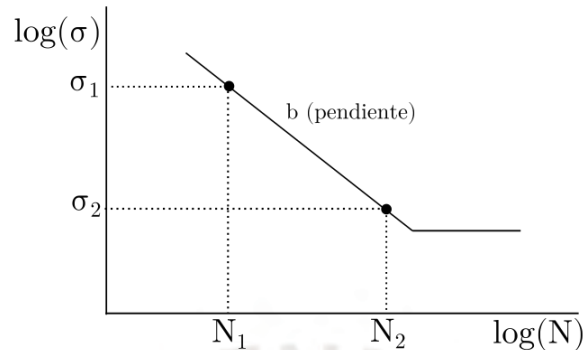


Figura 2.6: Curva S-N logarítmica

La teoría de Miner modificada hace uso de esta curva para considerar el efecto del daño causado por los esfuerzos que se encuentren debajo del límite de fatiga. Para aplicar esta teoría simplemente se extrapola la línea del diagrama S-N (ver figura 2.7). Este modelo se usa frecuentemente en el diseño; no obstante, su aplicación es dependiente del historial de carga, el material y otros factores.

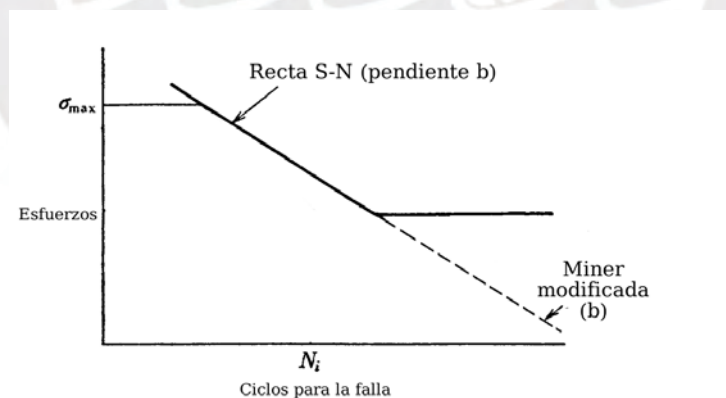


Figura 2.7: Curva S-N Miner modificada (Fuente: Kondo 2003)

Teoría de Haibach

En 1970 Haibach propuso otra modificación a la curva S-N en la que se usa una recta con una pendiente diferente. Esta teoría propone una modificación a la relación de Basquin (ecuación 2.5) para el tramo que se encuentran debajo del límite de fatiga. Es decir, el gráfico S-N esta

compuesto por dos rectas: la primera tiene una pendiente b y la segunda tiene una pendiente $2b + 1$ (Haibach 2006) (ver figura 2.8).

$$\sigma = aN^{2b+1} \quad (2.5)$$

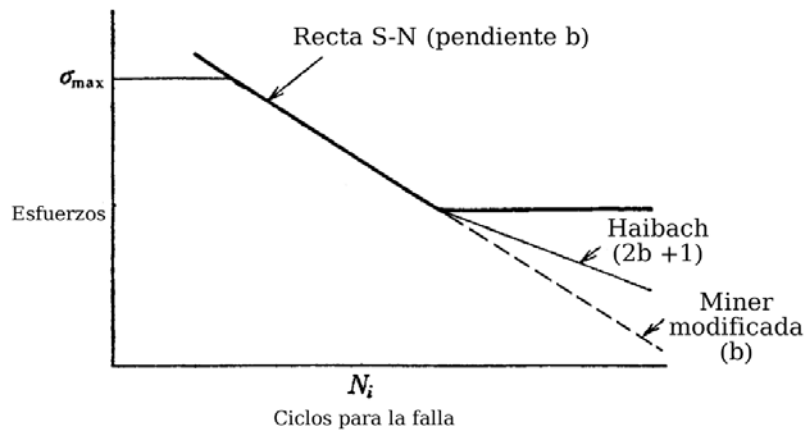


Figura 2.8: Curva S-N con modificación de Haibach (Fuente: Kondo 2003)

Se ha comprobado que la modificación de Haibach brinda una estimación adecuada para los casos en el que el número de ciclos es elevado (Kondo 2003).

Teoría de Corten-Dolan

Corten y Dolan propusieron un modelo no lineal de daño acumulativo que toma en cuenta los efectos de la interacción de las cargas. Esta teoría también puede ser expresada a través de una modificación en la curva S-N. En este enfoque se traza una nueva recta que tiene como punto inicial al máximo esfuerzo presente en el espectro de cargas (ver figura 2.9). Esta recta tiene una nueva pendiente que se determina a través de la siguiente relación:

$$\sigma^{m'} = C \quad (2.6)$$

Donde $m' = \beta m$ y m y C son constantes que depende del material. La constante β no es un valor único, se determina experimentalmente y esta relacionado con el historial de cargas y los materiales (su valor se encuentra ente 0.7 y 0.95 Kondo 2003).

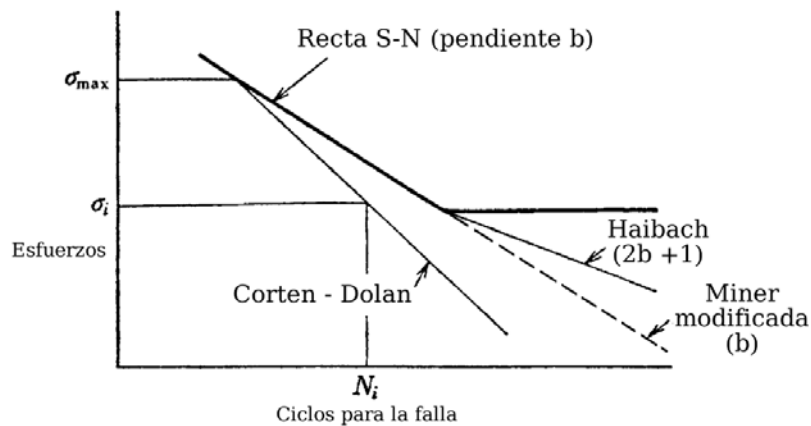


Figura 2.9: Curva S-N Corten-Dolan (Fuente: Kondo 2003)

Teoría de Marco-Starkey

En 1948 Richart y Newmark propusieron el concepto de diagrama de daño que permite analizar acumulaciones de daño no lineales. Este diagrama relaciona al daño (D) con la proporción de los ciclos (r_i), donde la proporción de los ciclos r_i es N_i/N_{fi} (ver figura 2.10).

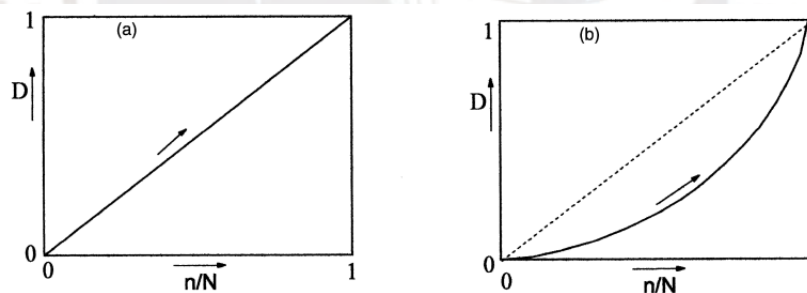


Figura 2.10: Gráfica de daño lineal(a) y daño no lineal(b) (Fuente: Schijve 2009)

En 1954 Marco y Starkey, empleando el concepto del diagrama de daño y realizando varios ensayos, propusieron la primera teoría que no asume la linealidad de las cargas y la representaron con la siguiente relación:

$$D = \sum_{i=1}^n \left(\frac{N_i}{N_{fi}}\right)^{x_i} = \sum_{i=1}^n r_i^{x_i} \quad (2.7)$$

Donde x_i es una cantidad relacionada con la amplitud de la carga y se determina a partir de ensayos previos. En esta teoría una recta diagonal representa la regla de Miner que es el caso especial de la ecuación cuando $x_i = 1$. Se demostró que los cálculos de la vida útil realizados

empleando la teoría de Marco-Starkey sí son independientes de la secuencia de aplicación de las cargas Fatemi and Yang 1998.

2.2 Espectros de carga

Como se puede observar, existen diversas teorías que permiten analizar la fatiga de un elemento cuando este se encuentra sometido a cargas de amplitud variable. Todas estas teorías dependen de la identificación del número de ciclos presentes en un espectro de cargas. No obstante, estos historiales usualmente son aleatorios; por ejemplo, en la figura 2.11 se puede observar un espectro de la torsión en la transmisión de un vehículo en dos escalas (la figura de la derecha muestra una ampliación del tramo inicial del historial). Este es un caso real y si es que se requiere determinar el número exacto de los ciclos de carga se debe realizar un procedimiento adicional denominado *conteo de ciclos*.

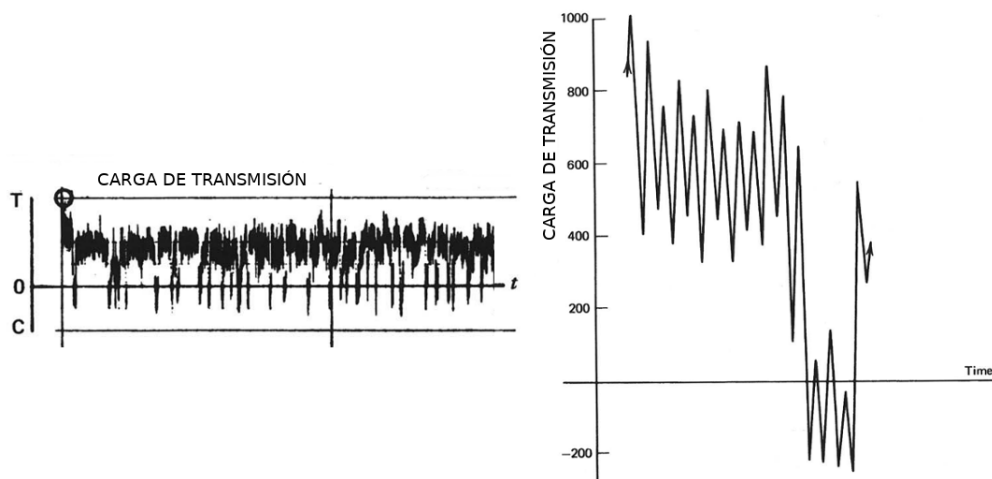


Figura 2.11: Historial de la fuerza de torsión en la transmisión de un vehículo (Fuente: adaptado de Stephens et al. 2001)

2.2.1 Conteo de ciclos

El conteo de ciclos se emplea para determinar la cantidad de ciclos presentes en un historial de esfuerzos o deformaciones. Existen varios métodos para contar ciclos y debido a su importancia en los ensayos de fatiga, el conteo de ciclos es un procedimiento normalizado (ASTM 1049-85). A continuación se describirán los métodos de conteo más comunes.

Conteo Level-Crossing

En este método primero se divide al eje de los esfuerzos en distintos niveles. Luego se realiza una cuenta para dos casos: cada vez que la pendiente positiva de un tramo de la curva del esfuerzo se ubique por encima de un nivel positivo y cada vez que la pendiente negativa de un tramo de la curva del esfuerzo se ubique por debajo de un nivel negativo. Finalmente empleando como referencia los cruces que se contaron se busca cuál es el tramo o ciclo más grande luego se continúa con el siguiente más pequeño hasta analizar todos los cruces. El proceso de conteo de tramos se puede observar en la figura 2.12 mientras que el conteo final de ciclos se aprecia en la figura 2.13.

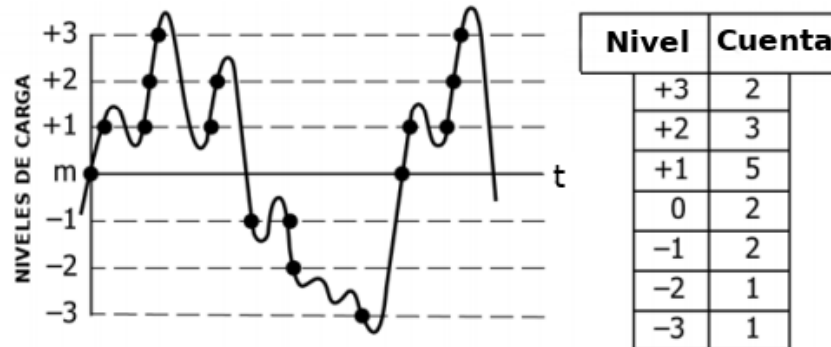


Figura 2.12: Método Level-Crossing: conteo inicial (Fuente: ASTM 2017)

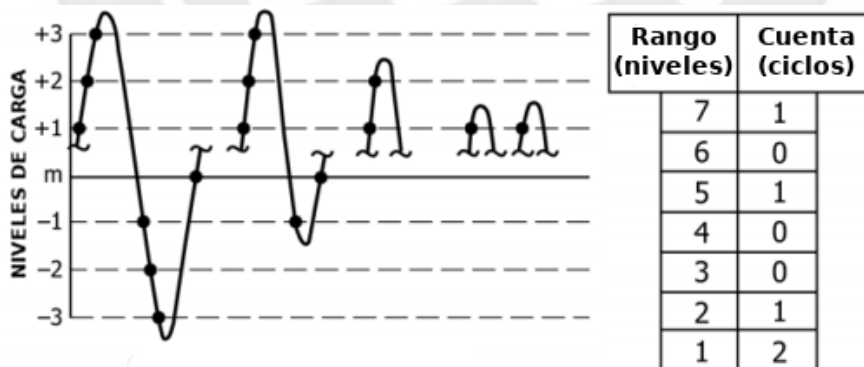


Figura 2.13: Método Level-Crossing: identificación de ciclos (Fuente: ASTM 2017)

Conteo Peak

En el conteo Peak se identifica la ocurrencia de máximos y mínimos relativos de carga. Primero se divide el eje de los esfuerzos en distintos niveles. Luego se identifican los picos que se

encuentren por encima de un nivel definido y los valles que se encuentren debajo de un nivel definido. Finalmente para determinar el primer ciclo de carga se empieza uniendo el pico de mayor nivel con el valle de menor nivel. Para los demás ciclos se realiza un proceso iterativo y se continua uniendo los picos y valles restantes. El proceso de identificación de picos y de valles se observa en la figura 2.14 y el proceso de conteo de ciclos se muestra en la figura 2.15.

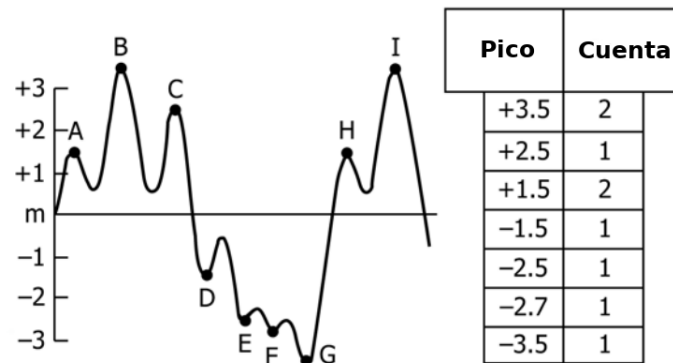


Figura 2.14: Método Peak: identificación de picos y valles (Fuente: ASTM 2017)

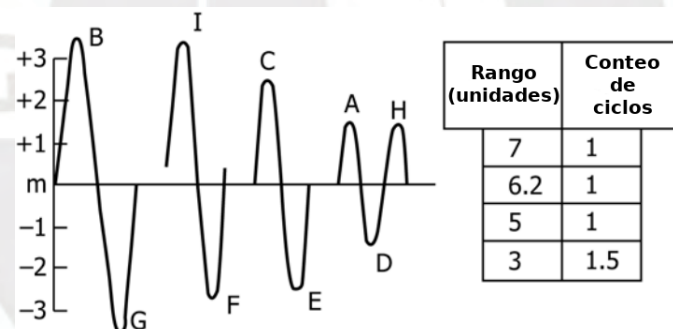


Figura 2.15: Método Peak: identificación de ciclos (Fuente: ASTM 2017)

Conteo Simple-Range

En este método de conteo se denomina rango positivo a la diferencia entre un valle y un pico consecutivos y rango negativo a la diferencia entre un pico y un valle consecutivos. Si solo se cuentan rangos positivos o rangos negativos entonces estos son contados como ciclos. Si se cuentan ambos, entonces cada uno es contado como medio ciclo. En la figura 2.16 se observa el conteo de ciclos y en la figura 2.17 se muestra la identificación de rangos.

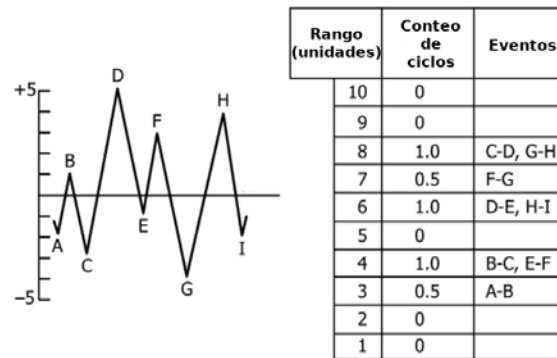


Figura 2.16: Método Simple-Range: identificación de ciclos (Fuente: ASTM 2017)

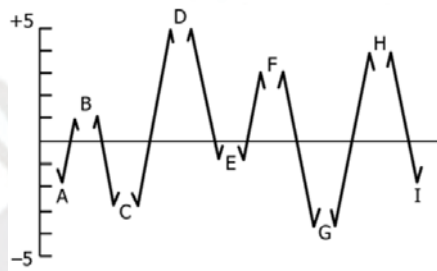


Figura 2.17: Método Simple-Range: identificación de rangos (Fuente: ASTM 2017)

Conteo Rainflow

El conteo de ciclos Rainflow fue propuesto por Matsuishi y Endo en 1968 y es el método de conteo más empleado. El procedimiento a seguir para aplicar este algoritmo es el siguiente:

1. Reordenar el historial con el fin de empezar con el pico más alto o el valle más bajo.
2. Iniciar un recorrido de la curva desde el pico más alto (o el valle más bajo) y continuar hasta el siguiente valle(o pico). El recorrido continua hasta que la magnitud del siguiente valle (o pico) es igual o mayor que la del pico (o valle) inicial.
3. Repetir el mismo procedimiento para el siguiente pico o valle y continuar hasta el final.
4. Repetir el proceso para todos los rangos o partes de rangos que no han sido analizados.

A continuación se describe un ejemplo de la aplicación de este método (este ejemplo fue originalmente propuesto por Stephens et al. 2001). Supongamos que se tiene el historial de cargas mostrado en la figura 2.18:

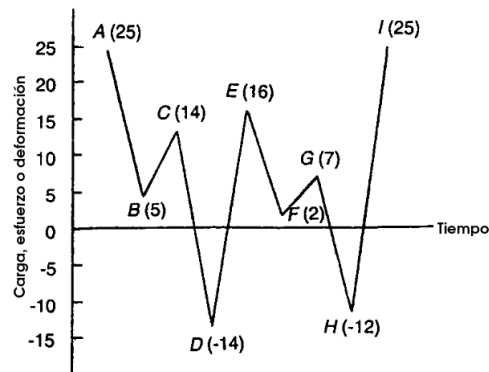


Figura 2.18: Método Rainflow: ejemplo de historial (Fuente: Stephens et al. 2001)

El análisis se puede observar en la figura 2.19. Primero se empieza por el pico A y se realiza un recorrido hasta el siguiente cambio de sentido, B. El siguiente pico es C que es menor que A por lo tanto se continúa el recorrido hasta B' y luego a D. Los dos siguientes picos E y G son menores que A entonces se continúa hasta el final de la historial. De este primer recorrido se obtiene el medio ciclo A-D-I. Ahora se inicia con el valle B, se realiza el recorrido hasta C. Como el siguiente valle D tiene mayor magnitud a B el recorrido termina aquí y se obtiene el medio ciclo B-C. Este procedimiento se repite hasta analizar todo el historial de cargas. Los resultados del conteo se muestran en la figura 2.20. Por ejemplo, se pueden observar los ciclos anteriormente calculados: A-D-I y B-C-B'.

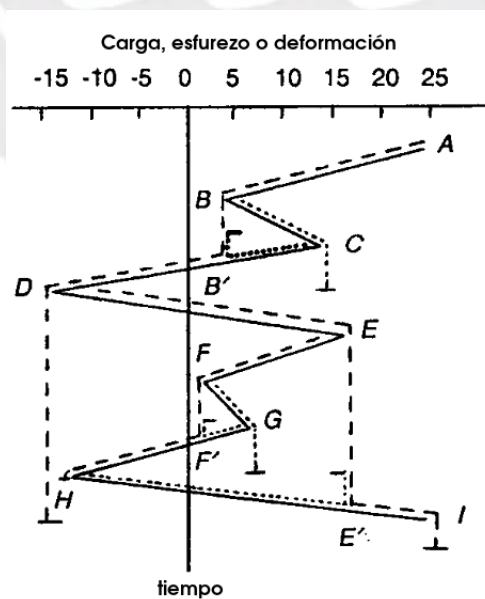


Figura 2.19: Método Rainflow: ejemplo de conteo (Fuente: Stephens et al. 2001)

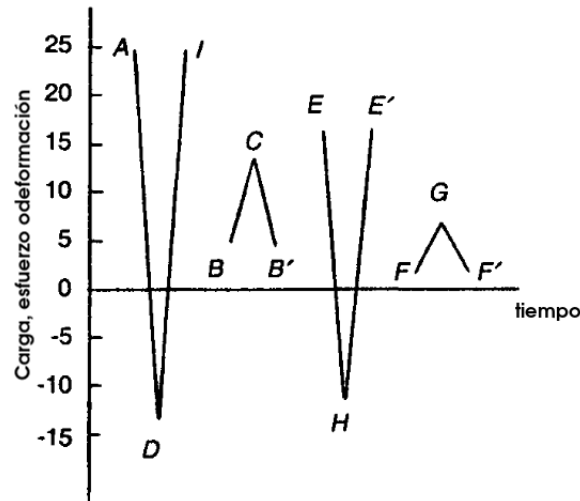


Figura 2.20: Método Rainflow: resultado (Fuente: Stephens et al. 2001)

Una de las ventajas del método de Rainflow es que se han desarrollado algoritmos basados en este método. Es decir, se pueden realizar conteos de ciclos de cargas complejas empleando software.

2.2.2 Medición de deformación empleando transductores

Los esfuerzos no pueden ser medidos directamente. Por esta razón, con el fin de determinar el valor de la amplitud de los esfuerzos, se tiene que medir la deformación. Ciertamente, una adecuada medida de la deformación es uno de los factores más significativos para predecir la vida por fatiga de un material (Lee et al. 2004). En los ensayos de fatiga, la adquisición de datos se realiza empleando transductores y uno de los métodos más empleados para medir la deformación es usando galgas extensiométricas, también conocidas por su nombre en inglés, “*strain gauges*”.

Las galgas extensiométricas son sensores piezoresistivos y se emplean para determinar experimentalmente la deformación de un objeto. En todos los sensores piezoresistivos, la resistencia eléctrica (R) depende de las características del material y de su geometría. Específicamente, la característica del material está definida por la resistividad (ρ) y, la geometría, se describe tomando en cuenta el área transversal del material (A) y su longitud (L) de la siguiente forma: el valor de la resistencia eléctrica (R) incrementa si la longitud del material aumenta y, disminuye, si el área transversal también se incrementa.

Para ilustrar como es posible obtener el valor de la deformación empleando *strain gauges*, observemos la variación de la resistividad en un cable metálico, que es el material que se emplea en este tipo de sensores. En la Figura 2.21a, se observa un cable de longitud L , área A , diámetro d y resistividad ρ . Así mismo, en la Figura 2.21b, se observa al mismo cable siendo sometido a una fuerza axial F que lo deforma y ahora el cable tiene una nueva longitud L_F y un nuevo diámetro d_F , además, por efecto piezoresistivo, un nueva resistividad ρ_F .

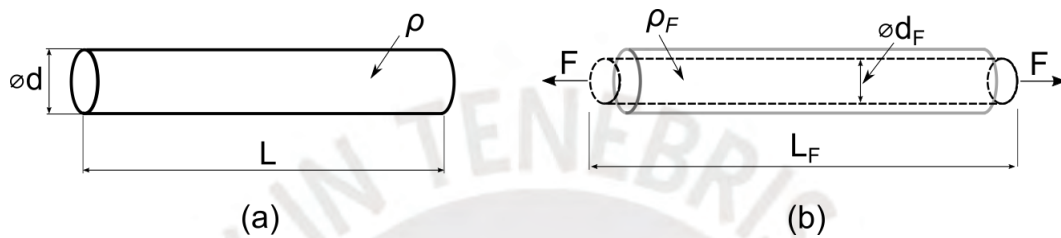


Figura 2.21: Cable metálico sometido a una fuerza.

En ambos casos, en las Figuras 2.21a y 2.21b, los valores de la resistividad R y R_F están definidas por las ecuaciones:

$$R = \rho \left(\frac{L}{A} \right), \text{ donde } A = \frac{\pi}{4} d^2 \quad (2.8)$$

$$R_F = \rho_F \left(\frac{L_F}{A_F} \right), \text{ donde } A_F = \frac{\pi}{4} d_F^2 \quad (2.9)$$

A partir de estas ecuaciones, se puede determinar el valor del cambio de resistencia ΔR que es necesario para determinar la deformación ε del material.

$$\varepsilon = \frac{L_F - L}{L} = \frac{\Delta L}{L} \quad (2.10)$$

$$\Delta R = R_F - R = \rho_F \left(\frac{L_F}{A_F} \right) - \rho \left(\frac{L}{A} \right) \quad (2.11)$$

La relación entre la variación de la resistencia ΔR y la deformación ε esta definida por un parámetro conocido como *Gauge Factor* (GF). Es decir, si es que el valor del GF es conocido, es posible determinar el valor de la deformación a partir de medición de la variación de la resistencia en una *strain gauge*. Debido a que las galgas extensiométricas son sensores

comunmente empleados en la industria, se ha determinado de forma empírica que el valor del *Gauge Factor* en *strain gauges* metálicas es aproximadamente ≈ 2 (Figliola and Beasley 2019).

$$GF = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon} \text{ por lo tanto } \varepsilon = \frac{\Delta R/R}{GF} \quad (2.12)$$

Strain gauges

Las galgas extensiométricas se fijan a la superficie de los materiales que serán sometidos a ensayos experimentales empleando adhesivos. De esta forma, las *strain gauges* se deforman junto con los objetos y es posible medir valores experimentales de esta deformación (ver Figura 2.22). Como se describió en la sección anterior, para determinar la deformación se emplea el parámetro *Gauge Factor* (GF) que es indicado en las especificaciones técnicas de las *strain gauges* y en la mayoría de los casos es aproximadamente 2.

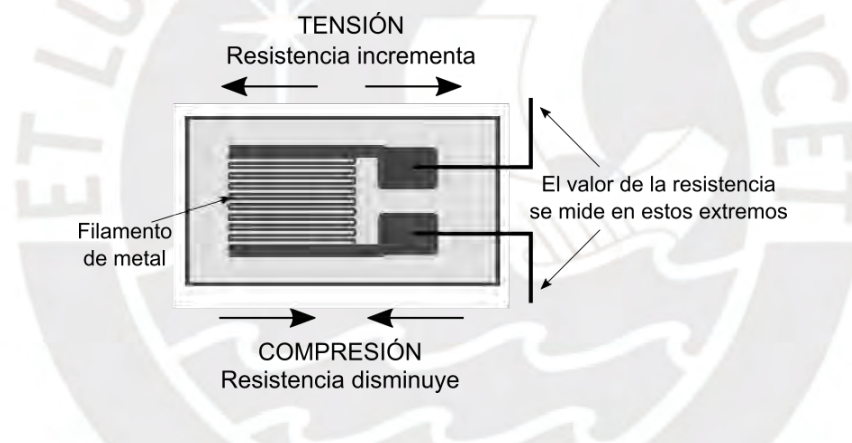


Figura 2.22: Strain gauge y sus partes.

En la Figura 2.22 se muestra una galga extensiométrica de tipo lineal. Sin embargo, existen *strain gauges* para diversas aplicaciones; por esta razón, es posible encontrar en el mercado galgas extensiométricas con distintos tipos de geometría (ver Figura 2.23). En general, cada tipo de geometría de *strain gauge* se emplea para un determinado caso, ya que estos arreglos son diseñados para facilitar la medición y determinar el valor de la deformación de forma más precisa. Por ejemplo, las *strain gauges* de tipo roseta en 90° se emplean cuando no se conoce la dirección de aplicación de las cargas o cuando estas varían. Por eso, las galgas extensiométricas de tipo roseta en 90° son un arreglo apropiado si es que se pretende realizar un análisis de deformación empleando el círculo de Mohr.

En la Figura 2.23 se pueden observar distintos tipos de *strain gauges*: Roseta torque(a), patrón lineal(b), roseta delta(c), patrón para esfuerzos residuales(d), tipo diafragma (e), patrón tipo tee(f), roseta rectangular(g) y roseta apilada(h).

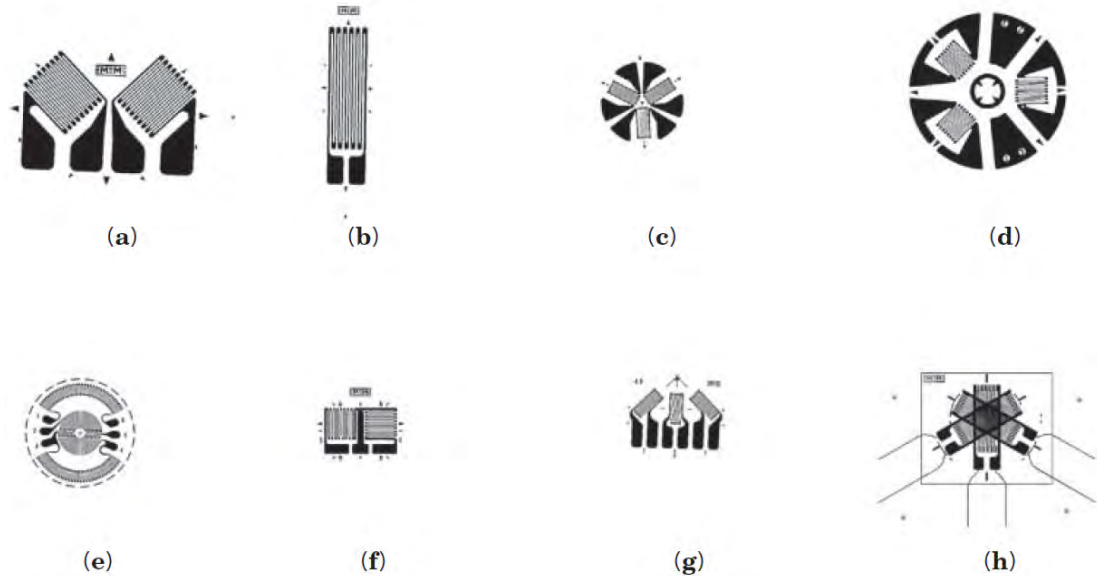


Figura 2.23: Tipos de strain gauges (Fuente: MicroMeasurements 2016).

Hasta ahora se ha descrito que es posible determinar la deformación empleando galgas extensiométricas; no obstante, el valor de la variación de la resistencia ΔR que se obtiene durante la medición es pequeño. Así mismo, medir la variación de la resistencia es poco práctico y se prefiere medir siempre un cambio de voltaje. Por este motivo, se emplea un circuito puente Wheatstone.

Circuitos de adquisición: puente Wheatstone

La sensibilidad de la medición de una *strain gauge* en una probeta de acero está en el orden de $10^6 \Omega/kPa$ (Figliola and Beasley 2019). En consecuencia, es necesario emplear un circuito puente Wheatstone (ver Figura 2.24). En el capítulo 4 de este trabajo, se detalla como se obtiene la ecuación que relaciona la deformación ε y el *gauge factor* (GF) con los valores de voltaje de entrada V_i y voltaje de salida V_o del puente Wheatstone.

$$\varepsilon = \frac{-4V_o}{GF(V_i + 2V_o)} \quad (2.13)$$

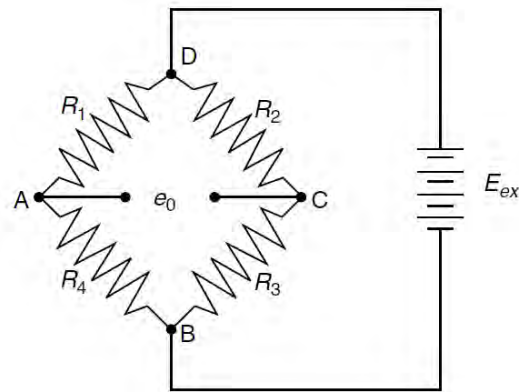


Figura 2.24: Circuito puente Wheatstone (Fuente: Lee et al. 2004).

Finalmente, el puente Wheatstone, también es útil en la medición de deformación porque puede ser modificado y se adapta a distintas configuraciones. Estas configuraciones permiten balancear el circuito en caso se requiera compensar errores en la medición por factores como la temperatura, por ejemplo (ver Figura 2.25).

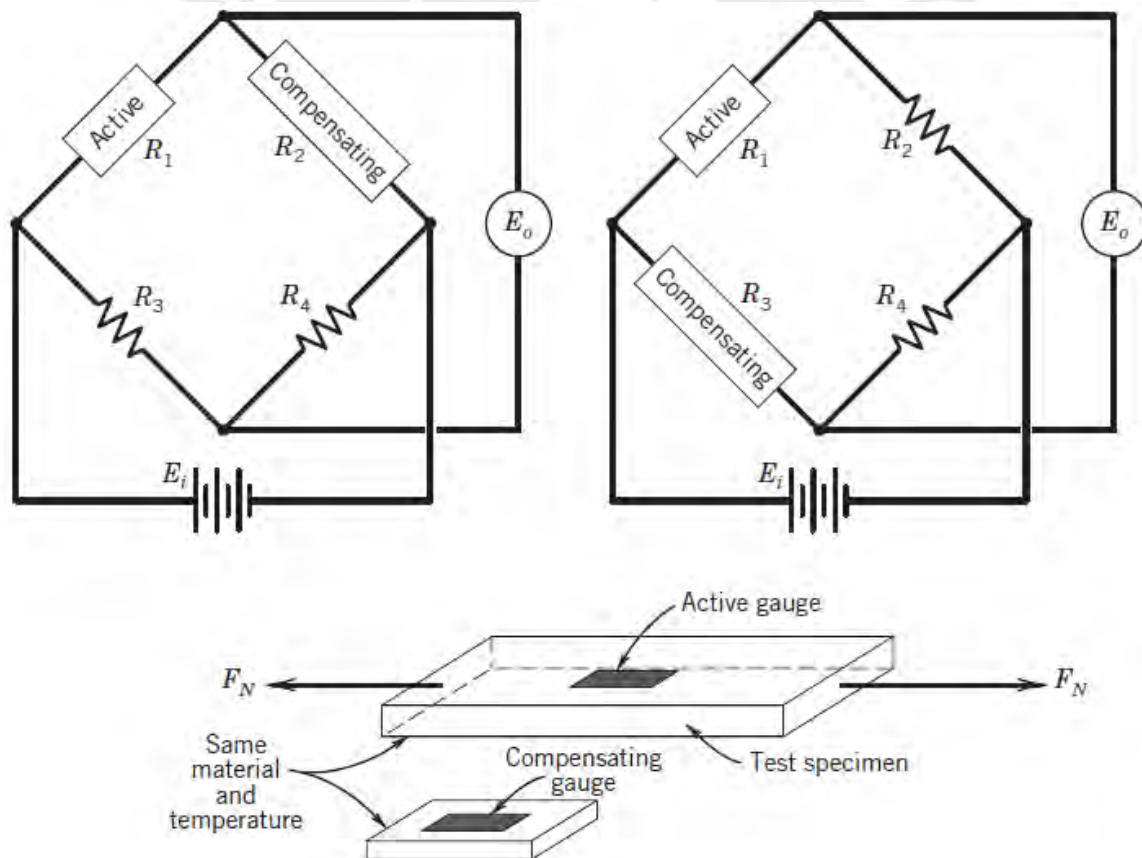


Figura 2.25: Circuitos puente Wheatstone de compensación de temperatura (Fuente: Figliola and Beasley 2019).

2.3 Estado del arte

Los ensayos de fatiga, en la mayoría de los casos, forman parte de las etapas de diseño de un producto. Por esta razón, es común encontrar diversos tipos de máquinas de ensayo de fatiga en el mercado y, usualmente, se clasifican en función a su utilidad o al tipo de industria para la cual serán utilizadas. Sin embargo, debido a que el objetivo principal de este trabajo se relaciona con la medición de la deformación y cargas de amplitud variable, es necesario encontrar dispositivos que cuenten con este tipo de funciones o con características similares. A continuación, se describirán máquinas existentes en el mercado que poseen características relacionadas con los objetivos planteados en el primer capítulo.

2.3.1 ADMET: eXpert 9300 Series

La máquina de flexión rotativa *eXpert 9300* de ADMET se emplea para realizar ensayos de fatiga con cargas alternantes en materiales metálicos (ADMET 2024). Esta máquina es compacta, tiene una frecuencia de muestreo de 100Hz y cumple con la normativa ISO 1143 para ensayos de fatiga con flexión rotativa. Así mismo, la ADMET 9300 cuenta con dos servoactuadores para generar las cargas (momentos torsor y flector) y con celdas de carga para medir las fuerzas aplicadas sobre la probeta a ser ensayada. Esta máquina también cuenta con el sistema digital *eP2 Digital Controller* que es usado para la configuración y monitoreo de la *eXpert 9300*. El *eP2 controller* se emplea para controlar el número de ciclos del ensayo, configurar las dimensiones de la probeta, la magnitud del esfuerzo, y también, para mostrar todas estas variables en una pantalla led. La máquina *eXpert 9300* y el sistema de control *eP2* (ver figura 2.26) pueden aplicar momentos de hasta 50 N-m y tienen una velocidad de 300 rpm hasta 6000 rpm. Ambos dispositivos se usan en conjunto para realizar un ensayo de fatiga de flexión rotativa y generar los datos necesarios para graficar una curva S-N.

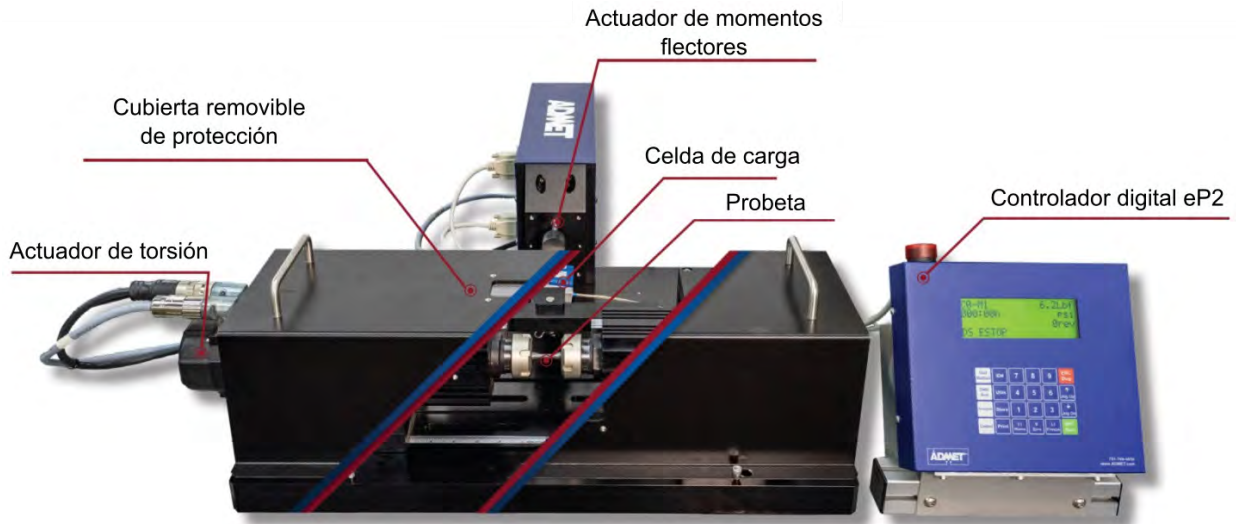


Figura 2.26: ADMET eXpert 9300 Series (Fuente: Adaptado de ADMET 2024)

2.3.2 TQ: SM1090V

La TQ SM1090V (TecQuipment 2024) usa un diseño parecido a la máquina original de ensayos de fatiga de flexión rotativa de Wohler (ver figura 2.1). La SM1090V está compuesta por dos sistemas (ver figura 2.27): la unidad principal, que está conformada por los componentes mecánicos, y la unidad de control e instrumentación, que está conformada por los componentes eléctricos y electrónicos. La unidad principal cuenta con un motor que se emplea para hacer rotar una probeta que se encuentra en voladizo. Además, este sistema cuenta con un mecanismo para aplicar cargas en el extremo de la probeta que se encuentra sin ningún tipo de apoyo. El segundo sistema, la unidad de control e instrumentación, se emplea para controlar los parámetros del ensayo y mostrar la magnitud de las cargas, la velocidad del ensayo y el número de ciclos. Así mismo, la cantidad de ciclos se configura usando un variador de frecuencia que se emplea para controlar la velocidad del motor que se encuentra montado en la unidad principal. Adicionalmente, el sistema de control e instrumentación puede conectarse a una computadora a través de una conexión USB y, con el uso de un software de monitoreo (*VDAS Onboard*), es posible mostrar la captura de datos en tiempo real en una gráfica. La máquina TQ SM109V es una herramienta para uso académico; por esta razón, es portable y también incluye probetas de distintos materiales metálicos.



Figura 2.27: TQ SM1090V (Fuente: Adaptado de TecQuipment 2024)

2.3.3 Zwick/Roell Control Cube y software Cubus

El *Control Cube* de Zwick Roell es un dispositivo de control de actuadores servo-hidráulicos para máquinas de ensayos de materiales (Zwick/Roell 2023). Debido a que las máquinas servo-hidráulicas son usadas comúnmente en ensayos de fatiga, el *Control Cube* es un sistema ideal para este tipo de aplicaciones. El dispositivo está diseñado para ser modular, flexible y cuenta con hasta 32 canales (entre analógicos y digitales). Así mismo, el dispositivo cuenta con amplificadores universales para sensores, funciona con frecuencias de muestreo de hasta 4kHz y cuenta con una resolución de 19 bits. El *Control Cube* se conecta a una computadora a través de una conexión Ethernet para garantizar una alta tasa de transferencia de datos. El software Cubus es una aplicación ideal para complementar al *Control Cube* durante los ensayos de fatiga. Cubus cuenta con herramientas para diversas funciones para adquisición de datos, control de secuencias de ensayos, configuración de parámetros de ensayo, generación de gráficos en tiempo real e incluso cuenta con funciones de control PID. A diferencia de las otras máquinas equivalentes, el *Control Cube*, es un sistema de control que puede ser empleado para aplicar cargas de amplitud variable en cualquier tipo de máquina o configuración. Así mismo, cuando el *Control Cube* se usa en conjunto con el software de ensayos Cubus, se obtiene como resultado

un sistema robusto de monitoreo de ensayos de fatiga para cargas de amplitud variable (ver figura 2.28).

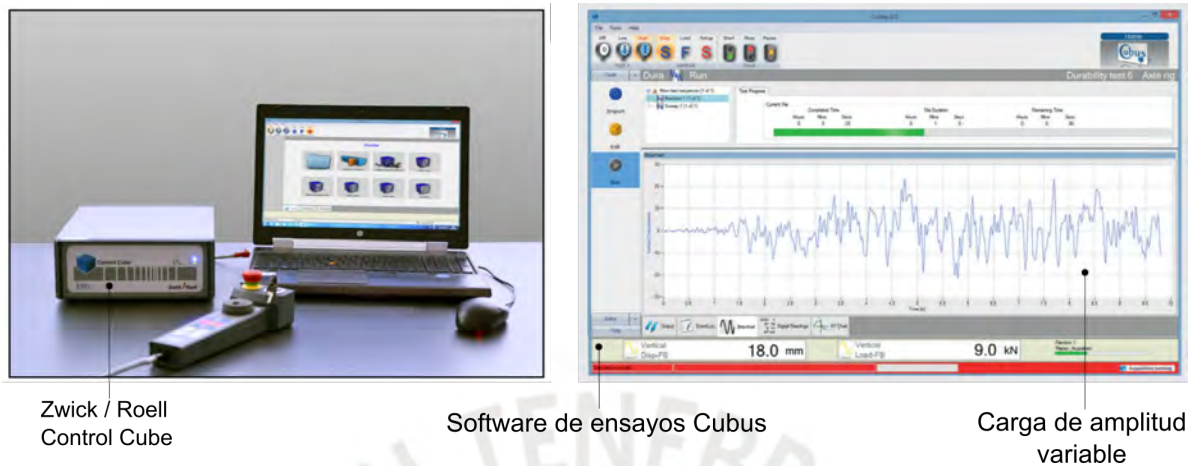


Figura 2.28: Control Cube (Fuente: Adaptado de Zwick/Roell 2023) y software Cubus (Fuente: Adaptado de Zwick/Roell 2024).

2.3.4 Zwick/Roell LTM 1/2/3

El grupo Zwick Roell cuenta con diversos productos para ensayos de fatiga y, dentro de su catálogo, se puede destacar a la línea de máquinas de ensayos electrodinámicos de materiales LTM. Esta línea de productos de Zwick Roell comprende una serie de máquinas de ensayos que emplean motores lineales para generar la fuerza aplicada en los materiales a evaluar y que no requieren de componentes oleohidráulicos o neumáticos (Zwick/Roell 2024). Además, las máquinas LTM pueden realizar ensayos dinámicos con frecuencias de hasta 100 Hz y en las versiones de 1kN, 2kN y 3kN existen modelos que pueden ser montados sobre mesas de trabajo, una característica importante que facilita la portabilidad de esta serie de máquinas de ensayos. Adicionalmente, éstas máquinas cuentan con dos componentes importantes. Primero, el software *testXpert* que se emplea para realizar la configuración de la captura de datos de la mayoría de máquinas de ensayo de Zwick Roell. Así mismo, para la captura de datos, se emplea el dispositivo *testControl II*, un módulo electrónico que es capaz de medir señales con 24 bits de resolución y que cuenta con una frecuencia de clock de 10kHz. El sistema integrado (ver figura 2.29): la máquina de ensayos LTM, el dispositivo electrónico *testControl II* y el software *testXpert* son un ejemplo de un sistema mecatrónico y sirven como un modelo ideal de una

máquina equivalente de ensayos de fatiga que se pretende mostrar durante el desarrollo de este documento.

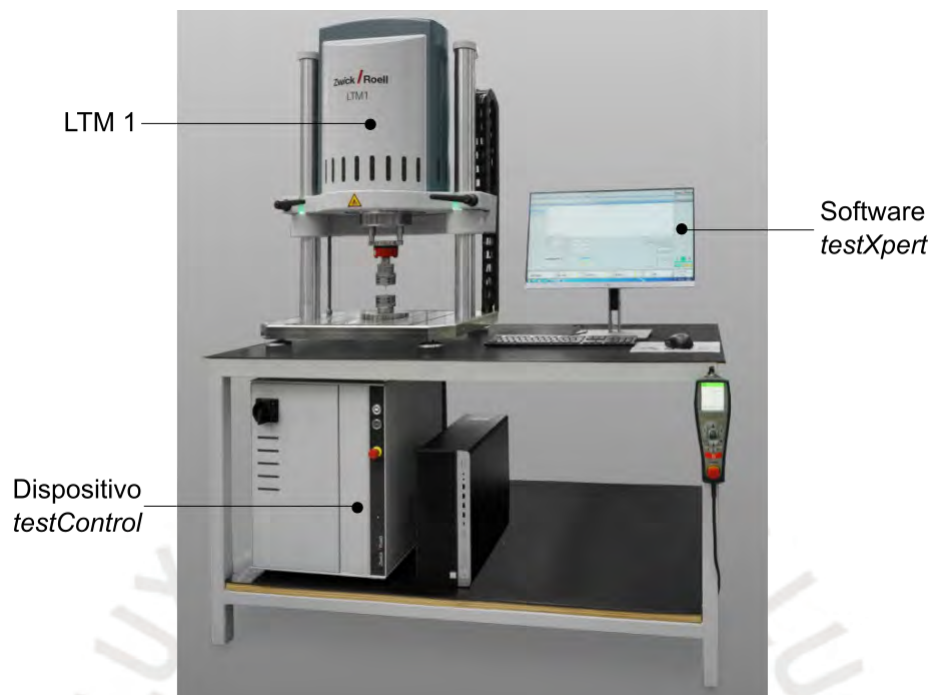


Figura 2.29: Zwick/Roell LTM 1 (Fuente: Adaptado de Zwick/Roell 2024)

2.3.5 Tabla comparativa de máquinas equivalentes

En este capítulo se describieron cuatro máquinas equivalentes. Todas estas máquinas fueron diseñadas con el mismo propósito: realizar ensayos de fatiga; sin embargo, algunas de sus características son distintas y este es un aspecto que se debe tomar en cuenta. Por ejemplo, se diferencian en la forma que son aplicadas las cargas durante el ensayo y en cómo se adquieren o miden los datos obtenidos. Así mismo, es importante notar, que la mayoría de las máquinas cuentan con un software para mostrar los datos en tiempo real. Finalmente, otra característica significativa que es común en todas las máquinas es que todas están divididas en sistemas independientes que cumplen diversas funciones ya sean del tipo mecánico, electrónico, eléctrico, de control o de software. Es decir, las máquinas equivalentes presentadas en esta sección son sistemas mecatrónicos. Con el fin de resumir la diferencia entre cada una de estas máquinas, a continuación, se muestra una evaluación cualitativa de cada uno de los sistemas de monitoreo encontrados. Se compararon seis características: el uso de un controlador, la forma en la que

se registran los datos, el procesamiento de datos, el uso de un ordenador o PC, la cantidad de entradas a usar y si es que se requiere de un software propietario.

Tabla 2.1: Tabla de comparativa de sistemas de monitoreo encontrados en el mercado.

	ADMET eXpert 9300 Series	TQ - SM1090V	Control Cube	LTM 1/2/3
Controlador	Si	Si	Si	Si
Registro de datos	Si	Si	Si	Si
Procesamiento de datos	Manual	Manual	Automático	Automático
Uso de ordenador o PC	No	Si	Si	Si
Número de entradas disponibles	Única	Única	Múltiple	Única
Requiere de software propietario	No	Si	Si	Si

Tabla 2.2: Tabla de comparativa de la interfaz gráfica GUI de los sistemas de monitoreo.

Comparación de las características de la interfaz gráfica GUI				
	ADMET eXpert 9300 Series	TQ - SM1090V	Control Cube	LTM 1/2/3
Variables medidas	-Número de ciclos. -Carga aplicada. -Esfuerzo.	-Número de ciclos. -Carga aplicada.	-Número de ciclos. -Carga aplicada. -Esfuerzo.	-Número de ciclos. -Carga aplicada. -Esfuerzo.
Realizar análisis de fatiga	No	No	Si	Si
Puede generar gráficos o tablas	No	Si	Si	Si
Compatible con diferentes sistemas operativos	No	No	No	No

CAPÍTULO 3

DISEÑO CONCEPTUAL

En el presente capítulo se describe el diseño conceptual. Es decir, se muestra el proceso de diseño del sistema de monitoreo. Así mismo, se mencionan los requerimientos y limitaciones que se tomarán en cuenta para tener una visión general de la configuración del sistema y su principio de funcionamiento.

3.1 Lista de exigencias

Durante esta etapa del diseño se definen una serie de exigencias que deben de seguirse con el fin de evitar ambigüedades y delimitar todos los requerimientos necesarios que se tomarán en cuenta para el desarrollo del diseño. Por ejemplo, algunas de las exigencias se relacionan con la geometría de la máquina, fuerzas actuantes, software de control, etcétera. En la tabla 3.1 se describe la lista de exigencias que se seguirá para el desarrollo de este trabajo.

Tabla 3.1: Lista de exigencias.

Lista de exigencias			1 de 2
Proyecto	Diseño de un sistema de monitoreo para mediciones de deformación en ensayos de fatiga con cargas de amplitud variable.		Fecha: 28/01/2025
Fecha	Exigencia o deseo	Descripción	Responsable
28/01/2025	E	Función principal Medir valores de deformación de una probeta durante un ensayo de fatiga con cargas de amplitud variable.	F.C.M.
28/01/2025	E	Geometría El tamaño del sistema de monitoreo no debe exceder los 200 mm de largo, 200mm de ancho y 100mm de alto.	F.C.M.

Lista de exigencias			2 de 2
Proyecto	Diseño de un sistema de monitoreo para mediciones de deformación en ensayos de fatiga con cargas de amplitud variable		Fecha: 28/10/2025
Fecha	Exigencia o deseo	Descripción	Responsable
28/01/2025	E	Energía El sistema de monitoreo estará alimentado por una batería de litio.	F.C.M.
28/01/2025	E	Señales de entrada -Señal de encendido/apagado. -Señal de inicio del ensayo. -Parámetros iniciales de configuración del sistema.	F.C.M.
28/01/2025	E	Señales de salida -Porcentaje de daño acumulado. -Gráfico de curva S-N (esfuerzo vs número de ciclos). -Señal de procesamiento en curso. -Señal de sistema energizado.	F.C.M.
28/01/2025	E	Uso El sistema de monitoreo debe tener una autonomía de funcionamiento no menor a 4 horas de duración.	F.C.M.
28/01/2025	E	Comunicaciones -Se emplearán cables para la comunicación entre el sensor de deformación y el sistema de monitoreo. -Los datos de deformación serán transmitidos de forma inalámbrica hacia el servidor del sistema.	F.C.M.
28/01/2025	E	Software -El sistema de monitoreo debe contar con un algoritmo de procesamiento de datos. -El sistema debe contar con un software de interfaz gráfica (GUI) web que mostrará las señales de salida. -La interfaz gráfica (GUI) web debe ser compatible con los sistemas operativos Windows, Mac y Linux.	F.C.M.
28/01/2025	E	Electrónica -Se emplearán sensores para medir la deformación. -Se usaran un amplificador y un convertor analógico-digital para procesar las señales de los sensores. -Se empleará un microcontrolador para procesar los datos adquiridos por el sistema .	F.C.M.
28/01/2025	E	Ergonomía -La interfaz gráfica deberá mostrar la información obtenida de forma clara y ordenada para que el usuario pueda acceder a la interfaz usando una sola mano.	F.C.M.
28/01/2025	D	Fabricación El sistema de monitoreo debe ser fabricado empleando materiales disponibles en el mercado local.	F.C.M.

Una descripción detallada de cada uno de los requerimientos presentados en la Tabla 3.1 de la lista de exigencias se muestra en el Anexo A del presente documento.

3.2 Black-Box

A continuación se muestra un gráfico del *Black-Box* o la caja negra que representa un esquema de las entradas y de las salidas del sistema (ver figura 3.1). Notar que las señales de salida de datos de daño acumulado y el gráfico de esfuerzo vs ciclos se muestran en el software de la interfaz gráfica (GUI).

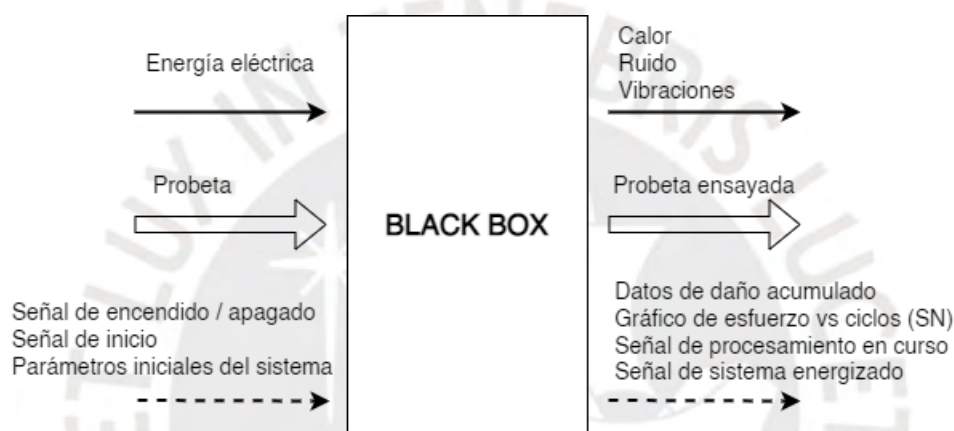


Figura 3.1: Caja negra.

Entradas

Probeta. La probeta a ser ensayada.

Señal de encendido. Señal de encendido del dispositivo.

Señal de inicio. Señal de inicio del ensayo.

Parámetros iniciales del sistema. Señal que contiene los parámetros iniciales de configuración del sistema.

Salidas

Probeta ensayada. La probeta que se fractura después del ensayo.

Gráfico de esfuerzos vs ciclos. El gráfico de los esfuerzos σ vs los ciclos n .

Datos de acumulación de daño. Información sobre el daño acumulado en la probeta.

Señal de procesamiento en curso. Muestra si la medición se encuentra en progreso.

Señal de sistema energizado. Muestra si el sistema se encuentra energizado o no.

3.3 Estructura de funciones

En la Figura 3.2 se muestra la estructura de funciones del sistema de monitoreo. La descripción detallada de este esquema se muestra en el Anexo B.

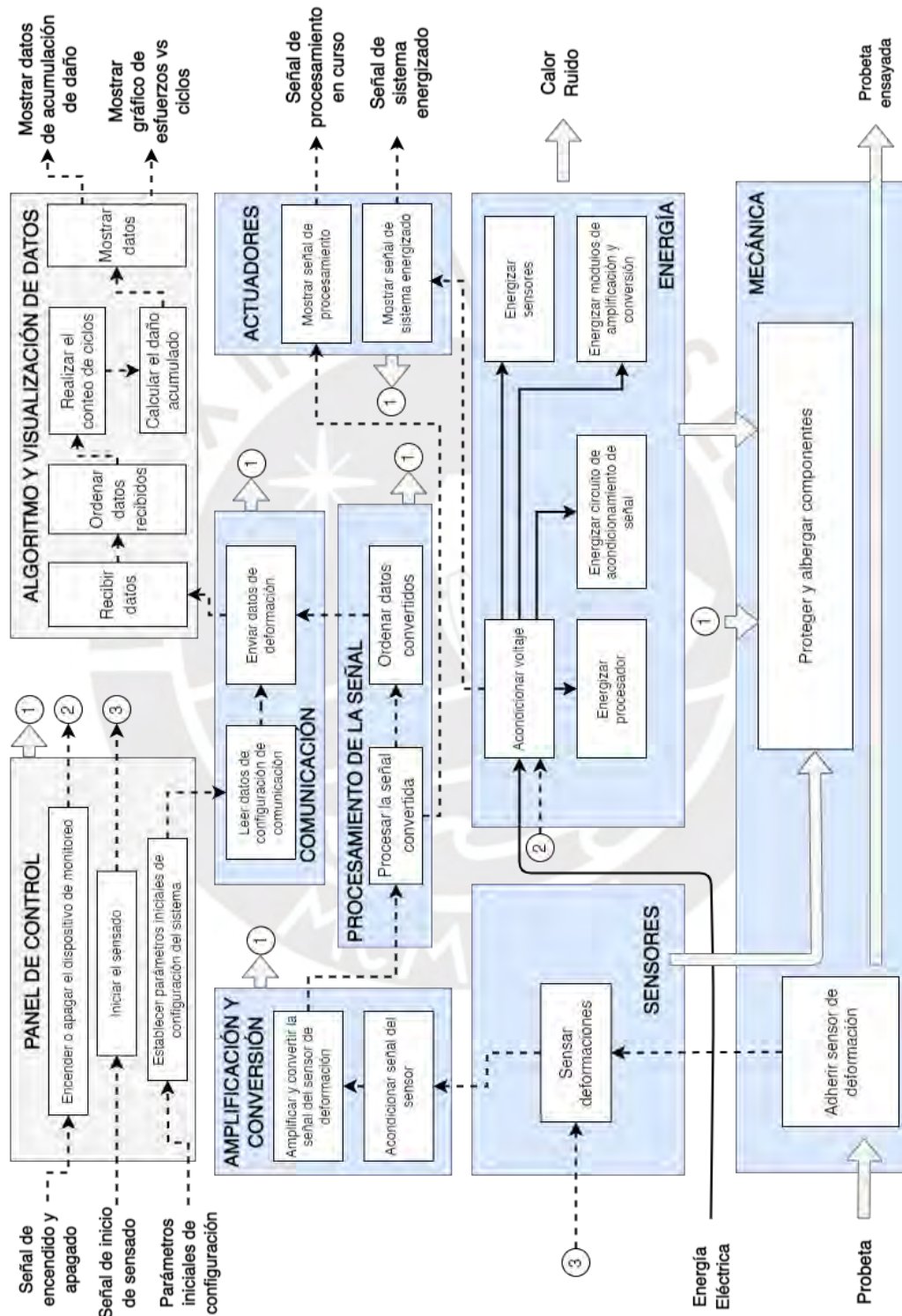


Figura 3.2: Estructura de funciones del sistema de monitoreo.

3.4 Concepto de solución

En esta sección se describe y se muestra el concepto de solución óptimo escogido para desarrollar el sistema de monitoreo. Es importante notar que para llegar a escoger la solución óptima se realizó una evaluación previa y los detalles que describen otros conceptos de solución que fueron considerados y su evaluación se muestran en el Anexo C del presente documento. El sistema de monitoreo debe funcionar en conjunto con una máquina de fatiga y, con el fin de mostrar la posición y los detalles de uniones del sistema de monitoreo, se empleará como referencia un banco de pruebas de carga alternante que fue previamente implementado (notar que esta estructura no forma parte del sistema de monitoreo y los detalles de su implementación se muestran en el Anexo D). En la estructura del banco de pruebas que se implementó, la probeta está sometida a flexión pura en cuatro puntos y la fuerza es aplicada por dos solenoides. La posición del gabinete del sistema de monitoreo en el banco de pruebas es la misma para cada uno de los conceptos de solución que se consideraron y se muestra a continuación en la Figura 3.3.

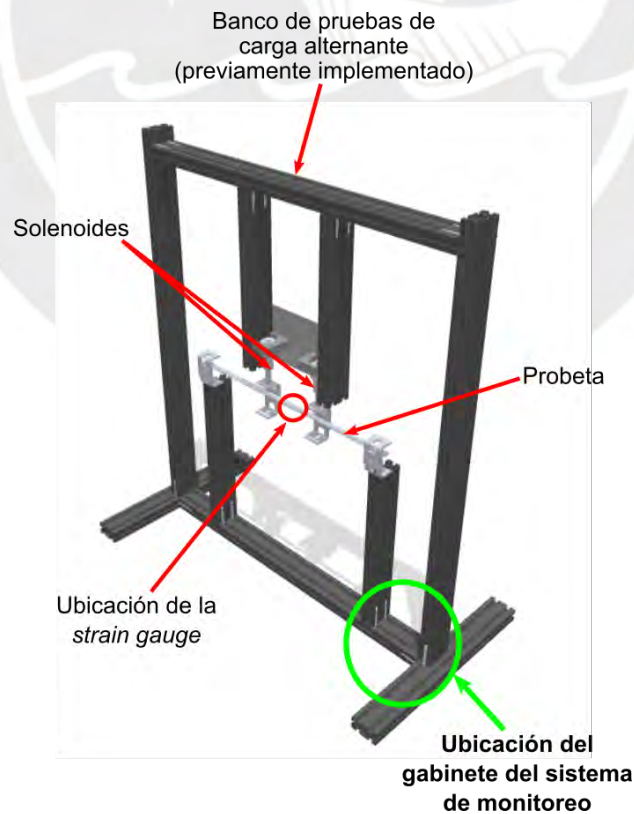


Figura 3.3: Ubicación del gabinete del sistema de monitoreo en el banco de pruebas

3.4.1 Concepto de solución óptimo

Después de realizar un análisis técnico y económico de tres posibles soluciones (ver Anexo C), se determinó una solución óptima que será descrita en esta sección.

Adquisición y transmisión de datos. En el concepto de solución óptimo (ver figura 3.4) la deformación se medirá empleando *strain gauges* y los datos de medición adquiridos por estos sensores se transmitirán de forma inalámbrica a un servidor que puede estar alojado en una Raspberry Pi o una computadora. Los *strain gauges* serán adheridos a la zona crítica de la probeta y luego serán conectados mediante cables a un modulo que alojará a otros componentes y estará fijo en un extremo de la máquina (ver figura 3.5). Este modulo estará compuesto por los siguientes componentes: un circuito de acondicionamiento de señal, un módulo amplificador y convertor analógico digital y un microcontrolador con capacidad de transmisión inalámbrica Wi-Fi (ver figura 3.6).

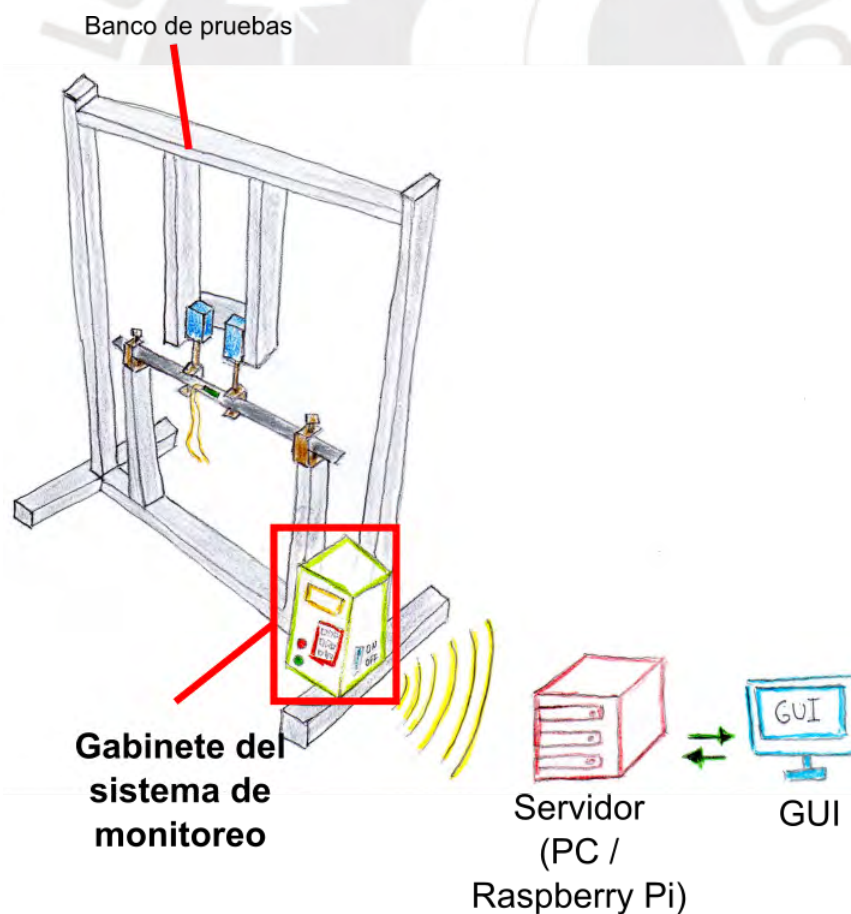


Figura 3.4: Concepto de solución óptimo.

Procesamiento de datos. Después de ser procesados por el módulo de adquisición (un microcontrolador con Wi-Fi integrado), los datos de medición serán enviados de forma inalámbrica a un servidor que se encontrará alojado en una Raspberry Pi o una PC. Se implementarán un algoritmo de procesamiento y una aplicación web empleando lenguaje de programación Python. La aplicación web servirá como un software de interfaz gráfica GUI y los resultados del ensayo podrán ser mostrados en cualquier dispositivo que tenga acceso a la red del servidor.

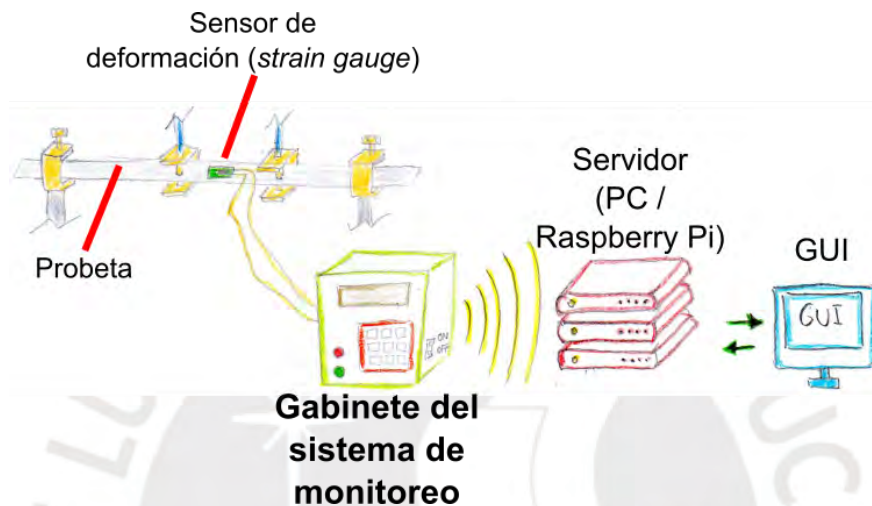


Figura 3.5: Concepto de solución óptimo - detalles de la solución.

Panel de control. Los componentes del panel de control (pulsadores e indicadores), los circuitos de acondicionamiento de la señal, el módulo amplificador-convertor, el microcontrolador y las fuentes de voltaje estarán alojados dentro un case (ver figura 3.6).

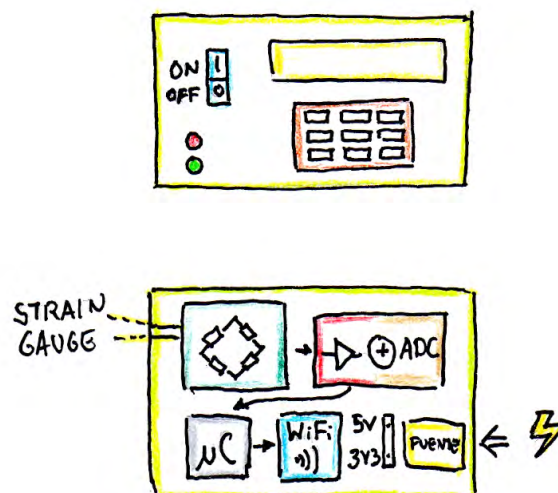


Figura 3.6: Concepto de solución óptimo - panel de control.

CAPÍTULO 4

DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN

En este capítulo se describirá el desarrollo de la solución escogida. En primer lugar, se mencionan todas las consideraciones necesarias para la implementación del sistema de monitoreo. Después se describen detalladamente el sistema mecánico, el sistema electrónico y el software que será desarrollado. Finalmente, en la última sección se presenta el diagrama de operaciones de la máquina.

4.1 Consideraciones generales

4.1.1 Consideraciones del subsistema de medición

Medición de la deformación

La función principal del sistema de monitoreo es determinar la falla por fatiga de una probeta normalizada. Para cumplir con este requerimiento es necesario determinar las fuerzas que actuarán sobre el espécimen durante todo el ensayo. Esta fuerza será determinada midiendo la deformación empleando “*strain gauges*”. Estos sensores emplean como principio el efecto piezorresistivo; es decir, su resistencia eléctrica cambia en función de la deformación mecánica. Para obtener los datos de la medición es necesario determinar la variación de voltaje que existe debido a la deformación de la probeta. Esta señal es analógica y puede ser amplificada para luego ser transformada en una señal digital para que pueda ser procesada por un microcontrolador. No obstante, las mediciones obtenidas empleando *strain gauges* son variaciones de resistencia eléctrica así que es necesario realizar un acondicionamiento previo de esta señal a través de un circuito adicional. A continuación, se describen los cálculos para realizar este proceso de acondicionamiento y su relación con el valor de la deformación ε .

Cálculo de la deformación empleando strain gauges

Para medir la deformación primero se empleará el modelo de circuito puente Wheatstone “quarter bridge” (ver Figura 4.1).

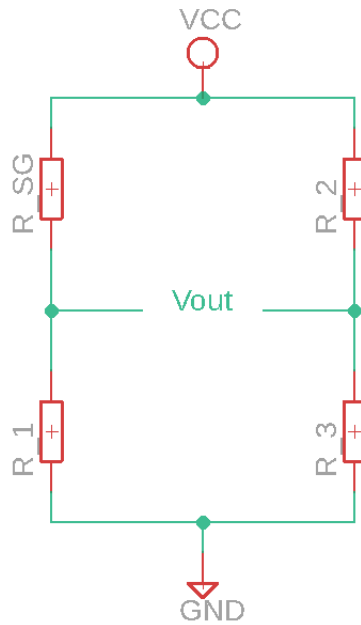


Figura 4.1: Circuito puente Wheatstone quarter-bridge

Para este caso, la relación que existe entre el voltaje de entrada V_i y el voltaje de salida V_o se expresa con la siguiente ecuación.

$$V_o = \left(\frac{R_1}{R_{sg} + R_1} - \frac{R_3}{R_2 + R_3} \right) V_i \quad (4.1)$$

En esta ecuación R_{sg} representa el valor de la resistencia de la *strain gauge* para todo momento y para determinar la deformación debemos expresar todas las variables en función de este valor:

$$R_{sg} = \frac{V_i R_1 R_2 - V_o R_1 (R_2 + R_3)}{V_i R_3 + V_o (R_2 + R_3)} \quad (4.2)$$

Para nuestro caso emplearemos los mismos valores de resistencia así que se cumple la siguiente relación $R = R_1 = R_2 = R_3$, donde R será del mismo valor de la resistencia de la *strain gauge*

sin deformar. Si asumimos este caso en 4.2 se obtendrá el siguiente valor para R_{sg} .

$$R_{sg} = \frac{R(V_i - 2V_o)}{V_i + 2V_o} \quad (4.3)$$

Ahora debemos evaluar la variación de la resistencia y esta se determina empleando la siguiente relación $\Delta R = R_{sg} - R$ que resultará en:

$$\Delta R = R \left(\frac{-4V_o}{V_i + 2V_o} \right) \quad (4.4)$$

Finalmente se deben relacionar el cambio de la resistencia de una *strain gauge* (ΔR) y su deformación mecánica (ε). Esta relación se determina a partir del factor de deformación o GF (“gauge factor”):

$$GF = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon} \quad (4.5)$$

Para hallar la deformación se reemplazará el valor de ΔR de la expresión 4.4 en la ecuación 4.5.

$$\varepsilon = \frac{-4V_o}{GF(V_i + 2V_o)} \quad (4.6)$$

La expresión 4.6 representa el valor final de la deformación ε y se puede notar que depende de tres variables: el voltaje de entrada (V_i), el voltaje de salida (V_o) y el factor de deformación. El factor de deformación es un valor determinado por el fabricante de la *strain gauge* y los voltajes dependen de la disposición del circuito. Notar que cuando la *strain gauge* sea sometida a tracción su resistencia incrementará y el valor del voltaje V_o será negativo. Del mismo modo, cuando la *strain gauge* sea sometida a compresión el voltaje de salida será positivo.

4.1.2 Consideraciones del subsistema mecánico

Debido a que el sistema de monitoreo no estará sometido a fuerzas significativas, las formas geométricas y el dimensionamiento dependerán exclusivamente de los elementos que forman parte del módulo, dispositivos electrónicos, posición de los perfiles y la probeta de la máquina de ensayos de fatiga. A continuación se describen las consideraciones del subsistema mecánico que se tomarán en cuenta para el desarrollo del sistema de monitoreo.

Banco de pruebas de carga alternante

Con el fin de realizar pruebas de medición, se implementó previamente un banco de pruebas de carga alternante (ver Anexo D). En esta máquina la probeta está sometida a flexión pura usando una configuración de cuatro puntos y para fijar la probeta se emplean mordazas con prisioneros. Adicionalmente, con el fin de acomodar los dispositivos electrónicos y el sistema de monitoreo de deformación, los perfiles que forman parte de la estructura de la máquina cuentan con ranuras. La vista isométrica del modelo CAD de este elemento se muestra en la Figura 4.2.



Figura 4.2: Modelo CAD del banco de pruebas de carga alternante

4.1.3 Consideraciones del subsistema electrónico

Existen componentes electrónicos en cada parte del sistema de monitoreo y el requerimiento principal de estos está relacionado con su tamaño y su ubicación.

Componentes de medición de deformación

Los componentes de este sistema deben ser compactos y, de preferencia, de un tamaño menor a 30x30 mm. Así mismo, todos los circuitos serán energizados por una batería. Finalmente, uno de estos componentes se empleará para la comunicación inalámbrica y es necesario tomar en

cuenta su ubicación dentro del sistema de monitoreo.

Componentes del panel de control

El panel de control estará compuesto por un interruptor, una botonera y una pantalla. Por esta razón, el tamaño de los componentes presentes en el panel debe considerar el espacio que existirá en el gabinete en el cuál todos los circuitos estarán almacenados.

4.1.4 Consideraciones de software

El software debe ser compatible con la mayoría de las plataformas; es decir, funcionará en los principales sistemas operativos: Windows, Mac OS, GNU Linux. Para cumplir con estos requerimientos se desarrollará una aplicación web programada en Python a la que se accederá a través de una navegador. El servidor y los datos de esta aplicación serán alojados en un servidor que, posteriormente, servirá como punto de acceso a la aplicación web para otros usuarios.

4.2 Lógica de control y subsistema electrónico

En la primera parte de esta sección se describen la lógica de control del sistema y la relación que existe entre cada uno de sus elementos. Posteriormente, se describen el sistema electrónico y los circuitos esquemáticos que se han desarrollado.

4.2.1 Lógica de control del sistema

Uno de los componentes del sistema de monitoreo es el módulo o subsistema de medición de deformación. Este módulo esta compuesto por los circuitos de acondicionamiento de señal y conversión. Además, el subsistema de medición está conectado a un microcontrolador que se encargará de procesar la información para que luego sea enviada a un servidor, que finalmente permitirá que la medición sea mostrada en una computadora a través de una aplicación web (interfaz gráfica GUI). Es decir, la lógica de control del sistema depende de las funciones que realizan el subsistema de medición de deformación, el microcontrolador y la secuencia de funcionamiento de cada uno de estos. En el Anexo B, se describieron cuáles son las funciones de estos elementos, y en esta sección, con el fin describir la lógica de control del sistema, se

describirá cuáles son sus etapas de funcionamiento. Las etapas de funcionamiento del sistema se muestran en la Figura 4.3. Primero, al inicializar el sistema es necesario que el módulo de medición de deformación sea calibrado. Luego de esta etapa se realiza la medición de las variables durante el ensayo de fatiga (la deformación de la probeta). Finalmente la información obtenida es procesada para que luego se genere un reporte con los resultados del ensayo.



Figura 4.3: Etapas de funcionamiento del sistema

Funcionamiento del módulo de medición de deformación

La función principal de este subsistema es medir la deformación de la probeta para posteriormente enviar los datos capturados al microcontrolador. La medición y envío de información requieren de las siguientes etapas: acondicionamiento de la señal medida, amplificación, conversión a señal digital y envío de datos al microcontrolador. Es decir, se requiere de por lo menos cuatro dispositivos que realicen estos procesos y, además, de una fuente de energía para energizar estos módulos. En la Figura 4.4 se muestran las etapas de funcionamiento de este módulo.

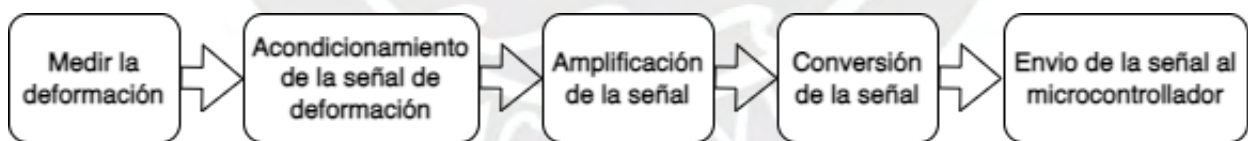


Figura 4.4: Etapas de funcionamiento del módulo de medición de deformación

Funcionamiento del panel de control

El panel de control cuenta con dos funciones: Recibir la información de los sensores de deformación y procesar los datos obtenidos en función a las variables ingresadas por el usuario para que luego las mediciones sean transmitidas de forma inalámbrica. Por esta razón, este elemento del sistema debe contar con dispositivos que permitan controlar el módulo de deformación y un sistema de procesamiento de las señales recibidas. Es decir, el panel estará compuesto por

el procesador principal del sistema de monitoreo y elementos que permiten la interacción con el usuario (botones, interruptores e indicadores luminosos). Finalmente, el panel de control será energizado por una fuente de voltaje externa por lo que se requerirá de elementos que permitan regular esta señal. Las etapas de funcionamiento del panel de control se muestran en la Figura 4.5 y son las siguientes:

- **Recepción y acondicionamiento de las señales medidas.** Se reciben, acondicionan, amplifican y convierten las señales de medición obtenidas durante todo el ensayo de fatiga.
- **Procesamiento de las señales.** Se procesan las señales para que puedan ser agrupadas y preparadas para ser enviadas.
- **Envío de señales.** Las señales medidas, ya procesadas, se envían a través de un protocolo de comunicación inalámbrico.

Las tres etapas son realizadas por un microcontrolador que deberá estar conectado a los componentes del sistema. Sin embargo, la visualización de señales y resultados se mostrarán en tiempo real en una interfaz gráfica en una PC por lo que se requerirá de un servidor externo que servirá como intermediario en la conexión inalámbrica entre el microcontrolador y la aplicación web.

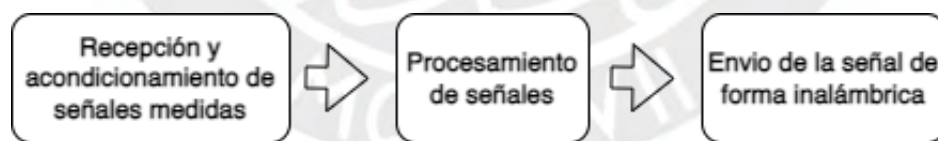


Figura 4.5: Etapas de funcionamiento del panel de control

4.2.2 Diagramas de flujo

En esta sección se muestra la secuencia lógica que seguirá el sistema de monitoreo empleando diagramas de flujo. Es importante precisar que los diagramas de flujo que involucran la captura de los datos medidos corresponden al microcontrolador con capacidad inalámbrica, pues este es el dispositivo que está encargado de recolectar los datos de la medición de deformación

para luego enviarlos a un servidor a través de una conexión inalámbrica. Así mismo, también se muestran diagramas de flujo de las funciones que serán realizadas en el servidor. En la Figura 4.6 se muestra un esquema de la conexión entre el microcontrolador y el servidor.



Figura 4.6: Conexión entre el microcontrolador y el servidor

En la primera parte se mostraran las funciones principales del sistema, y al final de la sección, se muestra el diagrama de flujo general.

Inicializar variables

El sistema de monitoreo requiere de que cada una de sus variables sea inicializada con un valor determinado al comienzo del proceso de monitoreo con el fin de evitar errores de asignación de valores. Por esta razón, en esta función se incluyen todas las variables y sus valores al inicio del programa. A modo de ejemplo, en la Figura 4.7 se muestra el diagrama con la descripción de dos variables principales del sistema.

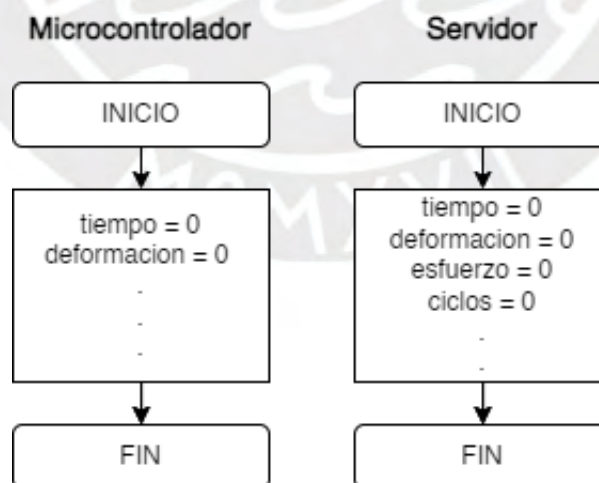


Figura 4.7: Diagrama de flujo de inicialización de variables

- **tiempo.** Esta variable es necesaria para mostrar los gráficos en función del tiempo en tiempo real. Al inicio del ensayo tiene un valor de cero porque no existen mediciones.

- **deformación.** Esta variable representa a la primera medida de fuerza obtenida del *strain gauge* en la probeta.

Capturar datos de deformación (microcontrolador)

El microcontrolador del sistema recibe datos de la deformación a la que esta sometida la probeta durante el ensayo de fatiga, estos datos deben ser acondicionados y luego procesados. Por este motivo, se requiere de dos etapas: una etapa de lectura de datos (esta incluye el acondicionamiento) y otra etapa de envío y procesamiento de datos.

- **Leer datos de deformación.** Se mide el valor amplificado de deformación del sensor, luego se convierte este voltaje a valores digitales que finalmente pueden ser interpretados por el microcontrolador. En la Figura 4.8a se muestra el diagrama de flujo de esta función.
- **Captura de medición de deformación.** En la primera parte se incluye la función de lectura de datos de deformación, luego se envían los datos leídos al procesador que convierte este valor a magnitudes de fuerza y se muestra en la interfaz gráfica. En la Figura 4.8b se muestra el diagrama de flujo de esta función.

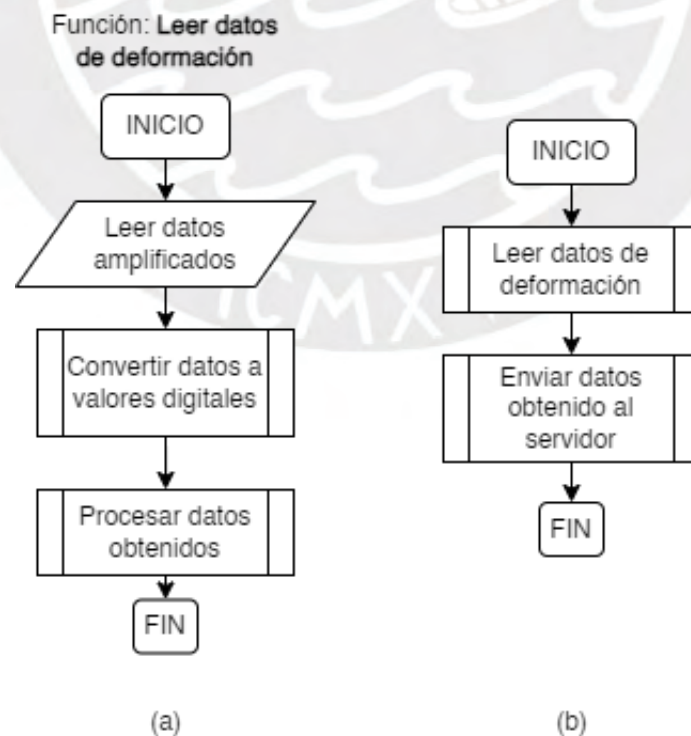


Figura 4.8: Diagrama de flujo de captura de deformación

Verificar captura de datos (microcontrolador)

El microcontrolador debe de continuar recibiendo información de los sensores hasta el final del ensayo. Es decir, mientras no se reciba todos los datos de la medición se debe continuar con la captura y se debe implementar una función que verifique este proceso. A continuación se describe el diagrama de flujo de la función que se empleará para verificar la captura de datos.

- **Verificación de captura de datos.** Se lee la señal que indica el fin del ensayo. Si es que la señal de verificación es correcta, se envía una señal de validación 1; en caso contrario se envía un 0. En la Figura 4.9 se muestra el diagrama de flujo de esta función.

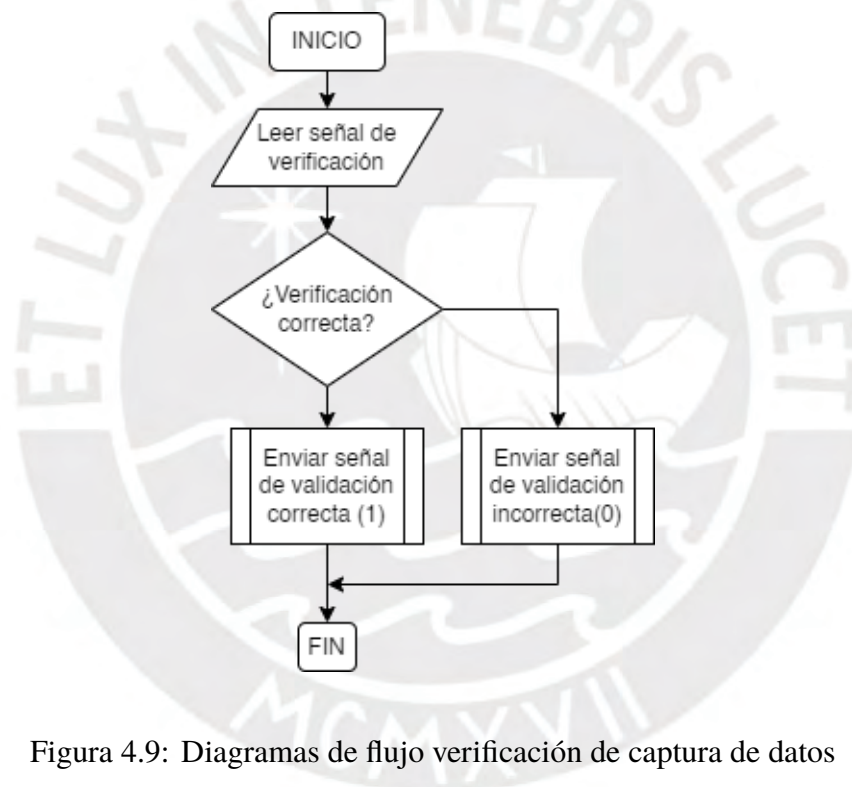


Figura 4.9: Diagramas de flujo verificación de captura de datos

Recepción de datos y cálculo de fatiga (servidor)

El servidor debe recibir los datos de deformación del microcontrolador para luego procesarlos y mostrarlos. Así mismo, la determinación de la falla por fatiga se realizará empleando dos funciones. En la primera función se determinará el número exacto de ciclos y las cargas mediante el algoritmo de Rainflow. En la segunda función, se emplearán los datos de ciclos y fuerza determinados por la primera función y luego se empleará una teoría de daño acumulado para determinar la fatiga del material.

- **Recepción y muestra de datos.** Se reciben los datos recibidos del microcontrolador y luego se ordenan para que puedan ser transformados a valores de fuerza. Posteriormente, se realizan los cálculos de fatiga y se muestran los resultados. En la Figura 4.10a se muestra el diagrama de flujo de este proceso.
- **Conteo de ciclos Rainflow.** Se leen todos los datos del espectro de carga (tiempo y fuerza) y luego se ordenan para que puedan ser evaluados correctamente. Se aplica el algoritmo de conteo de ciclos de Rainflow y finalmente se almacenan los datos de las fuerzas y el número de ciclos en un archivo. En la Figura 4.10b se muestra el diagrama de flujo de esta función.
- **Aplicación de teoría de daño.** En esta función se leen los datos del archivo de conteo de los ciclos y luego se aplica la teoría de acumulación de daño de Miner. En la Figura 4.10c se muestra el diagrama de flujo de esta función.

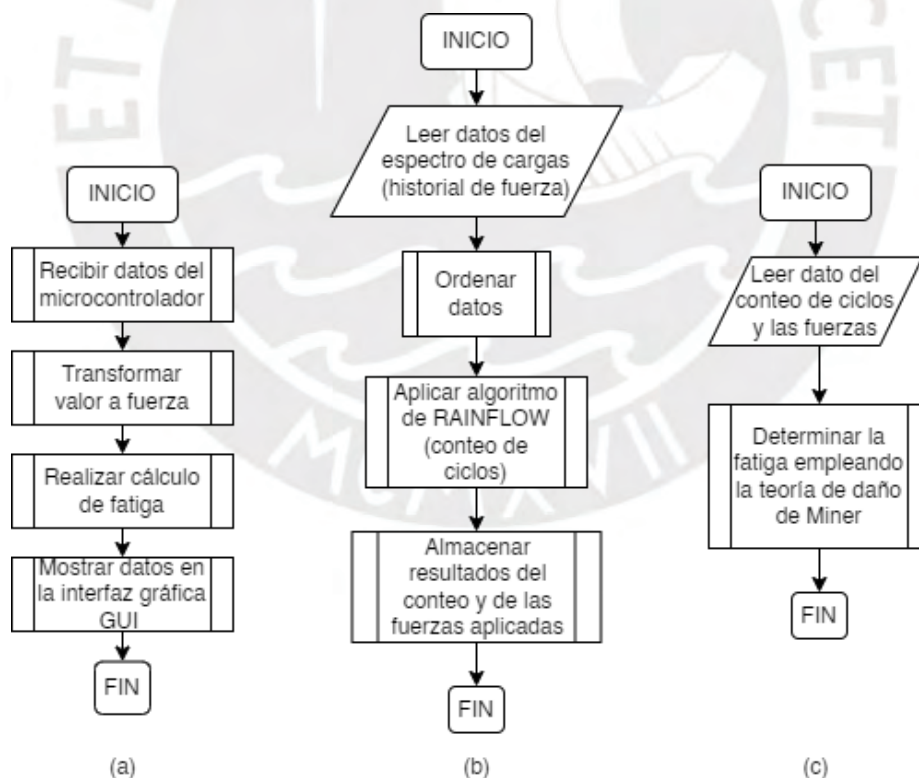


Figura 4.10: Diagramas de flujo de las funciones de cálculo de fatiga.

Mostrar gráficos y resultados (servidor)

En la última parte del proceso se deben mostrar el gráfico de la curva S-N, los resultados del ensayo de fatiga y se debe generar un archivo de reporte del ensayo. En esta función, primero se leen los datos calculados y luego se muestran en la interfaz gráfica. Finalmente se genera un archivo de reporte del ensayo. En la Figura 4.11 se muestra el diagrama de flujo de esta función.

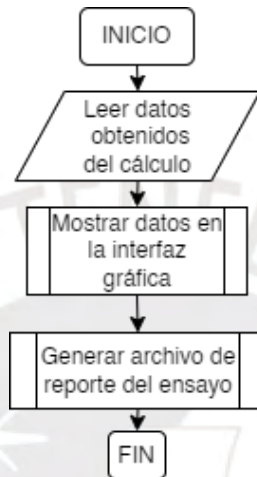


Figura 4.11: Diagramas de flujo de muestra de gráficos y resultados.

Diagrama de flujo general

En la figura 4.12 se muestra el diagrama de flujo general del sistema de monitoreo. Este diagrama muestra todo el proceso de captura e incluye todas las funciones descritas anteriormente.

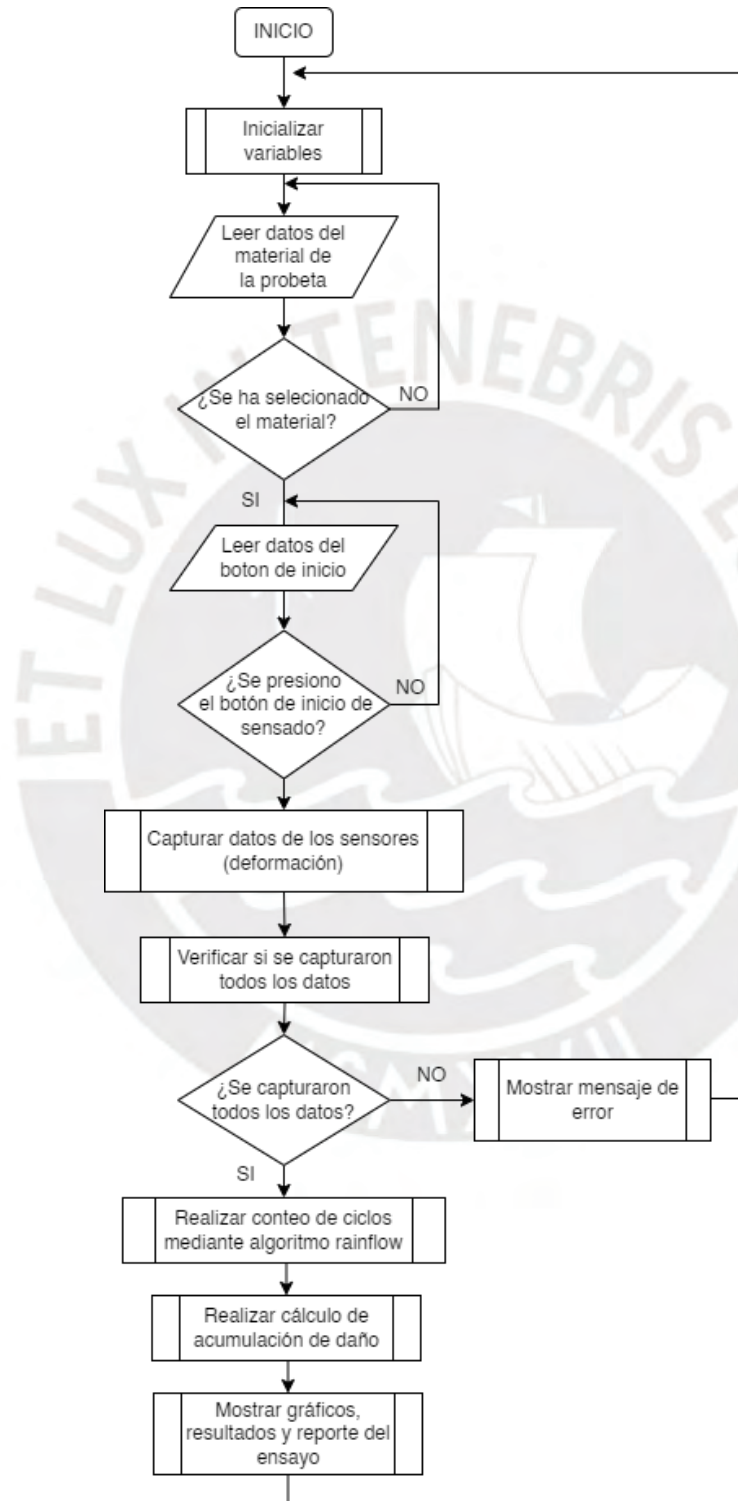


Figura 4.12: Diagrama de flujo de la máquina

4.2.3 Descripción de sensores y dispositivos

En las secciones anteriores se describieron el funcionamiento de los elementos del sistema y los diagramas de flujo. A continuación se describirá los sensores seleccionados y de los dispositivos necesarios para la implementación del sistema de monitoreo. Para este propósito, se ha dividido esta evaluación en dos secciones correspondientes a cada subsistema: el módulo de medición de deformación y el módulo de procesamiento de datos.

Módulo de medición de deformación

El subsistema de medición de deformación recibe señales de una *strain gauge* que está fija a una probeta normalizada durante todo el ensayo con el fin de realizar las mediciones (los detalles del sistema se encuentran en “Adquisición y transmisión de datos” de la sección 3.4.1). Este sistema está compuesto por los siguientes elementos: un circuito de acondicionamiento de señal, un circuito de amplificación y un convertidor analógico-digital. A continuación se describe la selección de cada uno de estos componentes.

- **Strain gauge.** Se requieren *strain gauges* de 120Ω . Por esta razón, se empleará el modelo BF120-3AA que es una *strain gauge* común en el mercado local con este valor de resistencia.
- **Circuito de adquisición.** La deformación es medida empleando *strain gauges*. La resistencia de estos sensores varía en función a la tracción o compresión del elemento mecánico. Sin embargo, para realizar una medición primero es necesario transformar la variación de resistencia eléctrica a un valor de voltaje. Por esta razón, se emplea un arreglo especial de circuito denominado puente Wheatstone (ver figura 4.13). Este arreglo está compuesto por resistencias y la disposición de estos elementos depende del tipo de medición, por lo que se debe diseñar un circuito y comprar los componentes a emplear.

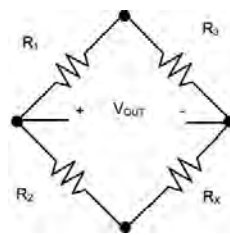


Figura 4.13: Representación de circuito de puente Wheatstone

• **Circuito de amplificación y convertidor analógico digital(ADC).** La señal de voltaje del puente Wheatstone usualmente está en el orden de los microvoltios. Por esta razón, primero es necesario amplificar esta señal, y después de este proceso, la lectura debe ser convertida a un valor numérico con el fin de que pueda ser procesado por un microcontrolador. El proceso de amplificación usualmente se realiza empleando amplificadores operacionales de instrumentación y el proceso de conversión usando convertidores analógicos-digitales. En el mercado, además, existen módulos integrados que realizan tanto el proceso de amplificación y conversión. En la Tabla 4.1 se muestra una comparación entre tres alternativas:

- **Amplificador y ADC separados.** En esta opción se emplean el circuito de amplificación INA112 y el convertidor ADS12U04 por separado. Esta opción consume menos corriente pero requiere de la implementación de un circuito adicional para su funcionamiento por lo que su tamaño no esta definido.
- **HX711.** El módulo para celdas de carga HX711 es un circuito amplificador y convertidor y no requiere de un componentes adicionales. Aunque esta opción consume mayor corriente, tiene dimensiones menores a 3cm. Sin embargo, este módulo cuenta solamente con una entrada que usa un valor apropiado de ganancia para el proyecto a ser implementado.
- **ADS1256.** Este circuito integrado también funciona como amplificador y convertidor. El ADS156 también está diseñado para aplicaciones que requieran de tolerancia al ruido. Así mismo, este módulo cuenta con cuatro entradas con ganancias apropiadas para la aplicación a desarrollar.

Es importante notar que todos los ADC considerados en esta evaluación son de 24 bits. Por este motivo, es necesario tomar en cuenta los efectos del ruido. Así mismo, debido a que se busca una solución compacta y se requiere de un circuito que posea más de una entrada en caso de que se requieran diversas configuraciones para la lectura con las *strain gauges*, se debe seleccionar un dispositivo que realice la amplificación y la conversión en conjunto y que cuenta con más de una entrada. Se seleccionará un módulo ADS1256 (ver figura 4.14) porque cumple con ambos requerimientos y además no necesita de circuitos adicionales para su funcionamiento.

Tabla 4.1: Comparación de amplificadores y convertidores analógicos digitales.

	INA122 y ADS122U04	HX711	ADS1256
Voltaje	2.3V a 5.5V	2.6V a 5.5V	3V a 5.3V
Corriente de alimentación	0.5 mA	1.5 mA	50 mA (max.)
Resolución (ADC)	24 bits	24 bits	24 bits
Tamaño	-	24x16x2 mm	60x35x2 mm
Requiere circuito adicional	Sí	No	No



Figura 4.14: Módulo ADS1256

Una vez que se han seleccionado los elementos del subsistema ahora se pueden mostrar las conexiones que existen entre cada dispositivo. En la Figura 4.17 se muestran cada uno de los elementos del módulo de medición de deformación y la forma en la que estos estarán conectados, además, en este diagrama de bloques se incluyen las señales de entrada y salida. Primero, cada uno de los módulos está energizado por un voltaje regulado de 5V. El circuito de acondicionamiento recibe la señal de la *strain gauge*, luego, esta señal es amplificada y convertida para posteriormente ser enviada a un microcontrolador empleando el protocolo SPI.

Módulo de procesamiento de datos

Este módulo se encarga de procesar los datos de la señal adquirida y enviarlos inalámbricamente a un dispositivo externo. Así mismo, este módulo es configurado por un usuario y contiene los elementos necesarios para energizar todos los dispositivos. Por esta razón, este sistema cuenta

con circuitos de regulación de voltaje, indicadores led, una pantalla LCD y un teclado matricial. Finalmente, el sistema de procesamiento cuenta con un microcontrolador con capacidad de conexión inalámbrica para enviar los datos.

- **Microcontrolador.** El sistema requiere de un componente que reciba las señales de medición de deformación. Además, este componente debe interactuar con los demás dispositivos del panel de control y procesar las señales de medición para luego poder enviarlas a través de una conexión inalámbrica. En la Tabla 4.2 se muestra una comparación de características de tres microcontroladores con capacidad inalámbrica.

Tabla 4.2: Comparación de microcontroladores con capacidad inalámbrica.

	ESP8266-DevKitC	ESP32-DevKitC3	ESP32 C6
Voltaje	5V	3.3V y 5V	3.3V y 5V
Año	2016	2020	2021
Version WiFi	Wi-Fi 4 (parcial)	Wi-Fi 4	Wi-Fi 6
Tamaño	49x25x12 mm	54x28x12 mm	58x25x12 mm

En el sistema de monitoreo se empleará el microcontrolador ESP32-DevKitC3 (ver figura 4.15). Este dispositivo es una opción apropiada pues puede ser alimentado con dos tipos de voltaje, es una versión vigente de la serie de microcontroladores ESP32 y está disponible en el mercado local. En la Tabla 4.3 se muestran las características de voltaje y corriente del módulo ESP32-DevKitC3.



Figura 4.15: ESP32-DevKitC

Tabla 4.3: Características del microcontrolador.

ESP32 DevKitC V4	Voltaje	Corriente máxima
	5V	160 mA

- **Regulador de voltaje.** El ESP32 requiere de un acondicionamiento de voltaje, pues funciona con 5V. Por esta razón, es necesario emplear un regulador de voltaje y para el sistema se empleará el modulo regulador LM7805. En la Tabla 4.4 se muestran las características de este dispositivo.

Tabla 4.4: Características del regulador de voltaje.

Módulo	Voltaje de entrada	Corriente máxima
LM7805	8V a 24V	1.2A

- **Indicadores luminosos.** Debido a que todos los componentes estarán albergados en un gabinete, se emplearán indicadores luminosos de panel o luces piloto de 5V. En total se emplearán dos luces piloto: un indicador de energizado y un indicador de sensado en curso. En la Tabla 4.5 se muestran las características de este componente.

Tabla 4.5: Características del indicador luminoso de panel.

LED	Voltaje	Corriente
Dialight 559	5V	20mA

- **Teclado matricial e interruptores.** Se emplearán un interruptor de encendido y apagado de panel. Este interruptor estará conectado a la fuente de alimentación del sistema y servirá para encender todo el sistema. Además se empleará un teclado matricial que servirá para que el usuario inicie el sensado de deformación y configure todas las variables necesarias.
- **Pantalla LCD.** El usuario debe configurar el sistema y, para poder observar la configuración escogida, se empleará una pantalla LED para mostrar los parámetros del sistema. En la Tabla 4.6 se muestran las características de este componente.

Tabla 4.6: Características de la pantalla LED.

Pantalla	Voltaje	Corriente
LED 20x4	5V	40mA

- **Baterías 18650.** Los componentes del panel de control se alimentaran empleando baterías de litio 18650 de 3.7V. Como se requiere que el sistema se mantenga encendido por un tiempo mayor a cuatro horas, para energizar a todos los componentes se usaran dos baterías. En la Tabla 4.5 se muestra la corriente total. Notar que cada batería 18650 tiene una capacidad de 3000mAh y el sistema requiere de 452 mA. Por lo tanto, con dos baterías el sistema puede funcionar por 13 horas aproximadamente.

Tabla 4.7: Determinación de la corriente y potencia total.

Componente	Cantidad	Corriente	Voltaje	Potencia	Corriente total
Puente Wheatstone	1	42 mA	5V	0.21W	42 mA
ADS1256	1	50 mA	5V	0.25W	50 mA
ESP32	1	160 mA	5V	0.8W	160 mA
LED Dialight 559	2	20 mA	5V	0.2W	40 mA
Pantalla LED	1	160 mA	5V	0.8W	160 mA
				Total	452 mA

En la figura 4.16 se muestran todos los elementos del módulo de procesamiento de datos y sus conexiones.

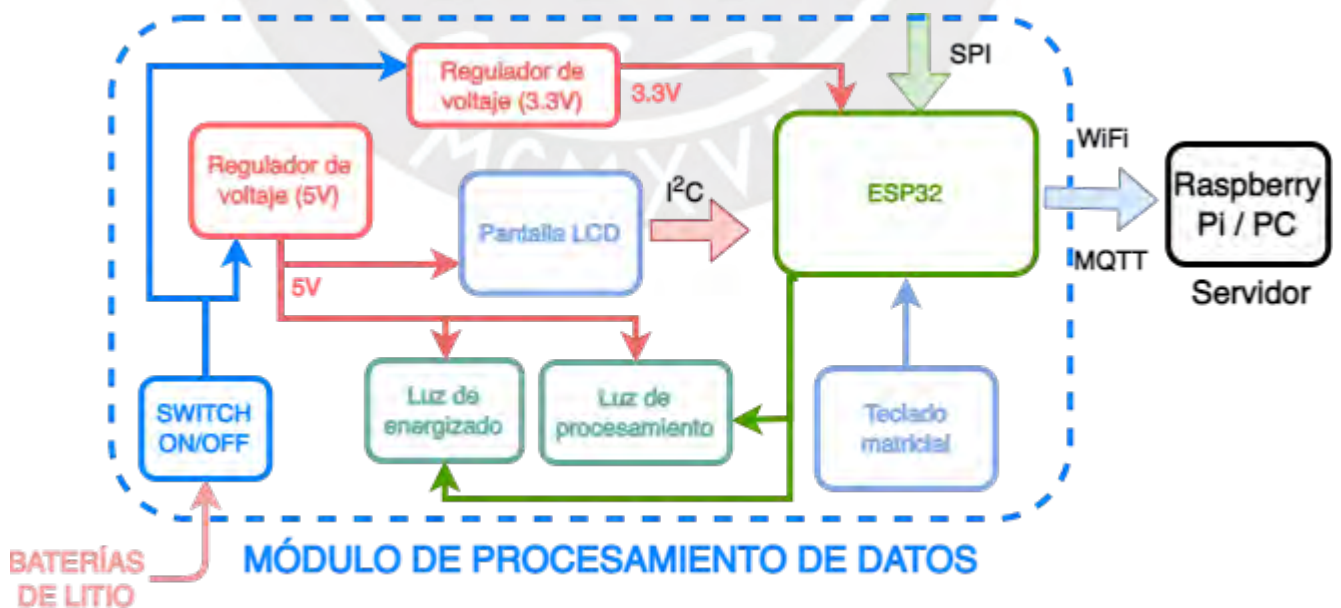


Figura 4.16: Componentes del módulo de procesamiento de datos

4.2.4 Diagrama de bloques general

En la sección anterior, se seleccionaron los componentes electrónicos del sistema de monitoreo y ahora se mostrará con mayor detalle la relación que existe entre cada elemento empleando un diagrama de bloques general. Este esquema muestra el tipo de conexiones que hay entre el módulo de medición de deformación y el módulo de procesamiento de datos. Estas conexiones pueden representar el nivel de voltaje o el protocolo de comunicación que se está empleando entre cada dispositivo (ver Figura 4.17).

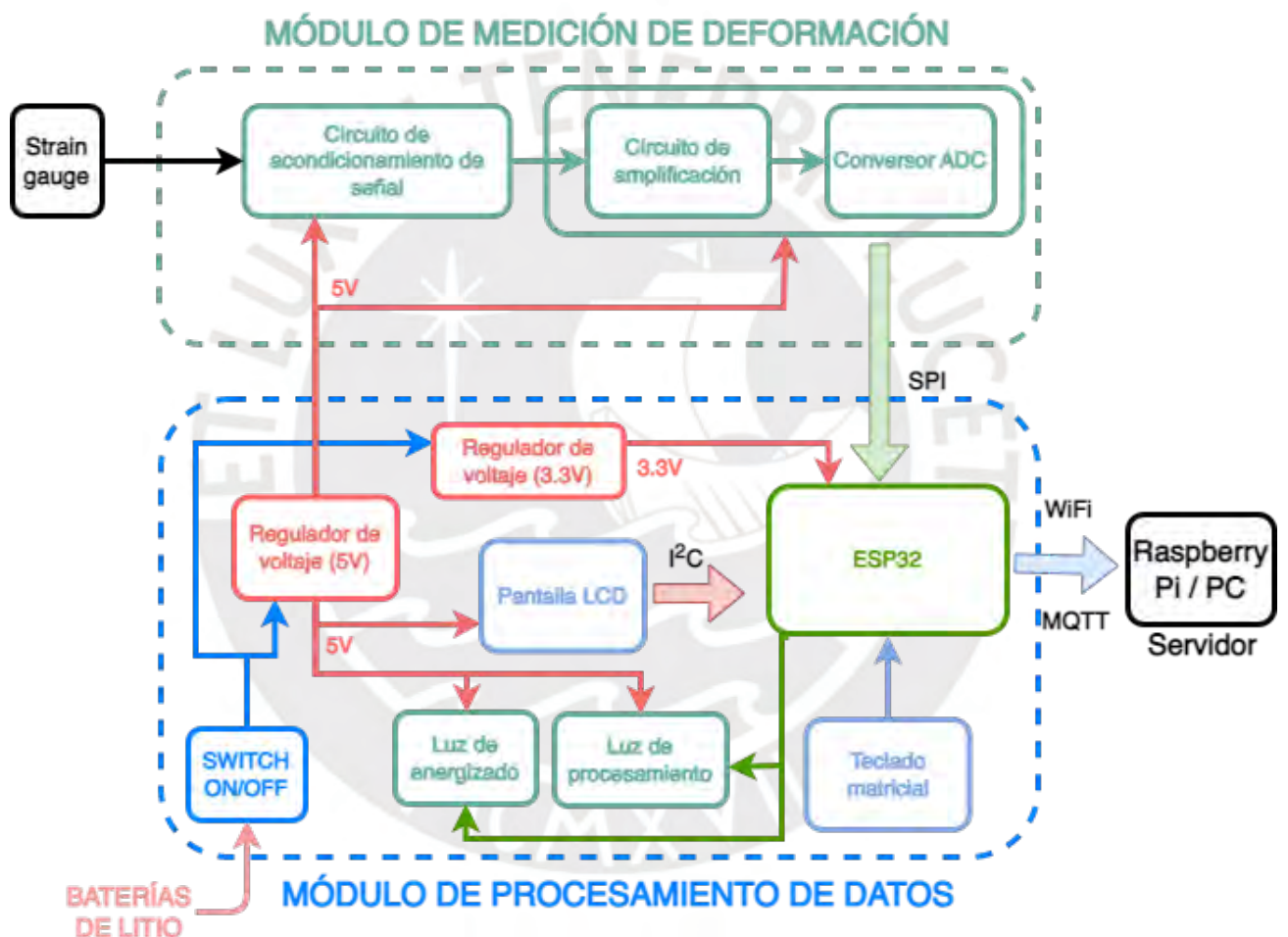


Figura 4.17: Diagrama de bloques

4.3 Implementación del sistema de monitoreo

En esta sección se muestra la implementación del sistema de monitoreo (ver figura 4.18a) y se describe cada una de sus características. Para implementar el sistema se tomó en cuenta las consideraciones y criterios descritos en las secciones anteriores de este capítulo. Sin embargo, el sistema que se construyó es una prueba de concepto y tiene características propias que serán detalladas en esta sección del capítulo. En primer lugar, el subsistema de medición de deformación que se desarrolló cuenta con cuatro entradas y no solamente una. Así mismo, la pantalla LCD no solo sirve para realizar la configuración del dispositivo, sino también para mostrar la medición de deformación en tiempo real. Finalmente, el sistema cuenta con dos modos (ver figura 4.18b), un modo normal que muestra las mediciones en la pantalla LCD sin necesidad de un software externo, y el modo inalámbrico, que hace uso de un servidor para mostrar los datos de medición en un cliente remoto a través de una aplicación web.



Figura 4.18: Vistas del sistema de monitoreo

4.3.1 Circuito de acondicionamiento de señal

El circuito de acondicionamiento de señal está compuesto por cuatro puentes Wheatstone y para alojar a estos circuitos se empleó un "stripboard" que también servirá como base de una estructura para un segundo stripboard que contendrá a otros módulos (ver figura 4.19). Así mismo, las cuatro entradas de las *strain gauges* estarán conectadas a estos circuitos empleando un conector RJ45 (el detalle del conector puede observarse en la parte lateral de la Figura 4.18a).

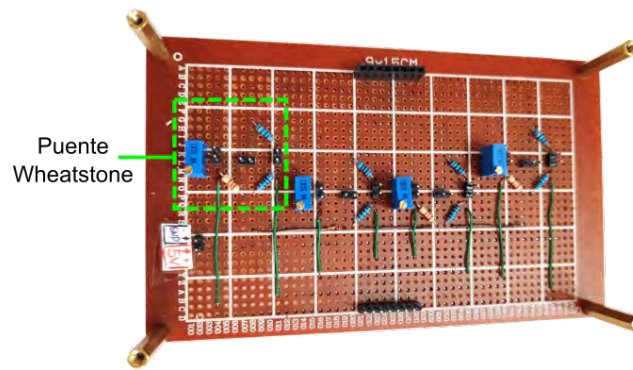


Figura 4.19: Implementación del circuito de acondicionamiento

4.3.2 Circuito de amplificación y ADC

El módulo de amplificación y conversión que fue seleccionado para la implementación del sistema de monitoreo cuenta con un circuito ADS1256 (ver figura 4.14). Este módulo cuenta con un amplificador, un ADC de 24bits y capacidad para cuatro entradas. El circuito también será montado en un *stripboard* y estará conectado a los circuitos de acondicionamiento de señal a través de cables (ver figura 4.20).

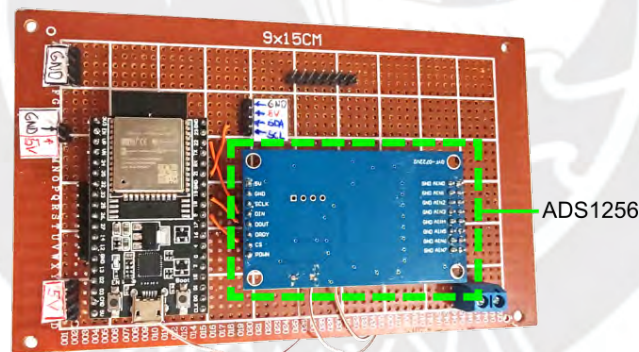


Figura 4.20: Implementación del circuito de amplificación y ADC

4.3.3 Módulo de procesamiento

El módulo de procesamiento emplea un microcontrolador ESP32 que se usa para recibir y procesar los datos de deformación del ADS1256. El microcontrolador también se encuentra montado en un *stripboard* (ver figura 4.15), está conectado a un teclado matricial y a la pantalla LCD. Finalmente, el ESP32 cuenta con WiFi integrado que permite que las mediciones sean enviadas de forma inalámbrica a la interfaz gráfica.

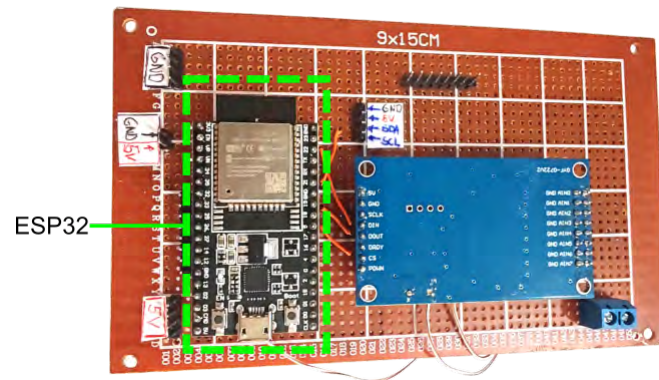


Figura 4.21: Implementación del módulo de procesamiento

4.3.4 Sistema integrado

En la Figura 4.22 se muestran ambos subsistemas: el módulo de procesamiento de datos y el módulo de deformación. Para distribuir cada uno de los circuitos, se empleó una estructura de dos niveles compuesta por dos *stripboards* que se encuentran unidos empleando espaciadores. Ambos niveles se conectan a través de cables y la estructura se encuentra alojada en un gabinete que cuenta con un panel de control en una de sus caras (ver figura 4.23a).

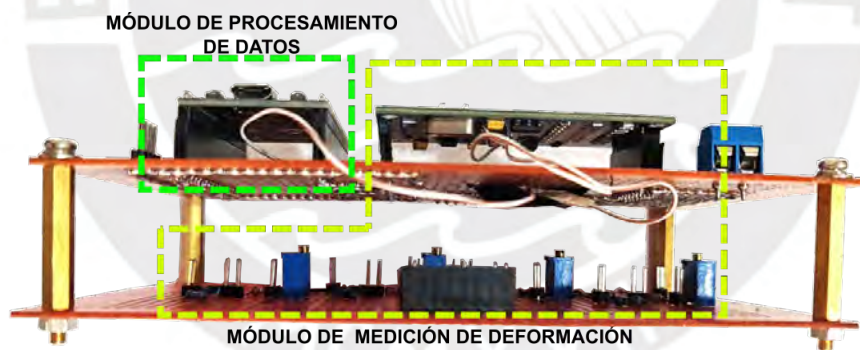


Figura 4.22: Vista lateral de los módulos integrados

En la Figura 4.23b se muestran a los módulos alojados en el gabinete y sus conexiones con el panel de control. El microcontrolador ESP32 es el circuito principal del sistema de monitoreo, recibe instrucciones del usuario a través del panel de control, procesa los datos de deformación recibidos del ADS1256, muestra cuatro lecturas de deformación en simultáneo en la pantalla LCD y, finalmente, también envía los datos de deformación empleando una conexión WiFi para que estos puedan ser mostrados en la interfaz gráfica.

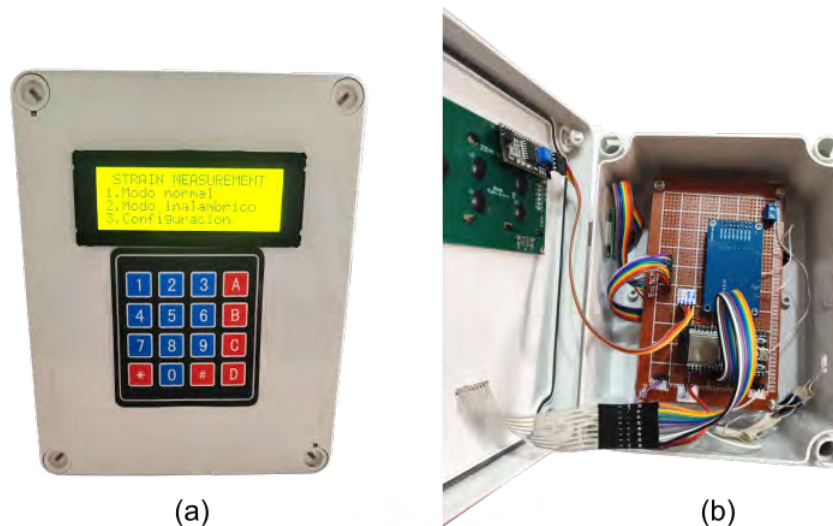


Figura 4.23: Vista exterior e interior del sistema de monitoreo de deformación

4.4 Implementación del software

El sistema contará con un software desarrollado con el lenguaje de programación Python que incluirá algoritmos de cálculo de fatiga y una interfaz gráfica de usuario (GUI). A continuación, se describen el desarrollo de los algoritmos, la interfaz gráfica y las características de la aplicación.

4.4.1 Desarrollo de los algoritmos de cálculo de fatiga

El cálculo de fatiga se realizará para una carga de amplitud variable y el análisis de este tipo de casos se detallo en la sección 2.1.2 del presente documento. En la Figura 4.24 se muestra un diagrama con cada una de las etapas de procesamiento de la señal obtenida de los sensores. Primero se adquieren los datos del historial de cargas (esfuerzo vs tiempo). Posteriormente se cuenta el número de ciclos de esfuerzos empleando el método Rainflow. Finalmente se leen datos de curvas SN del material de la probeta para aplicar la regla de Miner y determinar el daño acumulado. La descripción del conteo de ciclos de Rainflow y la teoría de daño acumulativo de Miner se encuentran en las secciones 2.2.1 y 2.1.3 de este documento.

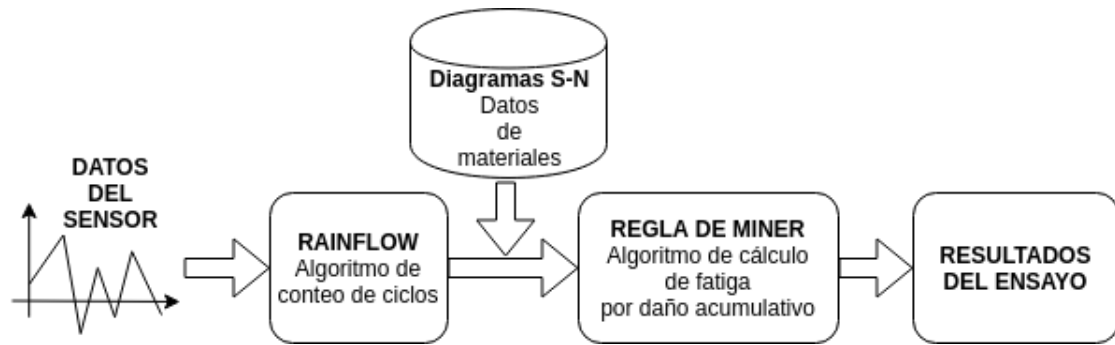


Figura 4.24: Algoritmo de cálculo de fatiga

- **Implementación del algoritmo de Rainflow.** El algoritmo fue implementado empleando la librería de Python *rainflow* (Janiszewski 2023) y un algoritmo propio de corrección que se adapta al procedimiento de conteo recomendado por la norma ASTM 1049-85 (ASTM 2017).
- **Desarrollo del algoritmo de Miner.** Este algoritmo cuenta con tres etapas. En la primera etapa se realiza una interpolación lineal para adquirir los datos del número de ciclos del diagrama S-N para una determinada carga. En la segunda etapa se emplea los resultados del conteo de ciclos para realizar el cálculo de los promedios de daño. Finalmente se realiza una suma de todos estos promedios y se determina la fatiga.

4.4.2 Desarrollo de interfaz gráfica (GUI)

La interfaz gráfica fue desarrollada empleando el framework *Dash* para construir aplicativos web. Esta herramienta de desarrollo facilita el diseño de aplicaciones para sistemas de adquisición de datos, y además, permite su ejecución en un servidor web. Es decir, la interfaz gráfica puede ser visualizada en la mayoría de sistemas operativos como: Windows, Mac OS y GNU Linux. Así mismo, la interfaz cuenta con cuatro secciones y a continuación se describe la función de cada una de estas partes.

Sección de opciones del ensayo

En esta sección se muestran al usuario las opciones del programa (ver Figura 4.25). Esta parte de la interfaz cuenta con las siguientes funcionalidades:

- **Selección del material.** El ensayo requiere de la selección del tipo de material de la probeta y la aplicación cuenta con una lista de materiales que se muestra en una lista despegable. Finalmente, para cargar el dato seleccionado de esta lista al programa se emplea el botón “CARGAR MATERIAL”.
- **Inicio de ensayo.** Esta subsección cuenta con dos botones “INICIAR ENSAYO” y “TARE”. El usuario puede controlar la mediciones del ensayo empleando estas opciones.
- **Datos en tiempo real.** Esta parte muestra la deformación y el esfuerzo medidos en tiempo real. Además muestra el tiempo total transcurrido desde el inicio del ensayo.
- **Selección de datos de simulación.** En esta subsección el usuario puede seleccionar datos de historiales de carga existentes para realizar simulaciones de conteos de ciclos y cálculo de fatiga.

The screenshot displays a software interface with the following elements:

- Material Selection:** A dropdown menu labeled "Seleccionar material:" with "AISI 4130" selected. Below it is a button labeled "CARGAR MATERIAL".
- Test Controls:** Two buttons labeled "INICIAR ENSAYO" and "TARE".
- Real-time Data:** A section titled "Deformación" showing "0.00113 ue". Below it, two columns are shown: "Esfuerzo" with "226 MPa" and "Tiempo transcurrido" with "00: 00: 51".
- Test Data Selection:** A dropdown menu labeled "Datos de prueba:" with "ASTM 1049" selected. Below it is a button labeled "CARGAR DATOS".

Figura 4.25: Sección de opciones de la interfaz gráfica.

Sección de medición en tiempo real

La aplicación cuenta con una sección que muestra los datos de las variables del ensayo a través de tres gráficos: historial actual, historial completo y curva SN.

- **Gráfico del historial actual.** En este gráfico se muestra el espectro de cargas en tiempo real: σ (esfuerzo) vs t (tiempo). Con el fin de mostrar la medición más reciente, siempre se muestran los últimos veinte datos capturados en el gráfico (ver Figura 4.26).



Figura 4.26: Sección de visualización del ensayo en tiempo real.

- **Gráfico del historial completo.** Este gráfico representa el espectro de cargas (σ vs t) desde el inicio del ensayo (ver Figura 4.27).

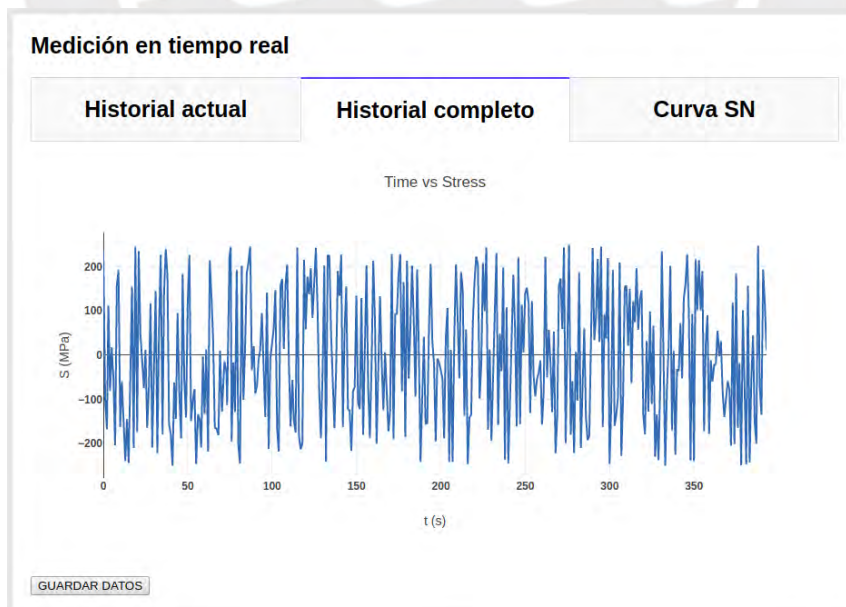


Figura 4.27: Sección de visualización del ensayo total.

- **Gráfico de la curva SN.** En este gráfico se muestra la curva SN del material seleccionado

en las opciones del ensayo (ver Figura 4.28). Este gráfico solo se muestra después presionar el botón “CARGAR MATERIAL”.

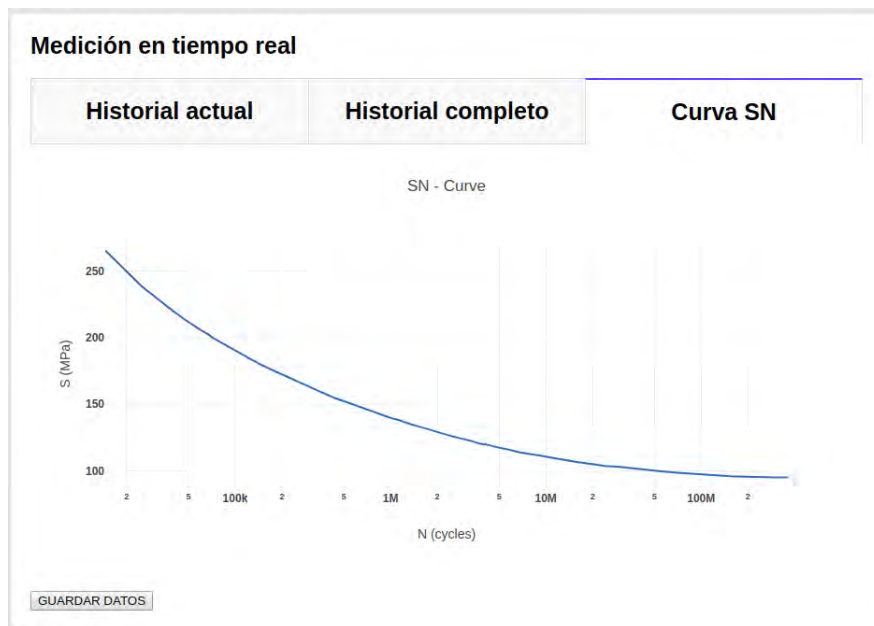


Figura 4.28: Sección de visualización de la curva SN.

Sección de cálculo de fatiga

Los algoritmos de cálculo de fatiga se muestran en esta sección de la interfaz. Notar que para realizar el cálculo primero se debe realizar el conteo de ciclos.

- **Conteo de Rainflow.** En esta parte de la aplicación se realiza el conteo de ciclos de Rainflow. Para ejecutar este proceso primero se debe hacer clic en el botón “GENERAR TABLA DE RAINFLOW” que genera una tabla con las amplitudes y el conteo de ciclos para cada amplitud (ver Figura 4.29).

Conteo de ciclos de Rainflow y análisis de fatiga

Conteo de Rainflow Regla de Miner

GENERAR TABLA DE RAINFLOW

Amplitudes (MPa)	Cycle count (n)
4	1
34	1
40	1
47	1
48	1

1 / 26

Figura 4.29: Sección de conteo de ciclos.

- **Cálculo de la fatiga.** En esta sección se realiza el cálculo de la fatiga empleando la regla de Miner. Para determinar el daño acumulado se debe hacer clic en el botón “CALCULAR DAÑO” que muestra el porcentaje de daño y las proporciones de cada ciclo (ver Figura 4.30).

Conteo de ciclos de Rainflow y análisis de fatiga

Conteo de Rainflow Regla de Miner

CALCULAR DAÑO

Damage sum: 0.04

Damage: 0.04%

n cycles	N cycles	n/N
1	15842.07	0.00006312306409452805
1	18194.19	0.00005496260069835481
0.5	11739.79	0.000042590199654337934
0.5	14080.26	0.00003551070789885982
1	28797.69	0.000034725007457195354

1 / 15

Figura 4.30: Sección de cálculo de fatiga.

Sección de simulación

La simulación cuenta con las mismas funciones de la sección de cálculo de fatiga. Adicionalmente cuenta con una gráfica del historial de cargas (σ vs t) de simulación cargado por el usuario en la sección de opciones (ver Figura 4.31). Notar que este gráfico solo se muestra después presionar el botón “CARGAR DATOS”.



Figura 4.31: Sección de simulaciones.

4.5 Diagrama de operaciones

En la Figura 4.32 se muestra el diagrama de operaciones general de la máquina. En este esquema se muestran todos los procedimientos que realizará el usuario cuando interactúe con el dispositivo de monitoreo.

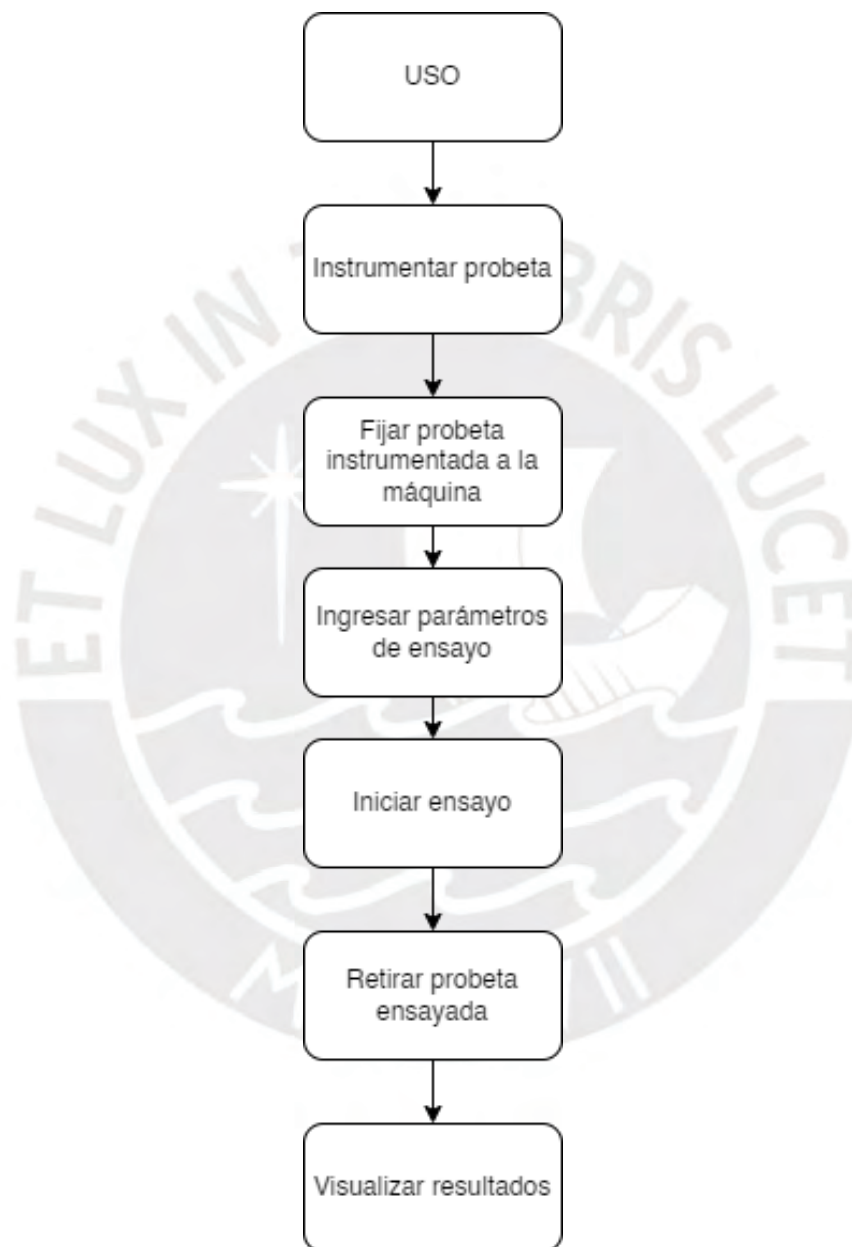


Figura 4.32: Diagrama de operaciones

En la Figura 4.33 se muestra el diagrama de operaciones de la instrumentación de la probeta. En este esquema se muestra el procedimiento que debe realizar el usuario para adherir los *strain gauges*.

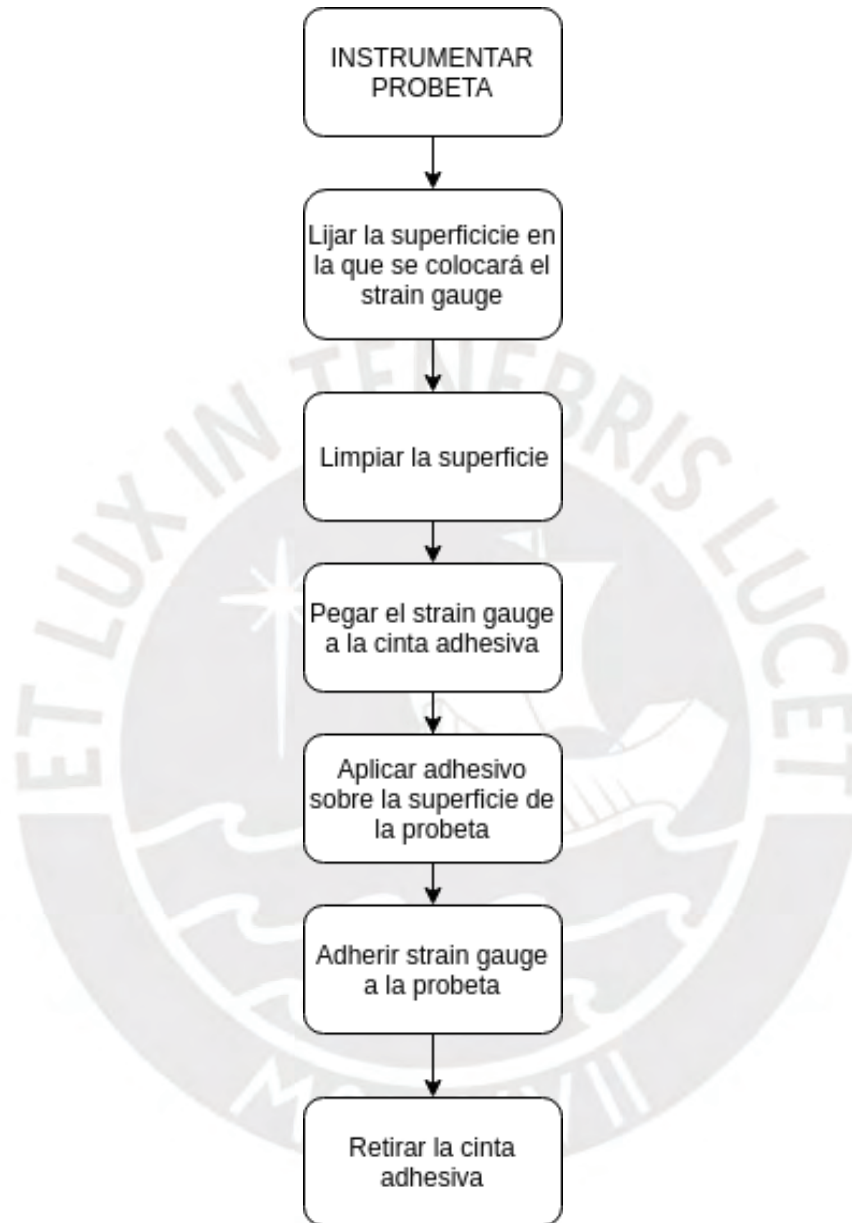


Figura 4.33: Diagrama de operaciones: instrumentación de probeta

CAPÍTULO 5

PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

En este capítulo se presentan las pruebas de medición que se realizaron para demostrar el funcionamiento del sistema desarrollado en el capítulo anterior. En la primera parte, se muestra una evaluación de la repetibilidad de las mediciones. En la segunda parte, se presentan pruebas preliminares con cargas estáticas. En la tercera parte, se describen pruebas de medición con cargas alternantes empleando el banco de pruebas. Finalmente, se muestran pruebas complementarias en recipientes a presión y una comparación entre los gráficos obtenidos por el sistema de monitoreo que fue implementado y una máquina de tracción Zwick Roell.

5.1 Análisis de repetibilidad

Garantizar la confiabilidad de las medidas de deformación realizadas por el sistema de monitoreo es necesario. Por esta razón, se hizo un análisis de repetibilidad, y con el objetivo de realizar este procedimiento, se hicieron mediciones de deformación en una viga sometida a flexión de tres puntos con pesos calibrados (1N, 2N y 3N). En total se realizaron 90 mediciones; es decir, para cada uno de los pesos se repitieron las mismas mediciones 30 veces. Además, para realizar las mediciones se empleó el modelo experimental presentado en la introducción de la sección 5.2 y los resultados se compararon con el modelo teórico descrito en la sección 5.2.1. En la Figura 5.1 se muestra la dispersión de las 30 mediciones de deformación para el peso de 1N.

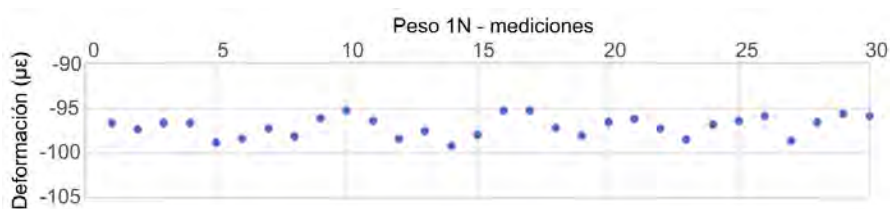


Figura 5.1: Dispersión de las treinta medidas tomadas con el peso de 1N

Para el caso del peso de 1N los valores extremos oscilaron entre $\pm 2.5\mu\epsilon$ aproximadamente. Así mismo, en la Figura 5.2 se pueden observar las 30 mediciones realizadas con el peso de 2N y, en este caso, los valores extremos oscilaron entre $\pm 3\mu\epsilon$ aproximadamente.

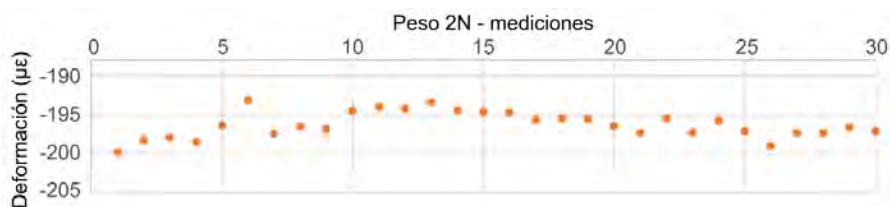


Figura 5.2: Dispersión de las treinta medidas tomadas con el peso de 2N

En la Figura 5.3 se muestran las 30 mediciones del peso de 3N y para este caso los valores extremos oscilaron entre $\pm 3.5\mu\epsilon$ aproximadamente.



Figura 5.3: Dispersión de las treinta medidas tomadas con el peso de 3N

Finalmente, en la Tabla 5.1 se muestran las 90 mediciones de deformación ($\mu\epsilon$) realizadas.

Tabla 5.1: Tabla de mediciones de repetibilidad.

Medidas - Peso de 1N				Medidas - Peso de 2N				Medidas - Peso de 3N			
n	ϵ ($\mu\epsilon$)	n	ϵ ($\mu\epsilon$)	n	ϵ ($\mu\epsilon$)	n	ϵ ($\mu\epsilon$)	n	ϵ ($\mu\epsilon$)	n	ϵ ($\mu\epsilon$)
1	-96.64	16	-95.26	1	-199.78	16	-194.74	1	-295.70	16	-290.92
2	-97.34	17	-95.23	2	-198.21	17	-195.67	2	-293.66	17	-293.47
3	-96.70	18	-97.23	3	-197.87	18	-195.42	3	-290.32	18	-295.61
4	-96.67	19	-98.09	4	-198.53	19	-195.55	4	-289.96	19	-290.12
5	-98.89	20	-96.58	5	-196.34	20	-196.46	5	-288.14	20	-292.51
6	-98.39	21	-96.22	6	-193.10	21	-197.36	6	-291.92	21	-289.71
7	-97.31	22	-97.28	7	-197.47	22	-195.47	7	-291.92	22	-291.56
8	-98.17	23	-98.48	8	-196.58	23	-197.27	8	-291.76	23	-294.28
9	-96.14	24	-96.83	9	-196.80	24	-195.74	9	-291.62	24	-290.02
10	-95.29	25	-96.40	10	-194.46	25	-197.10	10	-290.74	25	-295.47
11	-96.40	26	-95.86	11	-194.01	26	-198.97	11	-289.28	26	-290.93
12	-98.44	27	-98.60	12	-194.23	27	-197.36	12	-292.85	27	-295.54
13	-97.52	28	-96.62	13	-193.42	28	-197.39	13	-293.89	28	-295.25
14	-99.21	29	-95.69	14	-194.40	29	-196.65	14	-294.25	29	-291.59
15	-98.04	30	-95.87	15	-194.61	30	-197.10	15	-294.32	30	-292.48

Empleando los resultados que se muestran en la Tabla 5.1 es posible determinar la repetibilidad y, para este propósito, se determinará la desviación estándar de cada grupo de mediciones. Así mismo, con el fin de entender la distribución de estos datos, se muestran los *box plot* para cada peso en la Figura 5.4. En los *box plot* o diagramas de cajas es posible observar que la variación de mediciones, sin considerar los valores extremos (*outliers*), oscila entre $\pm 2\mu\epsilon$ aproximadamente

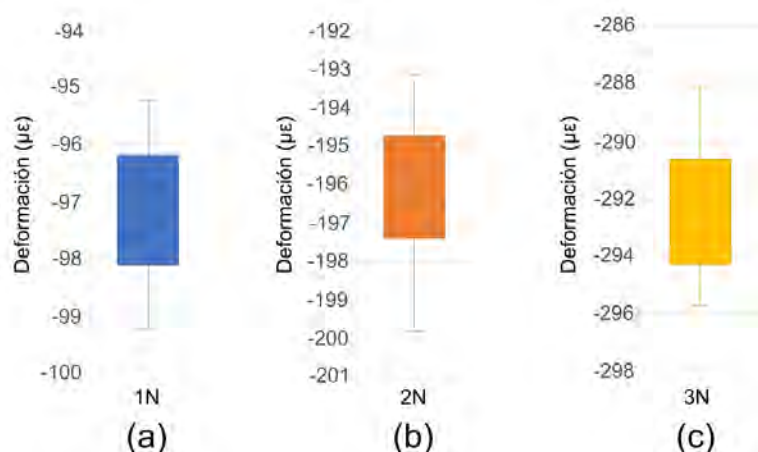


Figura 5.4: *Box plot* que muestra la variación de las medidas de deformación

El promedio (\bar{x}), la desviación estándar (s) y el coeficiente de variación ($RSD = s/\bar{x}$) de las 30 mediciones para cada caso (1N, 2N y 3N) se muestran en la Tabla 5.2. De estos resultados, el coeficiente de variación, representa la proporción entre la desviación estándar y la media. Es decir, nos indica cuán cercanos están nuestras mediciones a la media y este es un valor que nos permite evaluar la repetibilidad. Así mismo, al analizar el %RSD se puede observar que el máximo valor de este porcentaje fue de 1.17%, lo que nos confirma la repetibilidad de nuestras mediciones, pues existe una gran concentración de las mediciones alrededor de la media.

Tabla 5.2: Variables estadísticas de las treinta mediciones para cada peso

	1N	2N	3N
Promedio (\bar{x})	$-97.05\mu\epsilon$	$-196.27\mu\epsilon$	$-292.33\mu\epsilon$
Desviación estándar (s_k)	$1.14\mu\epsilon$	$1.67\mu\epsilon$	$2.12\mu\epsilon$
Coeficiente de variación (RSD_k)	0.0117	0.0085	0.0073
%Coeficiente de variación ($\%RSD_k$)	1.17%	0.85%	0.73%

Ahora determinaremos la relación entre los tres valores de desviación estándar que obtuvimos con el fin de obtener un porcentaje único que nos permita evaluar la repetibilidad en función a un solo valor. Para este propósito, emplearemos la desviación estándar agrupada (ecuación 5.1).

$$s_{agrupada} = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2 + \dots + (n_k - 1)s_k^2}{n_1 + n_2 + \dots + n_k - k}} \quad (5.1)$$

Reemplazando los datos que se obtuvieron de la Tabla 5.2 en la ecuación 5.1 se puede obtener un valor único de la desviación estándar de $1.69\mu\epsilon$.

$$s_{agrupada} = \sqrt{\frac{(30 - 1)(1.14)^2 + (30 - 1)(1.67)^2 + (30 - 1)(2.12)^2}{30 + 30 + 30 - 3}} = 1.69\mu\epsilon$$

De la misma forma que se obtuvo un valor único de la desviación estándar, también se puede obtener un solo valor del porcentaje del coeficiente de variación. Para este fin, emplearemos el coeficiente de variación agrupada (ecuación 5.2).

$$RSD_{agrupada} = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)RSD_1^2 + (n_2 - 1)RSD_2^2 + \dots + (n_k - 1)RSD_k^2}{n_1 + n_2 + \dots + n_k - k}} \quad (5.2)$$

Empleando los valores de RSD que se obtuvieron para cada grupo de mediciones en la Tabla 5.2 y al reemplazarlos en la ecuación 5.2 se obtiene un valor único de %RSD de 0.94%.

$$RSD_{agrupada} = \sqrt{\frac{(30 - 1)(0.0117)^2 + (30 - 1)(0.0085)^2 + (30 - 1)(0.0073)^2}{30 + 30 + 30 - 3}} = 0.0094$$

$$\%RSD_{agrupada} = 0.0094 \times 100 = 0.94\% \approx 1.00\%$$

Finalmente, el valor de $\%RSD_{agrupada}$ de aproximadamente 1.00% es más que relevante, ya que refleja que las mediciones tienen poca variabilidad. Es decir, se demuestra la repetibilidad de las mediciones realizadas por el sistema de monitoreo.

5.2 Pruebas con cargas estáticas

En esta sección se describen dos ensayos que se realizaron empleando cargas estáticas aplicadas sobre una viga de aluminio de sección rectangular. En la primera prueba, se hicieron diez mediciones sucesivas para determinar el esfuerzo presente en la viga. Adicionalmente, en una segunda prueba, se realizaron cuatro mediciones y se evaluó si el sistema es capaz de medir la deformación cuando la viga vuelve a su estado inicial. Así mismo, para ambas pruebas se usó el modelo de flexión de tres puntos como se muestra en la Figura 5.5.

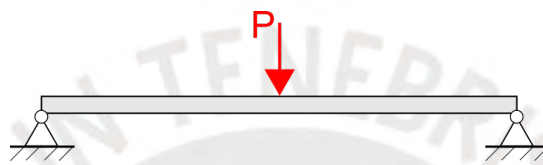


Figura 5.5: Modelo de flexión de 3 puntos

Para implementar un sistema de flexión de tres puntos se empleó el aparato de ensayos SM1004. En la Figura 5.6 se muestran: la *strain gauge* adherida en el centro de la viga y cómo la fuerza es aplicada sobre este elemento empleando pesos calibrados en un portapesas.



Figura 5.6: Disposición empleada para la prueba de medición

Los diagramas de momento flector del modelo teórico a emplear en las dos pruebas de ensayo se muestran en la Figura 5.7a. Además, en la Figura 5.7b se muestran las dimensiones de la viga de aluminio que servirán para realizar el cálculo teórico del esfuerzo.

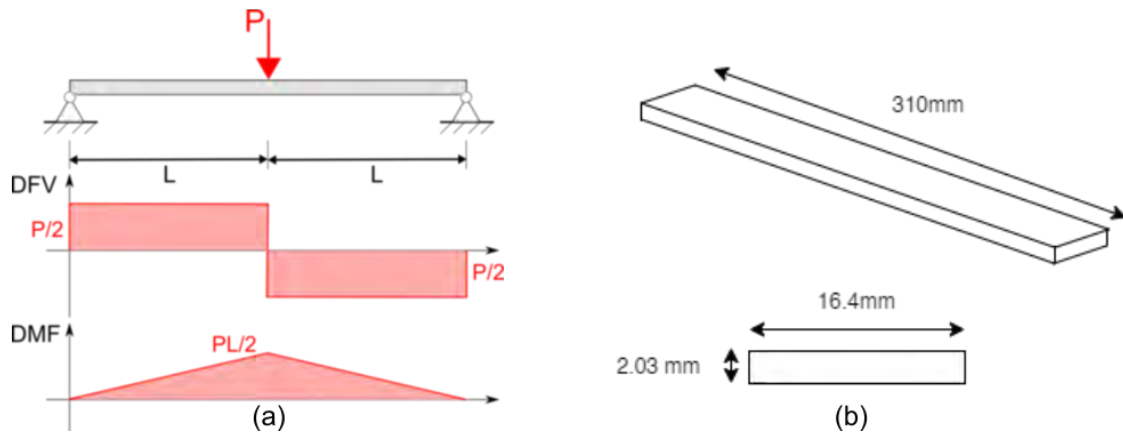


Figura 5.7: Diagrama de fuerzas y dimensiones de la viga de aluminio

Adicionalmente, en la Figura 5.8 también se muestra un esquema de la transferencia de datos que se llevará a cabo durante ambas mediciones. Notar que este esquema representa el proceso completo de adquisición y esta lógica se empleó en todas las pruebas que se realizaron.

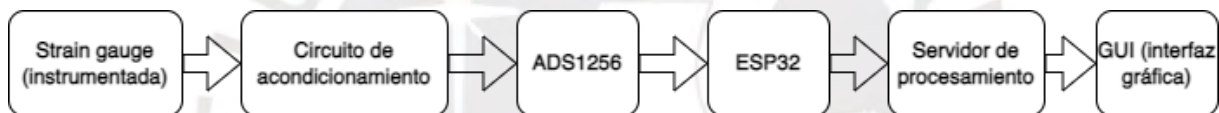


Figura 5.8: Esquema de transferencia de datos de las pruebas

5.2.1 Modelo teórico empleado

El modelo teórico que se empleará durante las pruebas con cargas estáticas se deriva de la ecuación del esfuerzo normal originado por la flexión en una viga (ecuación 5.3).

$$\sigma = \frac{Mc}{I} \quad (5.3)$$

En la Figura 5.7a, de los diagramas de fuerzas y momentos, se puede determinar el valor del momento (ecuación 5.4). Así mismo, la viga de aluminio tiene una sección cuadrada por lo que el valor de la inercia se determina empleando la ecuación 5.5. Además, el valor de c en la ecuación 5.3 corresponde a $c = b/2$, pues es la distancia entre el eje neutro y el punto en el que será medida la deformación.

$$M = \frac{PL}{2} \quad (5.4)$$

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (5.5)$$

De las expresiones anteriores se obtiene la ecuación para determinar el esfuerzo teórico (ecuación 5.6). Además, empleando la Ley de Hooke generalizada $\sigma = E\varepsilon$ se puede determinar la deformación teórica (ecuación 5.7).

$$\sigma_{teórico} = \frac{3PL}{bh^2} \quad (5.6)$$

$$\varepsilon_{teórico} = \frac{3PL}{Ebh^2} \quad (5.7)$$

Tabla 5.3: Valores empleados para el ensayo.

P [N]	L [mm]	b [mm]	h [mm]	E [MPa]
De 1 a 10	155	16.4	2.03	70000

En la Tabla 5.3 se muestran los valores que se usaran para determinar los resultados del modelo teórico que se compararan con los valores experimentales obtenidos por el sistema de monitoreo. En la sección 4.1.1, se muestra cómo se obtiene el valor de la deformación experimental y la ecuación que fue empleada para determinarla (ver ecuación 4.6).

5.2.2 Prueba con diez magnitudes sucesivas

En la primera prueba se capturaron datos de deformación empleando pesos calibrados que fueron dispuestos para medir diez magnitudes sucesivas. La magnitud inicial que se midió fue de 1N y la magnitud final de 10N. El valor de esfuerzo, como se indicó en las secciones anteriores, no se puede obtener de forma directa. Por esta razón, se deben emplear la deformación medida y el coeficiente o módulo de elasticidad del aluminio (70GPa) para calcular la magnitud del esfuerzo. En la Figura 5.9 se muestra el gráfico de deformación vs tiempo de todas las mediciones que fueron obtenidas por el sistema de monitoreo. Debido a que las unidades de deformación son de magnitudes en el rango de 10^{-6} , la deformación se muestra en microstrains ($\mu\varepsilon$). Notar que la deformación es adimensional; no obstante, un microstrain se puede representar también con las dimensiones $10^{-6} \times [mm/mm]$.

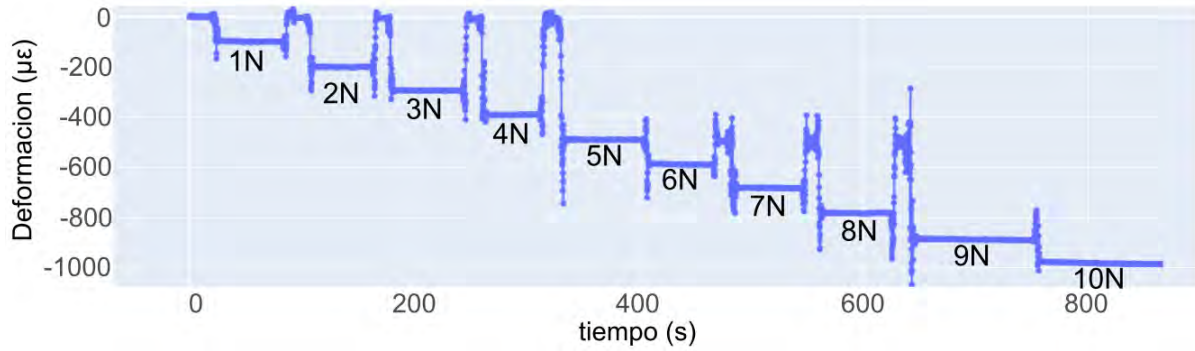


Figura 5.9: Gráfico de deformación vs tiempo de la primera prueba

En la Figura 5.9 se observa que durante las mediciones el valor de la deformación permanece constante. Es decir, se obtuvieron lecturas estables para cada uno de los pesos que se probaron. Además, de este gráfico también se puede concluir que existe proporcionalidad entre cada magnitud, un aspecto importante que confirma la linealidad en las mediciones. No obstante, también se pueden observar que existen tramos en los que la medición presenta oscilaciones; por ejemplo, en el cambio entre 8N y 9N. Estas variaciones fueron causadas debido a mediciones adicionales y ruido que se originaron cuando se realizó el cambio de los pesos calibrados. Estas oscilaciones no son relevantes para las pruebas y pueden ser ignoradas porque no afectan los datos originalmente obtenidos. Por esta razón, en la Figura 5.10 se muestra una versión corregida del gráfico que ignora los efectos de estas variaciones.

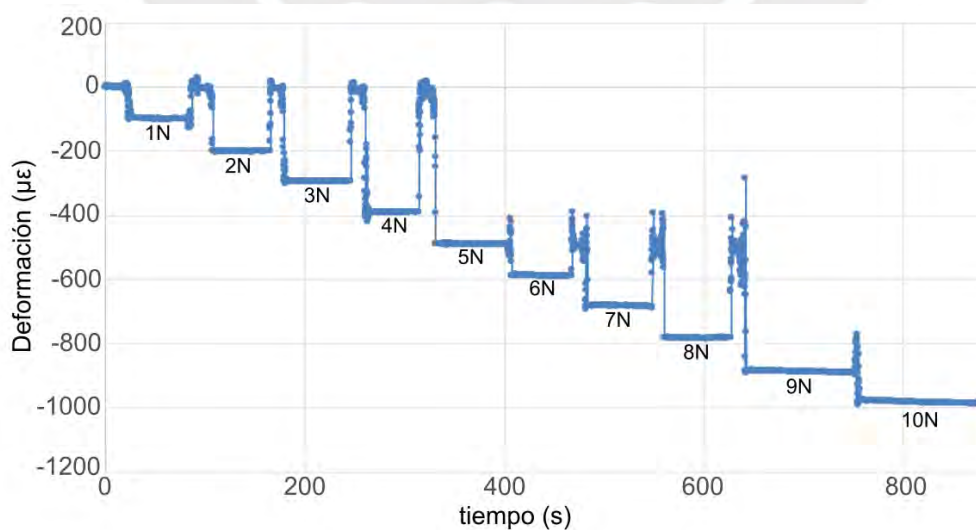


Figura 5.10: Gráfico de deformación vs tiempo de la primera prueba sin oscilaciones

En la Tabla 5.4 se muestran los resultados experimentales de la deformación obtenidos durante las mediciones, y también, el valor del esfuerzo que fue calculado empleando estos resultados. Para obtener estos resultados se emplearon las ecuaciones descritas en la sección 5.2.1.

Tabla 5.4: Resultados de la primera prueba.

Fuerza (N)	ε teórica ($\mu\varepsilon$)	σ teórico (MPa)	ε experimental ($\mu\varepsilon$)	σ experimental (MPa)	Δ esfuerzos (MPa)	% de error (deformación)
1	-98.29	6.88	-98.67	6.91	0.03	0.38
2	-196.58	13.76	-200.14	14.01	0.25	1.81
3	-294.88	20.64	-293.89	20.57	0.07	-0.33
4	-393.17	27.52	-390.33	27.32	0.20	-0.72
5	-491.46	34.40	-489.55	34.27	0.13	-0.39
6	-589.75	41.28	-588.30	41.18	0.10	-0.25
7	-688.05	48.16	-682.08	47.75	0.42	-0.87
8	-786.34	55.04	-782.43	54.77	0.27	-0.50
9	-884.63	61.92	-887.51	62.13	0.20	0.33
10	-982.92	68.80	-983.37	68.84	0.03	0.05

La Tabla 5.4 muestra también que el mayor porcentaje de error obtenido fue de 1.81% correspondiente a la medida de 2N. Este porcentaje puede ser atribuido a los cambios continuos de la disposición de pesos para obtener magnitudes sucesivas; por ejemplo, existió una oscilación considerable al realizar el cambio de pesos entre 1N y 2N (ver Figura 5.9). Finalmente, los resultados muestran que la diferencia máxima entre el valor de esfuerzo experimental y esfuerzo teórico fue de 0.42 MPa. Este resultado es favorable, pues implica que el sistema es apropiado para realizar mediciones en ensayos de fatiga.

5.2.3 Prueba con cuatro magnitudes distintas

En la segunda prueba se midió la deformación empleando la misma disposición de la viga (ver figura 5.7). Sin embargo, para evitar las oscilaciones, esta vez se adicionaron pesos de 1N, 2N, 3N y 4N de forma sucesiva y se midió la suma de estas magnitudes. Así mismo, en esta prueba también se retiró los pesos durante un periodo de la medición para luego volver a incluirlos

con el fin de demostrar que el sistema es capaz de medir la deformación inicial de la probeta cuando esta no se encuentra sometida a ninguna fuerza. En la Figura 5.11 se muestra el gráfico de deformación vs tiempo de la segunda prueba donde se puede observar que se midieron cuatro magnitudes distintas: 1N, 3N, 6N y 10N.

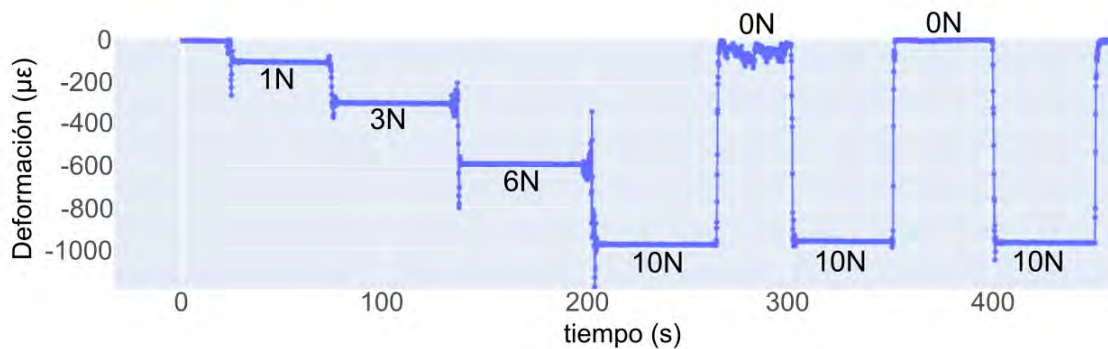


Figura 5.11: Gráfico de deformación vs tiempo de la segunda prueba

En la Figura 5.11 también se puede notar que existen oscilaciones durante el cambio de pesos pero son menores en comparación del primer ensayo. Sin embargo, cuando no se realizó un cambio en los pesos y solamente se retiró el portapesas, no se presentaron oscilaciones. Finalmente, en el gráfico se puede observar que el sistema de monitoreo es capaz de leer cargas alternantes, pues al retirar la fuerza de 10N en dos ocasiones, la deformación medida retorna a su estado original. Esta característica es de suma importancia porque es relevante para los ensayos de fatiga. En la Tabla 5.5 se muestran los resultados experimentales de la segunda prueba. El mayor porcentaje de error obtenido fue de -7.04% correspondiente a la medida de 1N. Este porcentaje de error puede deberse a que la disposición inicial del peso no fue adecuada. Se puede notar que existió una oscilación considerable al realizar el primer cambio de peso (ver Figura 5.11). No obstante, este margen de error es aceptable, pues es mucho menor al porcentaje de error de obtenido durante los siguientes ensayos. Finalmente, los resultados muestran que la diferencia máxima entre el valor de esfuerzo experimental y esfuerzo teórico fue de 0.48 MPa. Este resultado, al igual que en el primer experimento, es notable, pues implica que el sistema es capaz de medir esfuerzos con una precisión apropiada para los ensayos de fatiga.

Tabla 5.5: Resultados de la segunda prueba.

Fuerza (N)	ε teórica ($\mu\epsilon$)	σ teórico (MPa)	ε experimental ($\mu\epsilon$)	σ experimental (MPa)	Δ esfuerzos (MPa)	% de error (deformación)
1	-98.29	6.88	-105.21	7.36	0.48	7.04
3	-294.88	20.64	-301.69	21.12	0.48	2.31
6	-589.75	41.28	-592.69	41.49	0.21	0.50
10	-982.92	68.80	-976.41	68.35	0.46	-0.66

En las dos pruebas con cargas estáticas se puede observar que el sistema es capaz de medir deformaciones de forma aceptable. Por ejemplo, en la Tabla 5.4 de la primera prueba se puede observar que la mayor diferencia de valores entre la deformación teórica y experimental fue de aproximadamente $5\mu\epsilon$, mientras que en la Tabla 5.5 de la segunda prueba se muestra que la mayor diferencia de deformación fue de aproximadamente $7\mu\epsilon$. Es decir, los resultados son más que significativos, pues es a través de las deformaciones que se obtienen los esfuerzos, y las magnitudes obtenidas de estas variables son de una precisión apropiada. Por esta razón, se puede concluir que el sistema funciona para medir la deformación en la probeta, y entonces, también será apropiado para realizar mediciones de cargas alternantes. Las pruebas con este tipo de cargas variables se describirán en la siguiente sección de este capítulo.

5.3 Pruebas del sistema de monitoreo con cargas alternantes

El sistema de monitoreo se empleará para realizar mediciones en ensayos de fatiga y esto implica que la probeta estará sometida a cargas dinámicas. Por esta razón, se realizaron mediciones empleando un banco de pruebas (los detalles sobre la implementación de este banco se encuentran descritos en el Anexo D del presente documento). En la Figura 5.12a se muestra a la estructura del banco de pruebas junto con el sistema de monitoreo de deformación. Así mismo, en estas pruebas también se empleará una viga de aluminio de sección cuadrada como probeta. Esta viga se encontrará sometida a flexión en cuatro puntos (ver Anexo D) y la posición de las fuerzas, los soportes y la *strain gauge* se muestran en la Figura 5.12b.

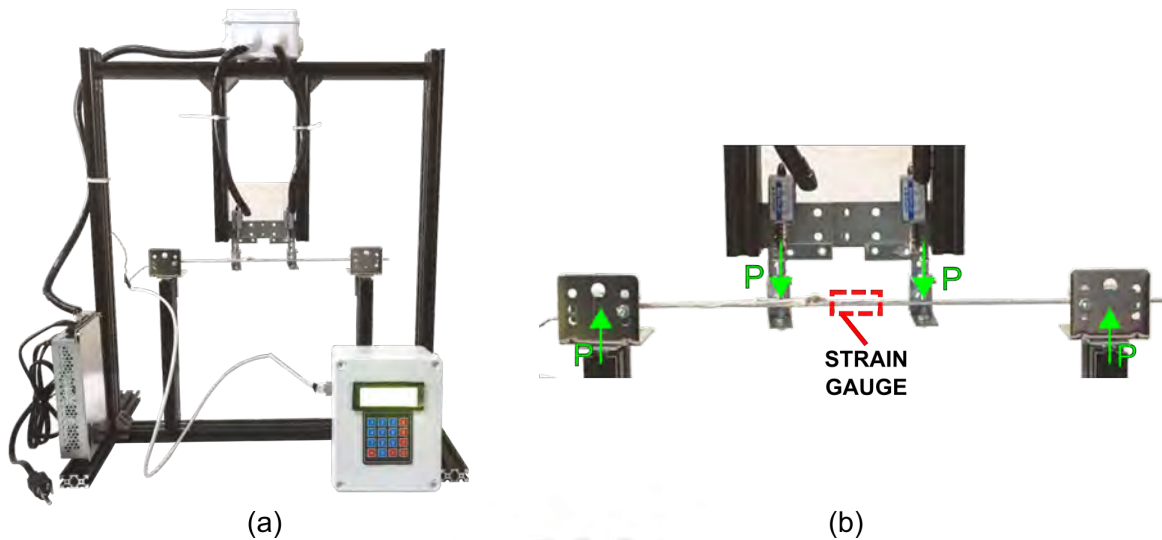


Figura 5.12: Banco de pruebas y fuerzas sobre la probeta

El objetivo de estas pruebas es determinar si el sistema es capaz de realizar mediciones con cargas alternantes sin ningún tipo de interrupciones. Además, este ensayo es importante porque se realiza para comprobar si es posible obtener un gráfico de espectro de cargas cíclico empleando el sistema de monitoreo.

5.3.1 Primera prueba de obtención de un gráfico de cargas alternantes

La primera prueba se realizó con el fin de verificar si es posible obtener un gráfico de cargas alternantes cíclicas. En la Figura 5.13 se muestra una parte del gráfico de deformación vs tiempo de la primera medición que fue realizada empleando el banco de pruebas. En primer lugar, para verificar si el sistema permanece estable, no se activaron los solenoides durante los primeros seis segundos y en el gráfico se puede observar que la deformación leída durante este periodo inicial permaneció constante. Es decir, el sistema cumple con la condición de estabilidad. En segundo lugar, en la Figura 5.13 se muestra que la medición comienza después de los primeros seis segundos y esto coincide con la activación de los solenoides. Adicionalmente, se puede notar en este gráfico que las cargas generadas son variables y esto es compatible con el comportamiento esperado: el banco de pruebas es capaz de generar un espectro de cargas.

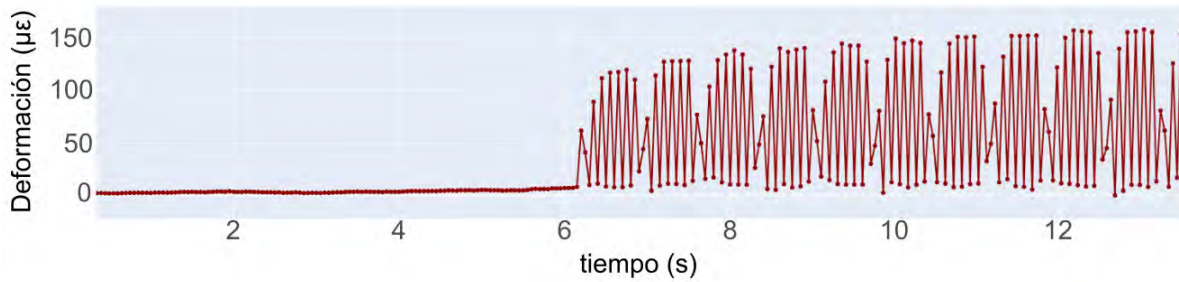


Figura 5.13: Gráfico deformación vs tiempo de la primera prueba con carga variable

En la Figura 5.14 se muestra un gráfico de los primeros veinte segundos de la medición. De esta figura se puede concluir que el espectro de cargas presenta un patrón de repetición; en otras palabras, las fuerzas aplicadas por el banco de pruebas son cíclicas y es posible emplear los datos generados para identificar las características de esta carga variable. Por esta razón, es necesario observar una sección de la gráfica para evaluar los detalles del espectro de cargas.

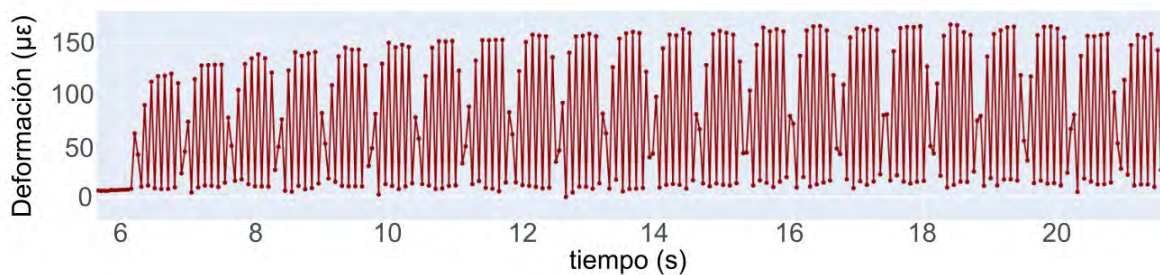


Figura 5.14: Gráfico deformación vs tiempo de carga alternante extendido

En la Figura 5.15 se observa con mayor detalle una sección del gráfico del espectro de cargas que fue obtenido empleando el banco de pruebas. A partir de este gráfico se pueden identificar dos características importantes. Primero, se puede observar el grupo de cargas que se repite de forma cíclica (marcadas en los cuadros con las letras A y B). Segundo, a partir del gráfico es posible determinar la frecuencia, pues se puede analizar un tramo del espectro de cargas durante un segundo. Finalmente, después de analizar los resultados obtenidos, se puede concluir que el banco de pruebas funciona y, que en conjunto con el sistema de monitoreo, se puede utilizar para generar espectros de cargas.

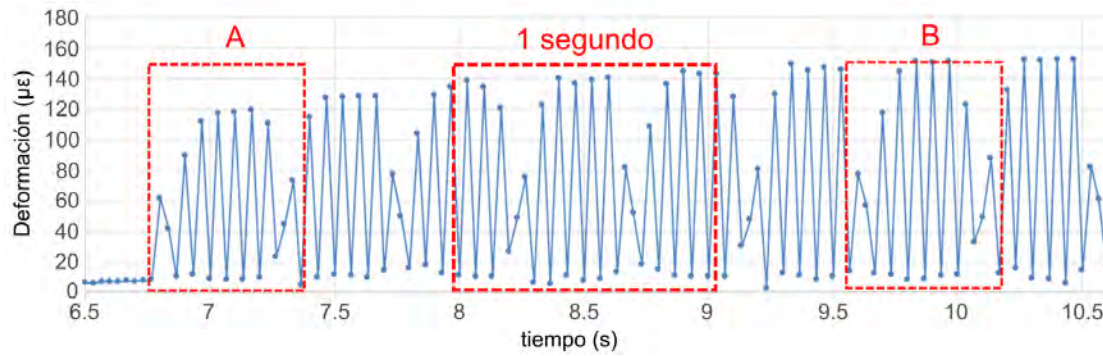


Figura 5.15: Detalles del gráfico de deformación vs tiempo de la primera prueba

5.3.2 Segunda prueba de obtención de un gráfico de cargas alternantes

En la primera prueba se demostró que empleando el banco de pruebas y el sistema de monitoreo es posible obtener gráficos con cargas alternantes. Así mismo, durante la evaluación de los resultados que se obtuvieron en la medición inicial se pudo reconocer algunas características importantes del espectro de cargas. Sin embargo, es necesario determinar si el sistema permanece estable en el tiempo y si las características de las cargas que fueron reconocidas durante la primera prueba vuelven a repetirse en una segunda medición. Por este motivo, con el fin de evaluar la estabilidad del sistema y las características del espectro de cargas, se realizó una segunda prueba empleando las mismas condiciones iniciales de la primera medición. Los primeros veinte segundos de la medición de la segunda prueba con cargas alternantes se muestran en la Figura 5.16. En este gráfico se observa que la viga de aluminio no se deforma durante los primeros seis segundos y luego, al activar los solenoides por tres segundos, la viga es sometida a una carga alternante nuevamente durante este mismo periodo de tiempo. Posteriormente, el banco de pruebas se desactiva aproximadamente por cinco segundos y la medición de la deformación vuelve a cero. Finalmente, se reactivan los solenoides y el sistema vuelve a mostrar los datos del espectro de cargas.

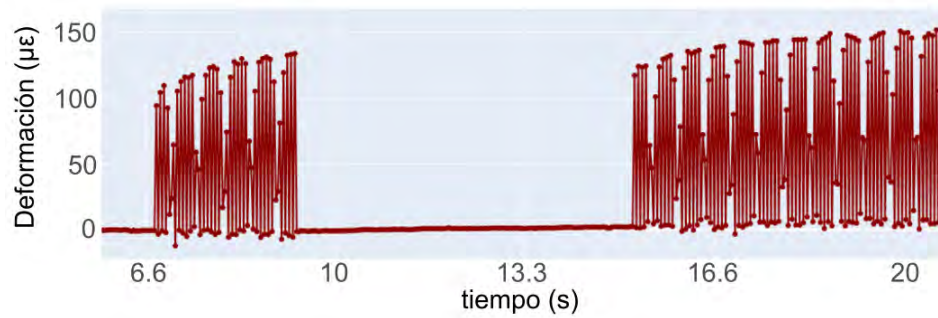


Figura 5.16: Gráfico deformación vs tiempo de la segunda prueba con carga variable

Del gráfico que se muestra en la Figura 5.16 se puede deducir que el sistema es estable porque cuando los solenoides son desactivados, la probeta no se deforma. Además, cuando se vuelven a activar los solenoides del banco de pruebas, el espectro de cargas continua siendo el mismo. Ahora es preciso demostrar que el espectro de cargas que se obtuvo en el segundo ensayo sea compatible con los gráficos de la primera medición. Para este fin es necesario analizar el espectro de cargas durante un periodo de tiempo y en la Figura 5.17 se muestra un tramo de esta curva de la carga alternante durante diez segundos. En esta figura se puede observar que el espectro de cargas es cíclico, al igual que en la primera medición. Además es parecido en magnitud por lo que ahora solo resta analizar con detalle la forma y la frecuencia del espectro.

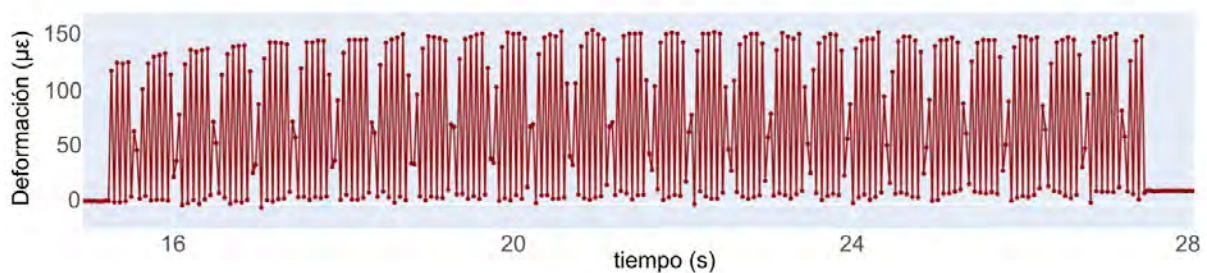


Figura 5.17: Gráfico deformación vs tiempo de la segunda carga alternante

La Figura 5.18 muestra detalles del espectro de cargas obtenidos durante la segunda medición. En primer lugar, se puede observar que el espectro de cargas que se obtuvo en esta prueba es el mismo que se observó en la primera medición (las cargas ciclicas se muestran marcadas con cuadro rotulados de la letra A hasta la G). En segundo lugar, la frecuencia del espectro de cargas

que se obtuvo en esta medición es aproximadamente la misma que se observó en la primera medición.

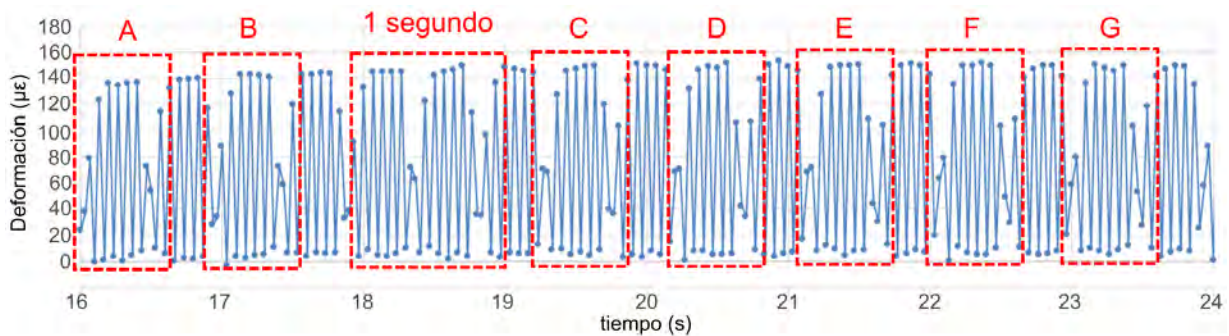


Figura 5.18: Detalles del espectro de deformación vs tiempo de la segunda prueba

En las mediciones de cargas alternantes se demostró que el banco de pruebas y el sistema de monitoreo pueden ser utilizados en conjunto para generar espectros de cargas cíclicos. Así mismo, se comprobó que el sistema es estable y que será posible determinar los parámetros del espectro de cargas empleando las mediciones obtenidas por el sistema de monitoreo. Finalmente, se puede concluir que el sistema de monitoreo es capaz de realizar mediciones de cargas estáticas y dinámicas lo que implica que puede ser usado para realizar ensayos de fatiga como se mostrará en la siguiente sección.

5.3.3 Cálculo de daño acumulado y fatiga

Durante las pruebas con cargas alternantes, el sistema de monitoreo fue empleado para realizar mediciones de deformación para distintas fuerzas. Además, los resultados más importantes que se obtuvieron durante estas pruebas fueron los gráficos de deformación vs tiempo. Es decir, se lograron obtener los espectros de cargas variables que son necesarios para determinar la durabilidad por fatiga de un material. En esta sección, se emplearán los resultados que se obtuvieron durante las pruebas de cargas alternantes para realizar una estimación de la durabilidad por fatiga. Así mismo, con el propósito de realizar este análisis, se empleará el gráfico S-N (curva de Wöhler) de la aleación de aluminio 6061-T6 que se muestra en la Figura 5.19. En este gráfico se puede observar que para este tipo de aluminio, los esfuerzos menores a 50 MPa no tienen una influencia significativa en la falla por fatiga de este material.

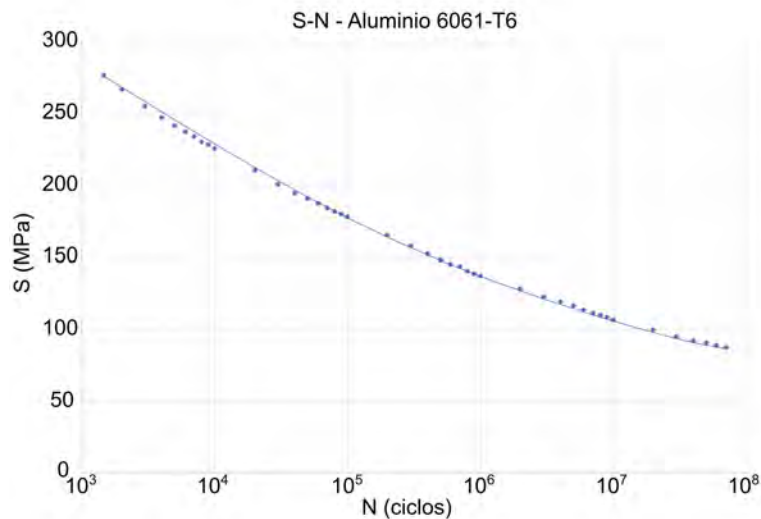


Figura 5.19: Curva S-N Aluminio 6061-T6 (adaptado de Rice et al. 2003)

La curva S-N que se muestra en la Figura 5.19, en principio, nos sirve para determinar el daño acumulado. Sin embargo, con el propósito de facilitar el análisis de la fatiga y el cálculo de daño acumulativo empleando la regla de Miner, se empleará el modelo lineal del diagrama S-N que se muestra en la Figura 5.20. Este gráfico se obtuvo a partir de la curva S-N original y el procedimiento para obtener este modelo fue descrito con detalle en la sección 2.1.3.

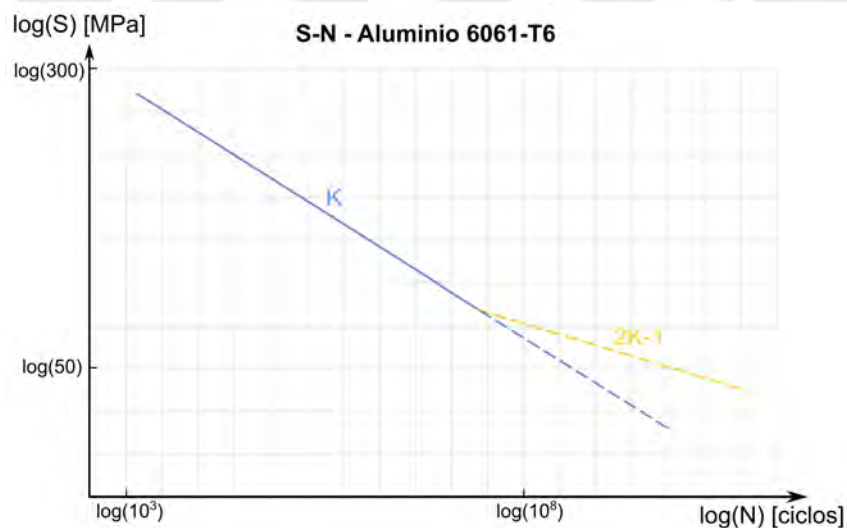


Figura 5.20: Gráfico S-N lineal de Aluminio 6061-T6

En la Figura 5.20 también se puede observar que existen dos rectas con distintos factores k . La recta con el factor k se emplea para determinar el daño acumulado empleando la teoría

de Miner modificada, mientras que la recta con el factor $2k - 1$ se emplea para determinar el daño empleando la teoría de Haibach. Ambas teorías se explican con mayor detalle en la sección 2.1.3 y para nuestro cálculo se empleará la recta correspondiente a la teoría de Miner modificada.

El gráfico de la curva S-N nos sirve para identificar la cantidad de ciclos en los que fallará un material sometido a una determinada carga. No obstante, debido a que estamos analizando cargas variables, también debemos entender las características de estas cargas. Por esta razón, es necesario identificar cuáles son los esfuerzos y, para este objetivo, se requiere analizar el espectro de cargas. En la Figura 5.21 se muestra una secuencia repetitiva del historial de cargas que se obtuvo durante los ensayos (el historial completo se muestra en las figuras 5.14 y 5.15). Es importante precisar que en la Figura 5.21 se muestra un gráfico del valor del esfuerzo σ vs el tiempo. Notar que la magnitud del esfuerzo fue determinada a partir de las deformaciones empleando la Ley de Hooke $\sigma = E\varepsilon$.

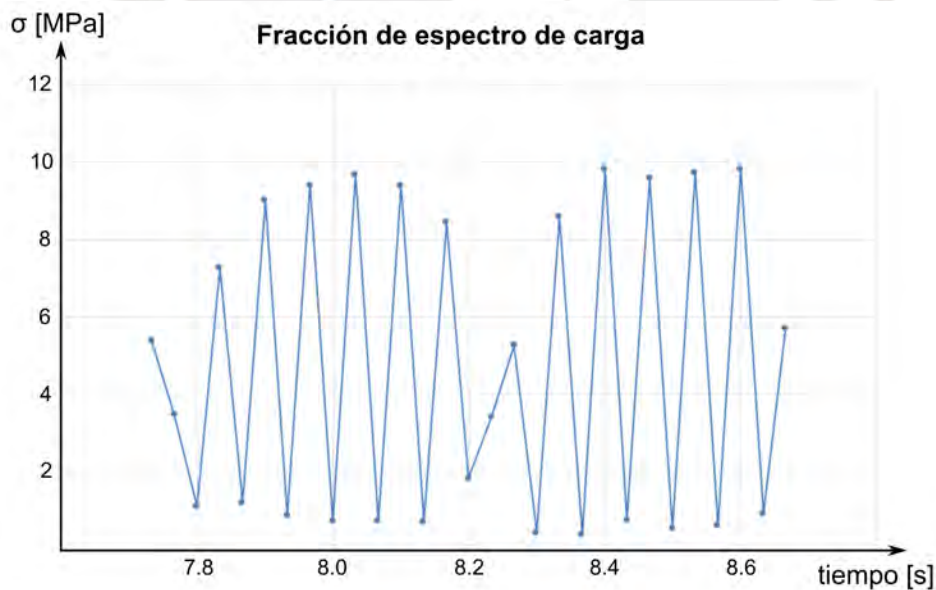


Figura 5.21: Espectro de cargas repetitivo

Finalmente, se debe determinar la cantidad de ciclos presentes en el espectro de cargas. Sin embargo, el espectro de cargas es de amplitud variable por lo que se requiere de métodos de conteo de ciclos. En la sección 2.2.1 se describen con detalle diversos métodos de conteo de ciclos incluyendo el método de *Rainflow*, que será el que emplearemos. Así mismo, es

importante notar que para realizar el método de conteo de ciclos de *Rainflow* se usó el procedimiento descrito en la normativa ASTM E1049-85 (ASTM 2017). En la Tabla 5.6 se muestran el resultado del conteo de ciclos de *Rainflow* y los valores que se requieren para determinar el porcentaje de daño acumulado y la fatiga.

Tabla 5.6: Conteo de ciclos de rainflow.

Numero de ciclos (N)	σ [Mpa]	$\log \sigma$ [Mpa]	$\log N_f$	N_f	$\frac{N}{N_f}$
0.5	4.27	0.630	20.03	1.07×10^{20}	4.66×10^{-21}
1	6.06	0.782	18.62	4.12×10^{18}	2.43×10^{-19}
0.5	7.90	0.898	17.54	3.48×10^{17}	1.44×10^{-18}
0.5	8.14	0.910	17.42	2.65×10^{17}	1.89×10^{-18}
0.5	8.52	0.930	17.24	1.73×10^{17}	2.88×10^{-18}
0.5	8.66	0.937	17.17	1.49×10^{17}	3.36×10^{-18}
0.5	8.94	0.951	17.04	1.11×10^{17}	4.51×10^{-18}
1	8.67	0.938	17.17	1.46×10^{17}	6.83×10^{-18}
1	3.43	0.535	20.92	8.27×10^{20}	1.21×10^{-21}
1	7.73	0.888	17.63	4.29×10^{17}	2.33×10^{-18}
1	8.14	0.911	17.42	2.63×10^{17}	3.81×10^{-18}
0.5	9.30	0.968	16.88	7.66×10^{16}	6.53×10^{-18}
1	8.81	0.945	17.10	1.27×10^{17}	7.88×10^{-18}
1	9.11	0.960	16.97	9.24×10^{16}	1.08×10^{-17}
1	9.27	0.967	16.89	7.84×10^{16}	1.28×10^{-17}
0.5	9.45	0.975	16.82	6.60×10^{16}	7.58×10^{-18}
0.5	8.90	0.949	17.06	1.15×10^{17}	4.34×10^{-18}
0.5	4.76	0.678	19.59	3.90×10^{19}	1.28×10^{-20}

A partir de los datos que se muestran en la Tabla 5.6, es posible determinar el daño acumulado empleando la ecuación 5.8 (los detalles sobre la derivación de esta ecuación se explican en la sección 2.1.3). Los valores de ciclos para la fatiga (N_f) se obtienen empleando la Figura 5.20, por lo que se debe usar el valor del logaritmo de los esfuerzos que también se muestra en la Tabla 5.6.

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{N_i}{N_{fi}} = \frac{N_1}{N_{f1}} + \frac{N_2}{N_{f2}} + \frac{N_3}{N_{f3}} + \dots + \frac{N_n}{N_{fn}} \quad (5.8)$$

Al reemplazar los datos (ver ecuación 5.9), se observa que el daño acumulado es 0. Así mismo, a partir de estos datos se puede determinar que este espectro de cargas no tendrá efectos en la fatiga de material por lo que no causará este tipo de falla, pues el porcentaje de daño causado por esta carga es prácticamente nulo (7.72×10^{-17}). Estos resultados tienen sentido pues el

esfuerzo máximo al que esta sometido la viga de aluminio durante el espectro es de 9.45 MPa, y en la curva SN del aluminio (ver figura 5.19) se muestra que para cargas inferiores a 50MPa la falla por fatiga se da a ciclos mucho mayores a 10^8 .

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{N_i}{N_{fi}} = \frac{0.5}{1.07 \times 10^{20}} + \frac{1}{4.12 \times 10^{18}} + \frac{0.5}{3.48 \times 10^{17}} + \dots + \frac{0.5}{3.90 \times 10^{19}} = 7.72 \times 10^{-17} \approx 0 \quad (5.9)$$

5.4 Pruebas complementarias

Es esta sección se describen pruebas complementarias de medición que fueron realizadas empleando el sistema de monitoreo. Aunque las pruebas con cargas estáticas y dinámicas sirven para mostrar que el sistema de monitoreo puede ser empleado para realizar mediciones en ensayos de fatiga, las pruebas complementarias ilustran detalles importantes sobre el sistema de medición que fue implementado. Se realizaron dos pruebas complementarias: la primera fue una prueba de medición de recipientes a presión, y la segunda, una prueba comparativa en un ensayo realizado por una máquina de ensayos universal Zwick-Roell.

5.4.1 Pruebas en un recipiente a presión

En la primera prueba complementaria se realizaron mediciones en recipientes sometidos a presión. Para lograr este objetivo, en esta prueba se instrumentaron *strain gauges* sobre la superficie de un tanque de gas de 10kg como se observa en la Figura 5.22a. Este tanque inicialmente se encuentra vacío y para medir cómo actúan las deformaciones en las paredes del recipiente cuando la presión interna varía, se conectó el tanque a un compresor de aire. Posteriormente, haciendo uso de este compresor se realizaron incrementos en la presión de forma controlada. Además, en la Figura 5.22b se muestran detalles de un segundo tanque que cuenta con dos *strain gauge* instrumentas. Este es un detalle importante, pues en este caso se probará que el sistema de monitoreo es capaz de realizar dos mediciones en simultáneo.

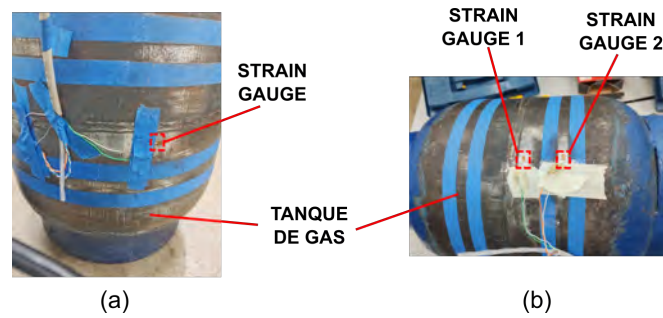


Figura 5.22: Disposición de las strain gauge en los recipientes a presión

Un resultado llamativo que se obtuvo durante el primer ensayo de medición en recipientes a presión se muestra en la Figura 5.23. En esta gráfica de deformación vs tiempo de una de las *strain gauges* se puede identificar la presencia de ruido eléctrico y esta es una perturbación externa al sistema que debe ser removida.

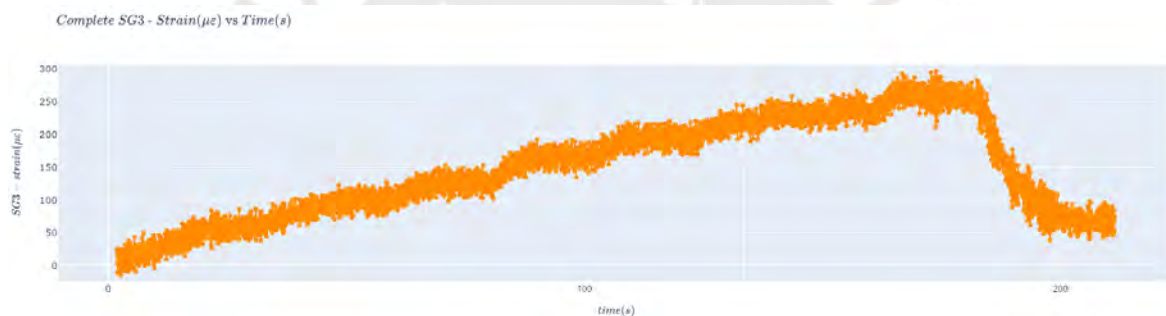


Figura 5.23: Gráfico de deformación vs tiempo del tanque con ruido

Eliminación del ruido en las pruebas en recipientes a presión

En la primera prueba de medición en recipientes a presión se observó que existe ruido eléctrico durante las mediciones. Por esta razón, es necesario proteger al sistema y a los sensores de las posibles fuentes que originan estas perturbaciones. En primer lugar, se protegieron las *strain gauges* instrumentadas en los tanques así como también los cables que las unen con el sistema de monitoreo. En segundo lugar, se protegieron los circuitos internos del sistema de monitoreo. Finalmente, se realizaron nuevamente las mediciones en los tanques y en la Figura 5.24 se observan los dispositivos y elementos que fueron usados durante esta prueba.



Figura 5.24: Elementos de la prueba en un recipiente a presión

En la Figura 5.24 es posible observar en la pantalla de la computadora a la interfaz gráfica del sistema de monitoreo en funcionamiento. Además, en este gráfico se puede observar que los efectos de ruido fueron removidos después de haber protegido de señales eléctricas externas a los sensores y a los circuitos del sistema de medición. Así mismo, para mostrar más detalles sobre la eliminación del ruido, en la Figura 5.25 se muestra una comparación gráfica de las pruebas de medición antes y después de proteger al sistema de monitoreo de estos efectos de perturbación externa. En la Figura 5.25a se muestra a la primera medición con ruido, notar que en este gráfico no es posible determinar de forma cuantitativa el valor de la deformación durante la prueba. Sin embargo, en la Figura 5.25b se muestra el gráfico de la segunda prueba sin efectos del ruido y, en esta imagen, es posible identificar con mayor detalle cómo la presión se incrementa de forma controlada. Por ejemplo, se puede observar que durante muchos tramos, la presión en el interior del tanque permanece constante y que aumenta hasta un pico. Finalmente, en la Figura 5.25b también se muestra que al descargar el tanque, el valor de deformación en las paredes del recipiente vuelve a cero. Es decir, vuelve al estado inicial, confirmando así que las mediciones se realizan dentro del rango lineal.

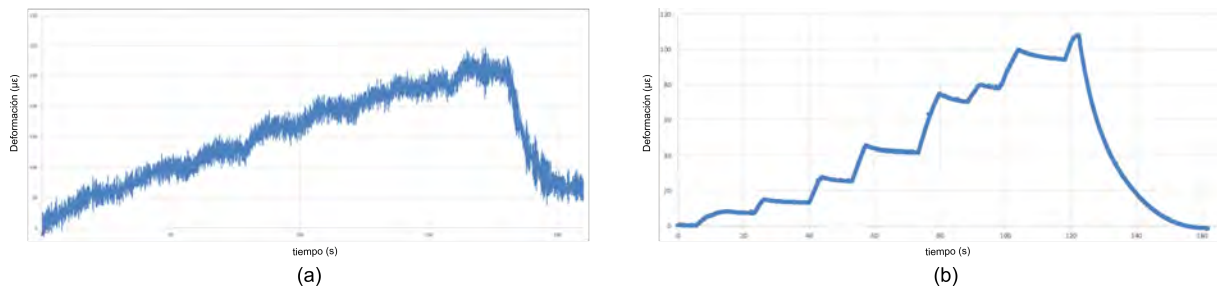


Figura 5.25: Gráfico de deformación vs tiempo del tanque sin ruido

En la Figura 5.26 se muestran los gráficos de las lecturas de dos *strain gauges* y se puede notar que el comportamiento de la deformación en las paredes del tanque es el mismo para ambos casos. Es decir, el sistema tiene la capacidad de realizar más de una lectura en simultáneo.



Figura 5.26: Gráfica deformación vs tiempo de dos strain gauge en un recipiente a presión

En conclusión, las pruebas en tanques a presión nos muestran dos características importantes del sistema de monitoreo: se encuentra protegido de efectos de ruido eléctrico y puede ser utilizado para realizar más de una lectura en simultáneo.

5.4.2 Prueba de comparación con una máquina de ensayos

El objetivo de esta prueba es realizar una evaluación cualitativa del funcionamiento del sistema de monitoreo. Para este fin se hizo una medición de la deformación durante una prueba realizada por una máquina de ensayos universal Zwick-Roell Z250. Este ensayo fue realizado sobre una

placa compuesta por dos materiales (acero y CFRP) y la disposición de los soportes, de las *strain gauges* y la fuerza que fue aplicada se muestran en la Figura 5.27.

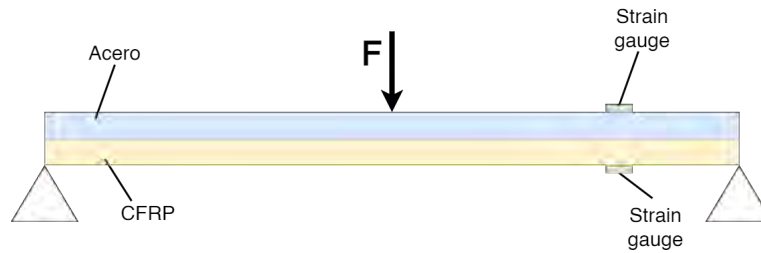


Figura 5.27: Gráfico de fuerzas y reacciones de la placa compuesta

Para realizar el ensayo sobre la placa se utilizó una máquina de ensayos Zwick/Roell Z250 que se muestra en la Figura 5.28a. Así mismo, la placa compuesta fue colocada en flexión de tres puntos y su posición en la máquina de ensayos se muestra en la Figura 5.28b.

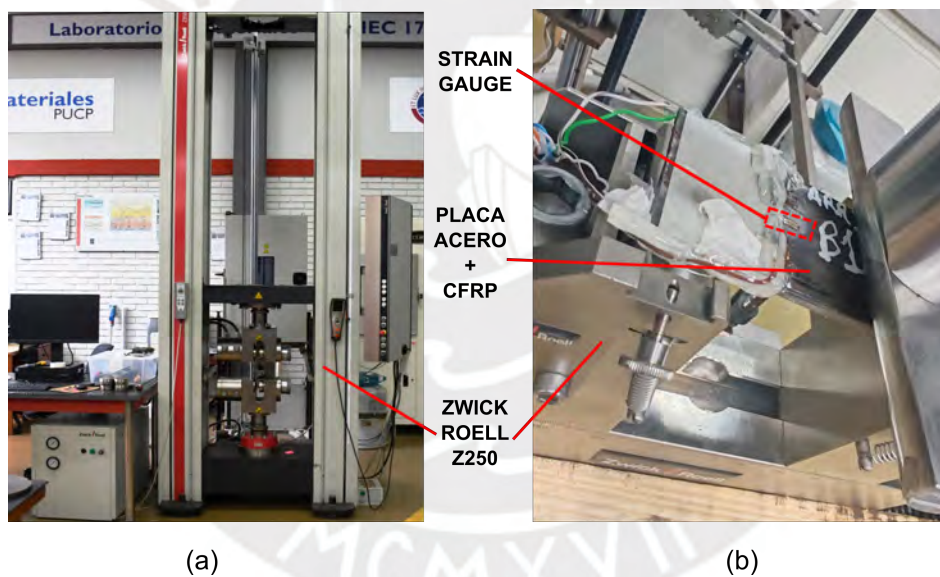


Figura 5.28: Máquina de tracción y ubicación de la placa compuesta

La ubicación del sistema de monitoreo y de la placa compuesta se muestran en la Figura 5.29. Además, el sistema medirá la deformación de dos *strain gauges* que se encuentran instrumentadas sobre ambas superficies de la placa (ver figura 5.27). Por esta razón, haciendo uso del sistema de monitoreo será posible obtener dos resultados: el gráfico de una curva de un ensayo de tracción y el gráfico de una curva de un ensayo a compresión. Notar que ambos gráficos se obtendrán durante un ensayo sometido a fuerzas cuasiestáticas.

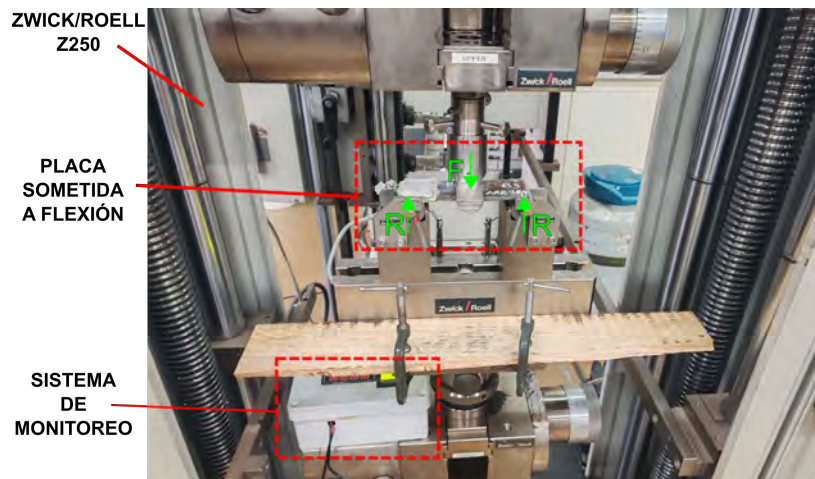


Figura 5.29: Partes del sistema del ensayo de tracción en la placa compuesta

A continuación se muestran los dos resultados obtenidos por el software del sistema de monitoreo. En la Figura 5.30a se muestra la deformación de la *strain gauge* que se encuentra a compresión mientras que en la Figura 5.30b se muestra la deformación de la *strain gauge* que se encuentra a tracción.

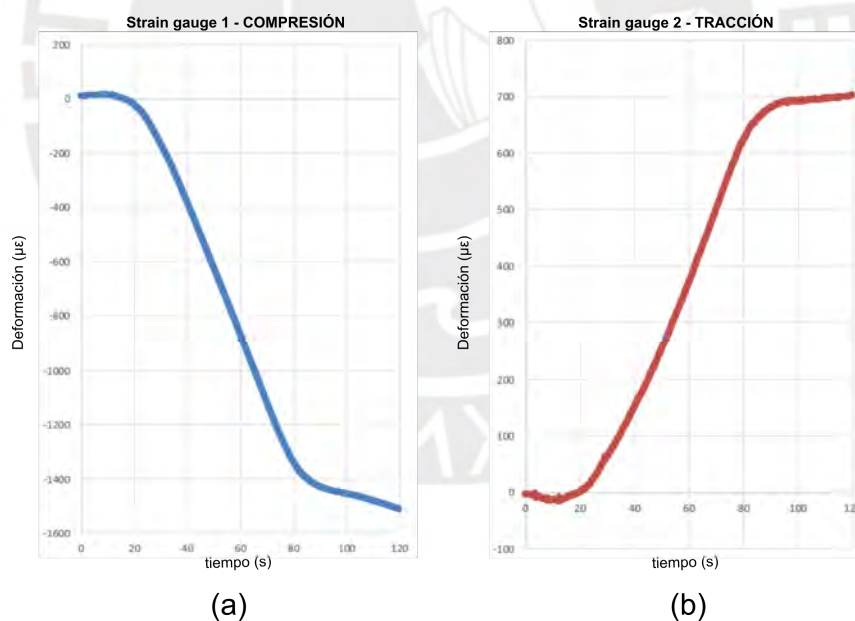


Figura 5.30: Gráficos del ensayo de tracción obtenidos por sistema de monitoreo

En ambas curvas de la Figura 5.30 se puede observar el mismo comportamiento pero en sentidos opuestos y esto es un comportamiento esperado debido a la posición de las *strain gauges*. Así mismo, es posible observar la linealidad durante un periodo de la medición de la deformación

hasta llegar a la ruptura de la placa. Es decir, el sistema de monitoreo puede ser empleado también en ensayos de tracción.



Figura 5.31: Comparación cualitativa entre los gráficos obtenidos por el software testXpert y la aplicación GUI del sistema de monitoreo

La máquina Zwick/Roell cuenta con el software testXpert que sirve como una aplicación de procesamiento e interfaz gráfica para mostrar la medición en tiempo real. Este es un aspecto importante a ser tomado en cuenta porque el objetivo de esta prueba es comparar cualitativamente los gráficos generados por la interfaz gráfica de testXpert y el software de interfaz gráfica (GUI) que fue desarrollado para el sistema de monitoreo. Por ello, esta comparación se observa en la Figura 5.31 donde se muestran fotografías de los dos ensayos de tracción. Es importante especificar que el software del sistema de monitoreo es multiplataforma y, que en las fotos, la interfaz gráfica se muestra en las pantallas de dispositivos móviles. Finalmente, en ambas imágenes es posible observar que los gráficos del ensayo de la figura 5.31a y de la figura 5.31b presentan las mismas características de las curvas mostradas en la interfaz gráfica del software testXpert. Un resultado más que significativo, pues confirma que los resultados obtenidos pueden ser comparados con los gráficos generados por una máquina de grado industrial.

CAPÍTULO 6

COSTOS

En este capítulo se realiza la estimación de los costos de diseño e implementación del sistema. En este cálculo se consideraron los componentes electrónicos y mecánicos, la fabricación, la programación y el diseño del sistema. Para esta estimación se considera que se fabricará un solo sistema de monitoreo de deformación.

6.1 Costos de elementos normalizados y dispositivos electrónicos

El sistema de monitoreo cuenta con uniones atornilladas y otros elementos de sujeción para fijar las placas de los circuitos. En la Tabla 6.1 se muestra una lista con la cantidad y el precio de las piezas que fueron empleadas. Debido a que la mayoría de estos elementos se compran en lotes que contienen más de una unidad, para algunos casos se muestra el precio del lote.

Tabla 6.1: Lista de elementos normalizados y otros elementos de sujeción.

Parte	Norma	Cantidad	Total (S/)
Tornillo M3x6	DIN 7985	16	7.00
Tuerca M3	DIN 934	16	10.00
Espaciador M3x25	-	4	4.00
Espaciador M3x5	-	6	4.00
Total			25.00

En la Tabla 6.2 se muestran los costos de todos los elementos electrónicos así como el costo del contenedor del panel de control. Así mismo, en el ítem "Otros componentes electrónicos" se incluyen a componentes pasivos como resistencias, cables y otros componentes similares que se usaron para la implementación de los circuitos del sistema de monitoreo.

Tabla 6.2: Lista de costos de componentes del sistema de monitoreo.

Componente	Cantidad	Costo unitario (S/)	Importación (S/)	Total (S/)
Módulo ADS1256	1	65.00	62.00	127.00
Strain gauge BF120-3AA	4	6.00	-	24.00
ESP32-DevKitC V4	1	40.00	-	40.00
Pantalla LCD 2004	1	40.00	-	40.00
LM7805	1	10.00	-	10.00
LED Dialight 559	3	8.00	40.00	64.00
Teclado matricial	1	5.00	-	5.00
Interruptor ON/OFF	1	1.50	-	1.50
Baterías 18650 3000mAh	2	43.00	-	86.00
Caja de paso IP55 180x140x80	1	46.90	-	46.90
Otros componentes electrónicos	1	20.00	-	20.00
			TOTAL	464.40

6.2 Costos del banco de pruebas

En la Tabla 6.3 se muestran los costos de los materiales y componentes necesarios para la implementación del banco de pruebas. Así mismo, en el costo de los perfiles que se usaron para la estructura del banco de pruebas también se incluye el valor del trabajo de corte. Adicionalmente, en el ítem "otros componentes electrónicos" se incluyen componentes como cables, transistores, entre otros, que se usaron en el sistema eléctrico del banco de pruebas. Finalmente, para el ensamblaje del banco de pruebas se consideraron cinco horas de trabajo (S/30 por hora).

Tabla 6.3: Costos del banco de pruebas.

Elemento	Cantidad	Costo unitario (S/)	Importación (S/)	Total (S/)
Perfil V-SLOT 2040 50cm	2	55.00	-	110.00
Perfil V-SLOT 2040 25cm	4	30.00	-	120.00
Perfil V-SLOT 2040 60cm	2	60.00	-	120.00
Perfil V-SLOT 2040 30cm	2	35.00	-	70.00
8 pernos tipo socket M5x6	1	10.00	-	10.00
8 tuercas T M5	1	12.00	-	12.00
Conector interior en L para V-SLOT	36	3.00	-	108.00
4 mordazas tipo U	1	36.00	64.00	100.00
Caja de paso IP55 100x100x70	1	10.00	-	10.00
Interruptor ON/OFF	1	1.50	-	1.50
Solenoide JF-0630B	2	25.00	-	50.00
Microcontrolador ATTINY85	1	15.00	-	15.00
Fuente switching de 12V - 72W	1	25.20	-	25.20
Otros componentes electrónicos	1	20.00	-	20.00
Ensamblaje del banco de pruebas	-	150.00	-	150.00
			TOTAL	921.70

6.3 Costos de fabricación

En la Tabla 6.4 se muestran los costos de fabricación de los circuitos empleados en el sistema de monitoreo. En total se fabricaron dos placas de circuitos y para el costo de la soldadura y montaje de estos componentes en el panel de control se consideraron 4 horas de trabajo (\$/30 por hora) para cada una de estas labores respectivamente.

Tabla 6.4: Costos de fabricación y montaje.

Descripción	Total (S/)
Soldadura de placas (x2)	120.00
Montaje de placas soldadas	120.00
Total	240.00

6.4 Costos del servidor

En la Tabla 6.5 se muestra el costo del servidor del sistema de monitoreo. Se empleará un servidor compartido de 4GB, 40GB de almacenamiento y transferencia de 20TB (Hetzner 2025). Notar que el precio que se considera para el servidor en esta estimación corresponde a tres meses de uso.

Tabla 6.5: Costos de fabricación y montaje.

Descripción	Total (S/)
Servidor (x 3 meses)	57.00
Total	57.00

6.5 Costos de diseño y programación

Debido a que no solamente se diseñó el sistema de monitoreo, sino también se realizó la implementación de este, se estimaron tanto el costo de diseño y el costo de programación. Para

el costo de diseño se estimó un trabajo de 80 horas hombre (esto también incluye el diseño de software) y para la programación del software también se estimó un trabajo de 80 horas hombre. En la Tabla 6.6 se muestran el costo por hora y el costo total para estos procesos.

Tabla 6.6: Costos de diseño y programación.

Descripción	S/ x hora	Horas	Costo total (S/)
Diseño	50.00	80	4000.00
Programación	60.00	80	4800.00

6.6 Costo total

Finalmente después de determinar los costos parciales, se estima el costo total del proyecto. En la Tabla 6.7 se muestran cada uno de los items considerados para determinar el valor final del sistema de monitoreo. Notar que el costo de programación y diseño también se consideran en esta estimación final.

Tabla 6.7: Costo total del sistema de monitoreo.

Descripción	Costo (S/)
Elementos normalizados	25.00
Componentes	464.40
Costos de fabricación y montaje	240.00
Costos de diseño	4000.00
Costos del servidor	57.00
Costo de programación	4800.00
Total	9586.40

Finalmente, debido a que se implementó un banco de pruebas durante el desarrollo de este trabajo, en la Tabla 6.8 se muestra también una estimación total incluyendo el valor del banco de pruebas.

Tabla 6.8: Costo total del sistema de monitoreo incluyendo el banco de pruebas

Descripción	Costo (S/)
Elementos normalizados	25.00
Componentes	464.40
Costos de fabricación y montaje	240.00
Banco de pruebas	921.70
Costos de diseño	4000.00
Costos del servidor	57.00
Costo de programación	4800.00
Total	10508.10



CONCLUSIONES

En el presente documento se mostró no solamente el diseño, sino también la implementación de un sistema de adquisición de datos de deformación. Este es un aspecto importante a resaltar, pues el proceso de implementación de un sistema sirve para validar las consideraciones que fueron asumidas durante la etapa de diseño. Finalmente, este proceso de convertir la abstracción en un producto final es la esencia fundamental de la ingeniería y es lo que la diferencia de otras áreas de las ciencias exactas. Por esta razón, a continuación se presentan las conclusiones sobre el desarrollo del sistema de monitoreo, su importancia y el posible trabajo futuro a realizar.

- El objetivo original de diseñar e implementar un sistema de monitoreo en tiempo real para ensayos de fatiga fue cumplido. Se diseñó e implementó un sistema de monitoreo que también incluye un software y es capaz de funcionar no solamente en ensayos con cargas alternantes, sino también en otros casos en los que se requiera de medir la deformación.
- Durante las pruebas de medición se mostró que el sistema de monitoreo implementado es capaz de medir la deformación con una precisión de $\pm 8\mu\varepsilon$, lo que permite obtener esfuerzos con una precisión $\pm 1\text{MPa}$. Este es un resultado importante, pues en el mercado existen sistemas de medición educativos que poseen una precisión $\pm 10\mu\varepsilon$ (MicroMeasurements 2014). Esto demuestra que es posible diseñar un sistema de medición de alta precisión usando como referencia el diseño planteado en esta tesis.
- El sistema de monitoreo de medición de deformación que fue desarrollado es compacto y versátil. Por ejemplo, durante las pruebas complementarias fue utilizado para medir la deformación en recipientes a presión. Es decir, puede ser implementado en distintos entornos. Además, fue usado también en conjunto con una máquina Zwick-Roell durante un ensayo de flexión y se pudo verificar que el sistema de monitoreo es una alternativa de bajo costo, pues muestra resultados similares a los de un equipo de laboratorio. Por lo

tanto, se puede concluir que el sistema de monitoreo puede ser empleado para cualquier otro caso en el que se requiera de la medición de deformaciones.

- El sistema de monitoreo de medición de deformación es inalámbrico. Es decir, el dispositivo implementado puede ser integrado a sistemas de monitoramento remoto y también incluido en infraestructuras de redes de sensores de medición previamente existentes.
- El software que fue desarrollado en conjunto con el sistema de monitoreo es multiplataforma por lo que sirve para mostrar mediciones de deformación en diversos sistemas operativos y esto también incluye a dispositivos móviles. Por esta razón, el sistema de medición inalámbrico también podría ser utilizado para aplicaciones *IoT* en el futuro.
- La medición de la deformación nos permite obtener de forma indirecta otras magnitudes como los esfuerzos y la fuerza. Este aspecto en conjunto con la interfaz gráfica multiplataforma convierten al sistema de monitoreo en un dispositivo perfecto para aplicaciones de ciencias de los datos. Por ejemplo, en el futuro el sistema podría ser empleado para aplicaciones de *big data* y *machine learning* relacionados con la predicción de fatiga de los materiales.

BIBLIOGRAFÍA

- ADMET (2024). eXpert 9300 Series. Consultado el 2024-10-05, <https://www.admet.com/wp-content/uploads/eXpert-9300-Rotating-Beam-Fatigue-1.pdf>.
- ASTM (2017). *ASTM E1049-85 Standard Practices for Cycle Counting in Fatigue Analysis*. West Conshohocken, PA, USA: ASTM.
- Berger, Christiane (2002). Betriebsfestigkeit in Germany. *International Journal of Fatigue*. No 6, pp. 603-625. doi: 10.1016/S0142-1123(01)00180-3.
- Bhandari, VB (2010). *Design of Machine Elements*. New Delhi, India: McGraw-Hill.
- Fatemi, Ali and Yang, L. (1998). Cumulative fatigue damage and life prediction theories: a survey of the state of the art for homogeneous materials. *International Journal of Fatigue*. No 1, pp. 9-34. doi: 10.1016/S0142-1123(97)00081-9.
- Figliola, Richard S. and Beasley, Donald E (2019). *Theory and Design for Mechanical Measurements*. Hoboken (NJ), USA: John Wiley & Sons.
- Haibach, Erwin (2006). *Betriebsfestigkeit*. Berlin, Germany: Springer.
- Hetzner (2025). Shared Server Prices. Consultado el 2025-02-20, <https://www.hetzner.com/cloud/>.
- Janiszewski, Piotr (2023). Librería Rainflow versión 2.1.2 (código fuente). Consultado el 2024-02-07, <https://github.com/iamlikeme/rainflow>.
- Kondo, Yoshiyuki (2003). Fatigue Under Variable Amplitude Loading. *Comprehensive Structural Integrity*. No , pp. 253-279. doi: 10.1016/B0-08-043749-4/04029-5.
- Lee, Yung-Li and Pan, Jwo and Hathaway, Richard B. and Barkey, Mark E. (2004). *Fatigue Testing and Analysis: Theory and Practice*. Burlington (MA), USA: Elsevier Butterworth-Heinemann.
- Micro Measurements (2014). MultiDAQ Data Acquisition Device. Consultado el 2025-02-10, <https://docs.micro-measurements.com/?id=5921>.
- MicroMeasurements (2016). Precision Strain Gages and Sensors Databook. Consultado el 2024-02-18, <https://docs.micro-measurements.com/?id=4079>.

- Pook, Les (2007). *Metal Fatigue: What It is, Why It Matters*. London, UK: Springer.
- Rice, R. C. and Jackson, J. L. and Bakuckas, J. and Thompson, S. (2003). *Metallic Materials Properties*. Consultado el 2025-02-10, <https://ntrl.ntis.gov/NTRL/dashboard/searchResults/titleDetail/PB2003106632.xhtml>.
- Schijve, Jaap (2009). *"Fatigue Tests" in Fatigue of Structures and Materials*. Delft, The Netherland: Springer.
- Sonsino, C. (2004). Principles of Variable Amplitude Fatigue Design and Testing. *Journal of ASTM International*. No 10, pp. 1-21. doi: 10.1520/STP11294S.
- Stephens, Ralph I. and Fatemi, Ali and Stephens, Robert R. and Fuchs, Henry O. (2001). *Metal Fatigue in Engineering*. Toronto, Canada: John Wiley & Sons.
- Suresh ,S. (2004). *Fatigue of Materials*. New York, USA: Cambridge University Press.
- Tequipment (2024). SM1090 Rotating Fatigue Machine. Consultado el 2024-02-06, <https://tecsolutions.us/sites/default/files/spec-sheets/SM1090-Rotating-Fatigue-Machine-Datasheet.pdf>.
- Wulpi, Donald J. (2013). *Understanding How Components Fail*. Ohio, USA: ASM International.
- Zwick/Roell (2023). Control Cube product information. Consultado el 2024-02-06, https://www.zwickroell.com/fileadmin/content/Files/SharePoint/user_upload/PI_EN/03_704_Control_Cube_servo_controller_and_Cubus_testing_software_PI_EN.pdf.
- Zwick/Roell (2024). Product Information - LTM 1 and LTM 1 HR electro-dynamic testing machine. Consultado el 2024-10-05, https://www.zwickroell.com/fileadmin/content/Files/SharePoint/user_upload/PI_EN/15_765_LTM1_and_LTM1HR_PI_EN.pdf.

ANEXO A: Descripción de requerimientos

El sistema de monitoreo debe estar compuesto por un subsistema de adquisición y procesamiento de datos y un software de interfaz gráfica GUI. A continuación se describen los requerimientos del sistema en general y de los subsistemas de adquisición y procesamiento de datos.

Requerimientos del sistema en general

- **Función principal**

La función principal del sistema es determinar los gráficos de esfuerzo (σ) vs ciclos(n) de una probeta sometida a un ensayo de fatiga de amplitud variable.

- **Geometría**

El sistema de monitoreo debe ser compacto y de un tamaño que permita su fácil acoplamiento a una máquina de ensayos; por esta razón, se determinó que sus dimensiones no deben ser mayores a 200mm x 200mm x 100mm.

- **Energía**

Para energizar los dispositivos electrónicos se emplearan baterías de litio. El voltaje proporcionado por las baterías será acondicionado para energizar y garantizar el funcionamiento adecuado de cada componente.

- **Señales de entrada**

El dispositivo debe contar con una señal de encendido/apagado y una señal de inicio de medición. Así mismo, el sistema debe contar con parámetros iniciales para la configuración del sistema: velocidad de adquisición de datos(*data rate*), ganancia y los parámetros necesarios para una comunicación inalámbrica.

- **Señales de salida**

El sistema de monitoreo mostrará como salida una gráfica que muestre los datos de una curva S-N y los datos del porcentaje de daño acumulado. Así mismo, mostrará dos señales adicionales: una de estas servirá para indicar si el sistema se encuentra energizado, y la otra señal, mostrará si el sistema se encuentra realizando mediciones o se encuentra en modo de espera.

Requerimientos del sistema de adquisición de datos

El sistema de adquisición debe capturar los datos de deformación de la probeta durante el ensayo de fatiga. Con el propósito de realizar este objetivo, el sistema debe contar con una conexión directa a través de cables a los sensores de deformación. Así mismo, los sensores deberán estar conectados a un circuito de acondicionamiento que posteriormente enviará los datos recolectados al dispositivo que se empleará para el procesamiento de datos.

- **Electrónica**

- Se emplearán sensores para medir la deformación en la probeta.
- Las señales obtenidas de la deformación deben ser acondicionadas y para ello se empleará un circuito de acondicionamiento, un módulo de amplificación y un conversor analógico-digital.

- Para el control del sistema se empleará un microcontrolador que permita comunicación inalámbrica.
- De ser posible, los sensores, los circuitos de acondicionamiento y demás dispositivos electrónicos deben estar disponibles en el mercado local.
- **Uso**
 - El sistema de monitoreo debe tener una autonomía de funcionamiento no menor a 4 horas de duración.
 - El sensor de deformación debe ser colocado en la probeta de forma segura y debe permanecer adherido a esta durante todo el ensayo.
- **Comunicación**
 - La comunicación entre los sensores de deformación y el sistema de monitoreo debe ser mediante una conexión física (cables).
 - El sistema de monitoreo transmitirá los datos de deformación de forma inalámbrica hacia un servidor.

Requerimientos del sistema de procesamiento de datos

El sistema de procesamiento de datos estará compuesto a su vez por un subsistema que procesa los datos obtenidos y un subsistema que muestra los datos al usuario mediante una interfaz gráfica (GUI).

- **Uso**

Los componentes electrónicos y el procesador deben ser albergados y protegidos dentro de un módulo.
- **Electrónica**

Los datos de los sensores inicialmente deben ser procesados empleando un dispositivo de propósito específico y no por una computadora.
- **Procesamiento de datos**
 - Se debe implementar un algoritmo o modelo ya desarrollado para la obtención de los datos requeridos.
- **Software**
 - Los datos deben ser mostrados en una interfaz gráfica (GUI).
 - El software debe ser compatible con Windows, Linux y MacOS.
 - De ser posible, el software debe contar con un manual de uso.
- **Comunicación**
 - La comunicación entre el dispositivo de procesamiento de datos y el periférico de salida será mediante una conexión inalámbrica.

- **Ergonomía**

- El sistema de monitoreo debe contar con un panel de control simple y que permita la rápida identificación de los botones.
- Los datos deben ser mostrados por un periférico de salida que permita al usuario observar los resultados y gráficos de forma adecuada.
- La interfaz gráfica deberá mostrar la información obtenida de forma clara y ordenada para que el usuario pueda acceder a la interfaz usando una sola mano.



ANEXO B: Descripción de la estructura de funciones

Mecánica

En la parte mecánica del sistema de monitoreo se incluyen a todos los componentes que forman parte de la estructura del sistema de monitoreo (ver figura B.1)

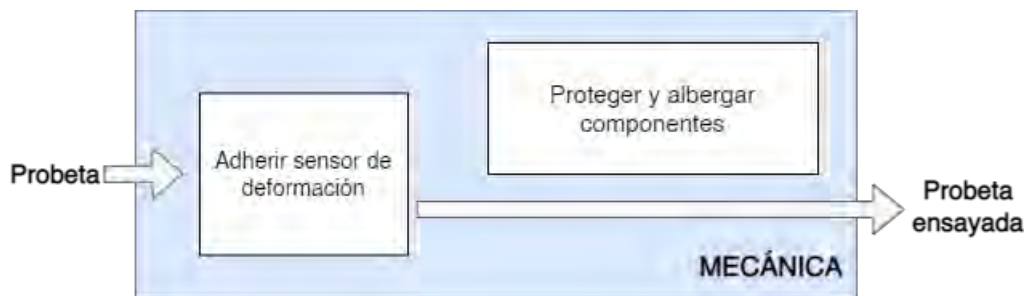


Figura B.1: Parte mecánica de la estructura de funciones.

Adherir sensor de deformación

En esta función se considera que un sensor de deformación debe ser adherido sobre una probeta que será sometida a un ensayo de fatiga hasta que se fracture. Por esta razón, se debe garantizar que el sensor siempre permanezca adherido a la probeta para que no se interrumpa el ensayo. Así mismo, los datos sensados de deformación deben ser transmitidos al procesador tomando en cuenta estas condiciones.

Proteger y albergar componentes

Todos los dispositivos electrónicos y el panel de control deben ser albergados y protegidos del ambiente con el fin de permitir que el usuario interactúe con el sistema de forma segura. Además, la protección es de suma importancia para evitar interferencias de señales externas en el sistema de monitoreo.

Energía

En la parte de energía del sistema se consideran a las funciones relacionadas con el acondicionamiento de voltaje que debe ser realizado para energizar a todos los dispositivos o componentes eléctricos del sistema de monitoreo (ver figura B.2)

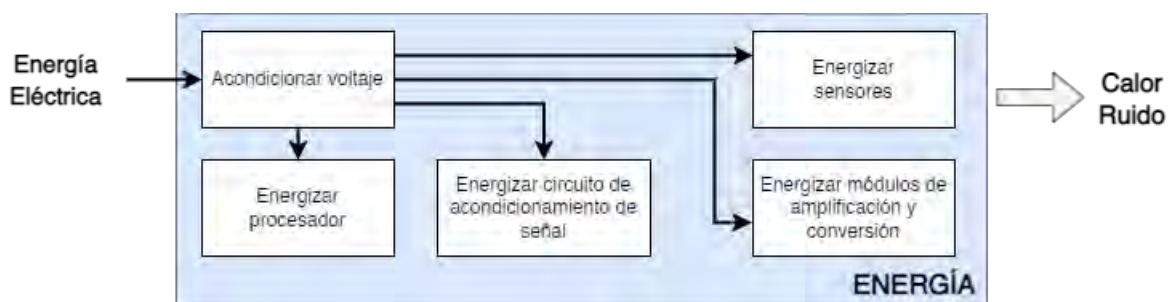


Figura B.2: Parte de energía de la estructura de funciones.

Acondicionar voltaje

El dispositivo se alimentará con energía eléctrica que podría ser de una fuente de 220V/60Hz o de una batería. Por esta razón, el voltaje debe ser acondicionado o regulado con el fin de ser empleado con los sensores, módulos y el dispositivo de procesamiento.

Energizar procesador, circuitos de acondicionamiento, sensores y módulos

Después de acondicionar el voltaje, se energizan todos los componentes eléctricos/electrónicos del sistema de monitoreo: sensores, módulos y el dispositivo de procesamiento.

Sensores

En la parte de sensores del sistema se incluye a todos los sensores presentes en el sistema de monitoreo. Para nuestro caso se usaran sensores de deformación (ver figura B.3).

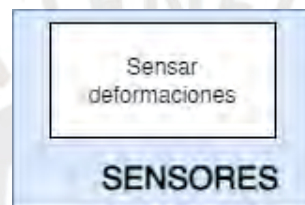


Figura B.3: Parte de sensores de la estructura de funciones.

Sensar deformaciones

Se capturan los datos de deformación de la probeta durante todo el ensayo de fatiga. Debido a la característica de estos sensores, usualmente se requieren de etapas de acondicionamiento de señal, amplificación y conversión antes de transmitir estos datos para su procesamiento. La toma de datos se inicia a través de una señal recibida del panel de control.

Amplificación y conversión

En esta etapa primero se acondiciona la señal capturada por el sensor, se amplifica, y posteriormente, se convierte para que los datos capturados puedan ser procesados (ver figura B.4).



Figura B.4: Parte de amplificación y conversión de la estructura de funciones.

Acondicionar señal del sensor

Se reciben los datos de deformación y luego se acondiciona la señal para que pueda ser amplificada. Este proceso requiere de un circuito de acondicionamiento que depende del tipo de sensor de deformación.

Amplificar y convertir la señal del sensor

La señal acondicionada se amplifica durante esta etapa. Posteriormente la señal analógica debe ser convertida a una señal digital. Finalmente, la señal medida puede ser procesada.

Comunicación

En la etapa de comunicación se transmiten los datos capturados de los sensores del sistema. Por ello, es necesario primero establecer una configuración inicial antes de enviar los datos. La transmisión de estos datos se realizará de forma inalámbrica (ver figura B.5)

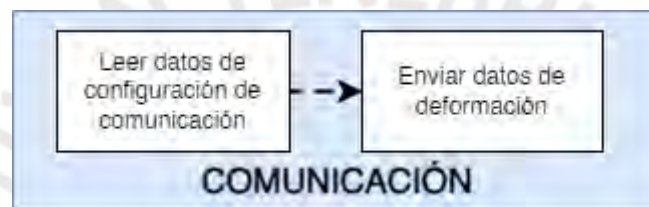


Figura B.5: Parte de comunicación de la estructura de funciones.

Leer datos de configuración de comunicación

Es necesaria una configuración inicial para determinar cómo y a donde se enviarán los datos. Por ello, durante esta etapa primero se realiza la configuración necesaria para enviar los datos.

Enviar datos de deformación

Los datos de deformación deben ser enviados tomando en cuenta las características del ensayo: el sensor estará adherido a una probeta durante todo el ensayo de fatiga. Por este motivo, el protocolo de comunicación a emplear debe ser estable y permanecer activo durante todo el ensayo.

Procesamiento de la señal

En la etapa de procesamiento se reciben los datos de voltaje digitalizados, luego se procesa la señal para convertirla en valores de deformación. Finalmente, se ordenan los datos de deformación para poder ser enviados al algoritmo de procesamiento (ver figura B.6)

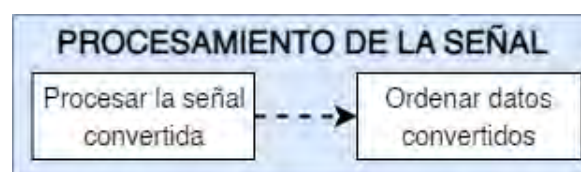


Figura B.6: Parte del procesamiento de la señal de la estructura de funciones.

Procesar la señal convertida

Se reciben los datos de voltaje digitalizados para que posteriormente sean convertidos a valores de deformación. La información de la deformación se obtiene en función al valor de voltaje digitalizado (ver sección 4.1.1).

Ordenar datos convertidos

Después de obtener los valores de la deformación, deben ser ordenados y agrupados con el tiempo en el que fueron capturados. Una vez ordenados pueden ser enviados al algoritmo de procesamiento.

Actuadores

En el dispositivo solo se emplearan actuadores para mostrar el estado y/o alertas de la máquina al usuario(ver figura B.7)

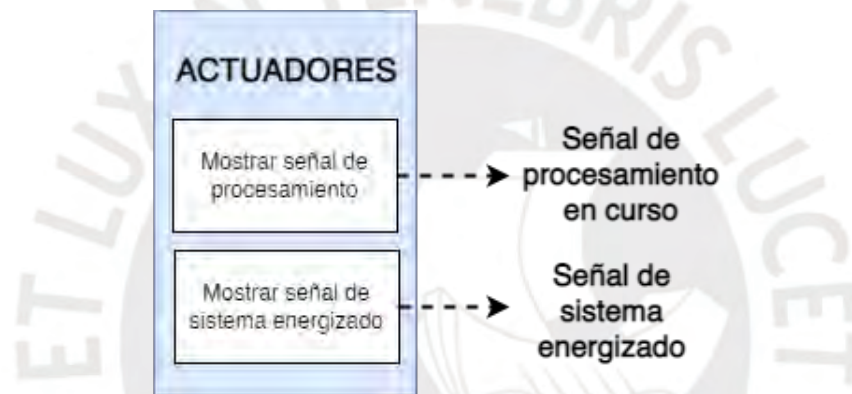


Figura B.7: Parte de los actuadores de la estructura de funciones.

Mostrar señal de procesamiento

Muestra una señal al usuario que le indica que la medición se encuentra en progreso.

Mostrar señal de energizado

Muestra una señal al usuario que le indica que el sistema se encuentra energizado.

Panel de control

Las funciones del panel de control muestran cómo el usuario interactuará con el dispositivo de monitoreo (ver figura B.8).

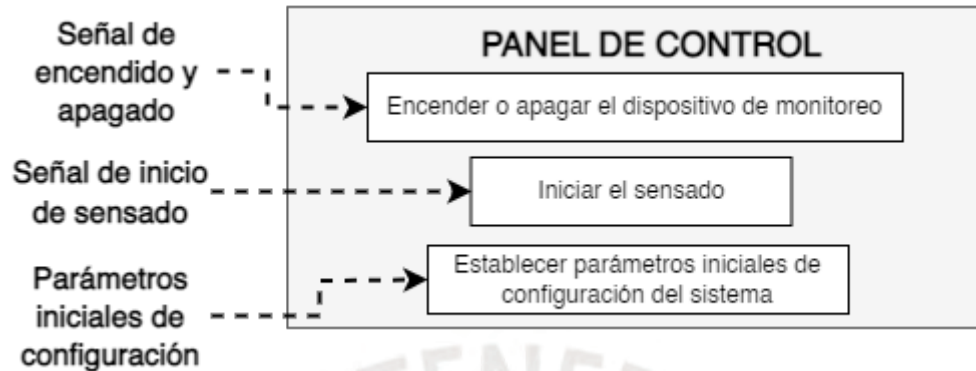


Figura B.8: Parte del panel de control de la estructura de funciones.

Encender o apagar el dispositivo de monitoreo

Se enciende o se apaga el dispositivo de monitoreo.

Iniciar el sensado

Se inicia la toma de datos de los sensores. Esta señal es enviada simultáneamente a todos los sensores del sistema de monitoreo.

Establecer parámetros iniciales de configuración del sistema

Se establecen todas las variables de configuración inicial del sistema. Estas variables están relacionadas con el sensor y con la comunicación de datos. Por ello, el usuario inicialmente deberá configurar estos parámetros a través del panel de control.

Algoritmo y visualización de datos

En la sección del algoritmo y la visualización de datos se incluyen a las funciones relacionadas con el cálculo del daño acumulado y la interfaz gráfica (GUI) que mostrará los datos y gráficos al usuario (ver figura B.9)

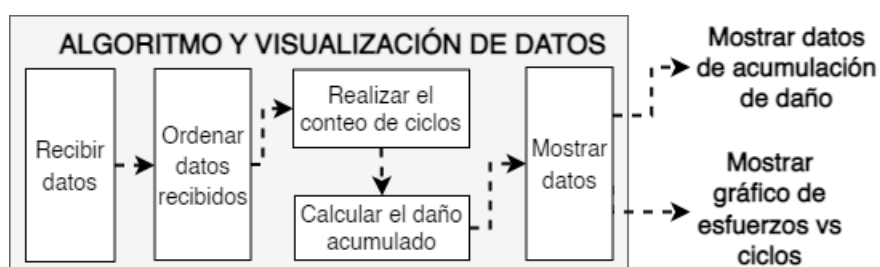


Figura B.9: Parte del algoritmo y visualización de datos de la estructura de funciones.

Recibir datos

Se reciben los datos de deformación.

Ordenar datos

Los datos, después de ser procesados, se ordenan para poder ser convertidos a magnitudes de esfuerzo.

Realizar el conteo de ciclos

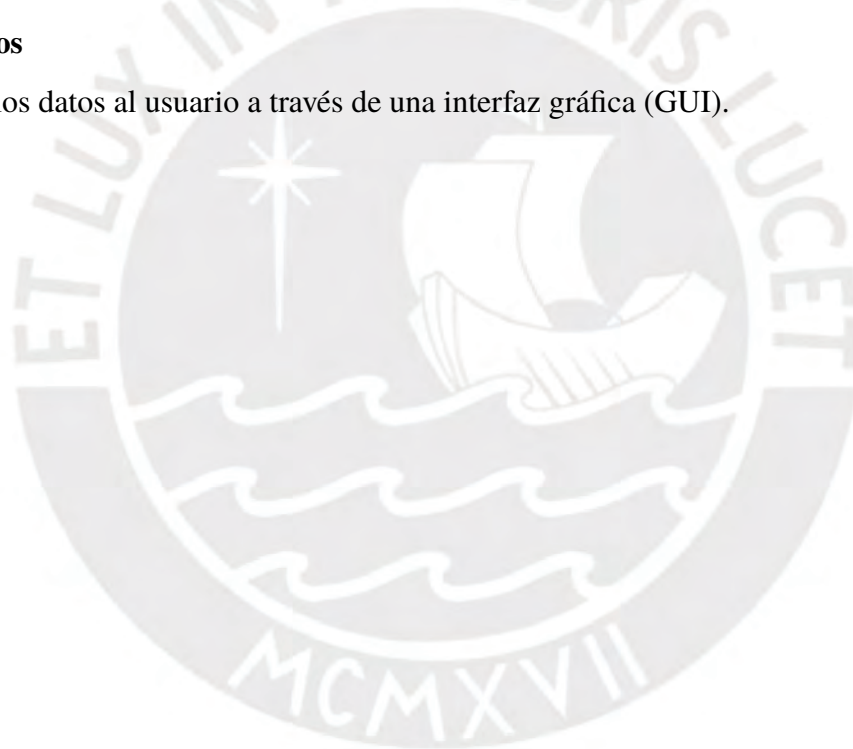
Se emplea un algoritmo para realizar el conteo de ciclos del historial de cargas.

Calcular el daño acumulado

Se emplea un diagrama de esfuerzo(σ) vs ciclos(N), se obtienen los esfuerzos a través de los datos de deformación y se emplean estos datos para generar datos del daño acumulado.

Mostrar datos

Se muestran los datos al usuario a través de una interfaz gráfica (GUI).



ANEXO C: Evaluación de conceptos de solución

Primer concepto de solución

Adquisición y transmisión de datos. En el primer concepto de solución (ver figura C.1) la deformación se medirá empleando *strain gauges* y los datos adquiridos por estos sensores se transmitirán de forma inalámbrica a un servidor. Los *strain gauges* serán adheridos a la zona crítica de la probeta y luego serán conectados mediante cables a un módulo que alojará a otros componentes (ver figura C.2). Este módulo será fijado a la estructura de la máquina y estará compuesto por los siguientes componentes: un circuito de acondicionamiento, un amplificador, un convertor analógico digital, un microcontrolador, un módulo Bluetooth para la transmisión inalámbrica y será alimentado por una batería (ver figura C.3).

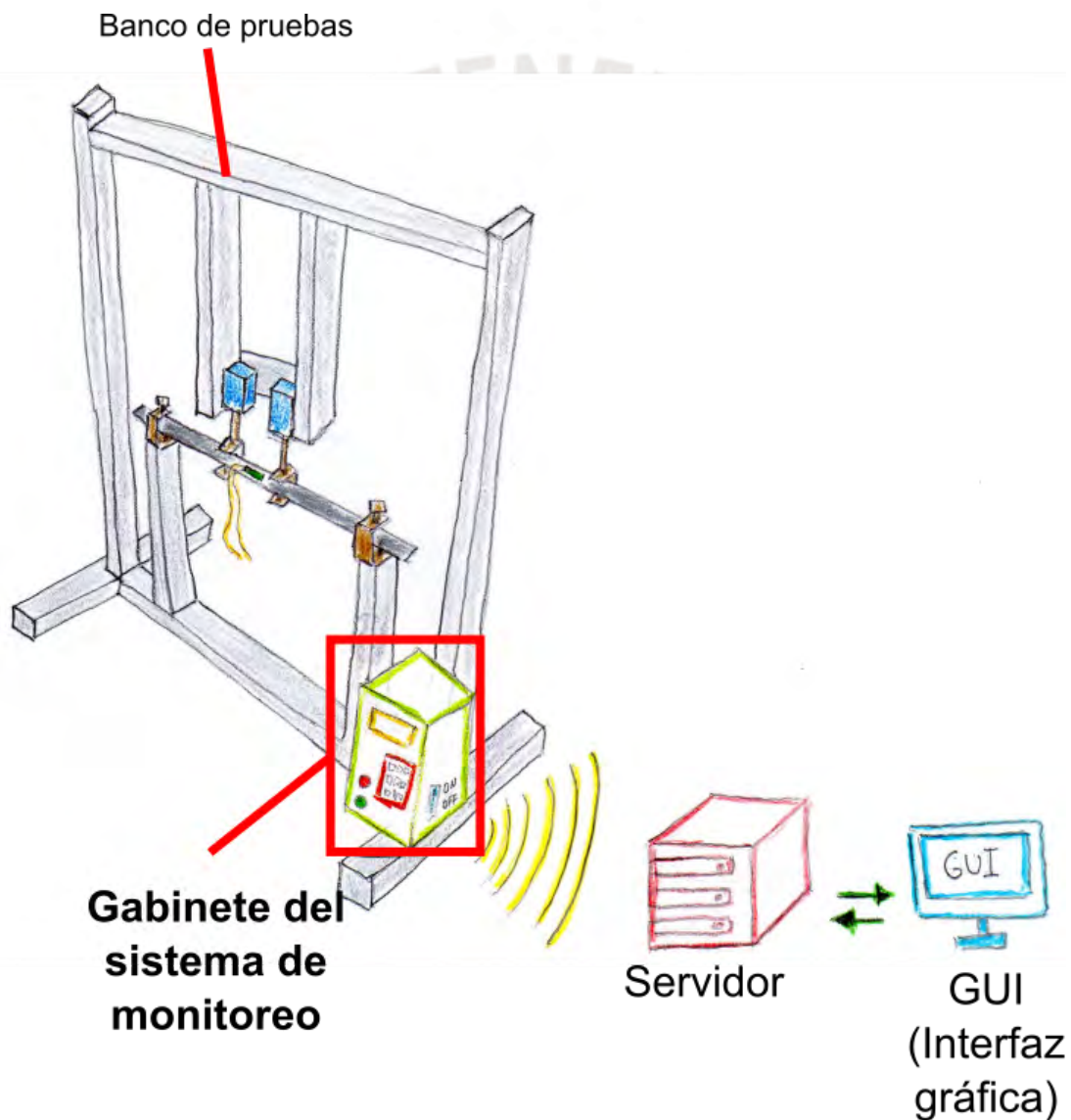


Figura C.1: Sistema de monitoreo y banco de pruebas.

Procesamiento de datos. Los datos serán enviados a un servidor que estará alojado en una computadora. Notar que todos los datos capturados por los sensores primero serán almacenados de forma temporal en el microcontrolador y luego serán enviados a la computadora (servidor) en la que se empleará el lenguaje de programación Python para mostrar los resultados del ensayo.



Figura C.2: Concepto de solución 1 - conexión entre el sistema de monitoreo y la probeta.

Panel de control. Los componentes del panel de control (pulsadores e indicadores), el microcontrolador, las fuente de voltaje, los circuitos de acondicionamiento, amplificación y conversión estarán alojados en un case que también estará fijo a la máquina (ver figura C.3).

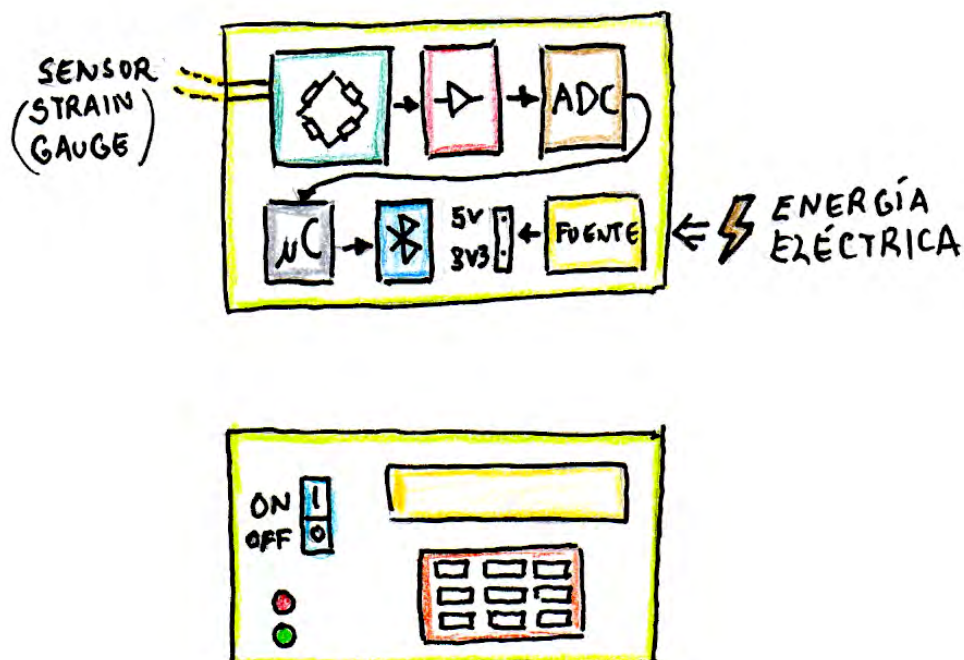


Figura C.3: Concepto de solución 1 - panel de control.

Segundo concepto de solución

Adquisición y transmisión de datos. En el segundo concepto de solución el servidor se encuentra dentro del sistema de monitoreo (ver figura C.4) y la deformación se medirá empleando *strain gauges* uniaxiales. Los *strain gauges* serán adheridos a la zona crítica de la probeta y luego serán conectados mediante cables al contenedor del panel de control (ver figura C.5).

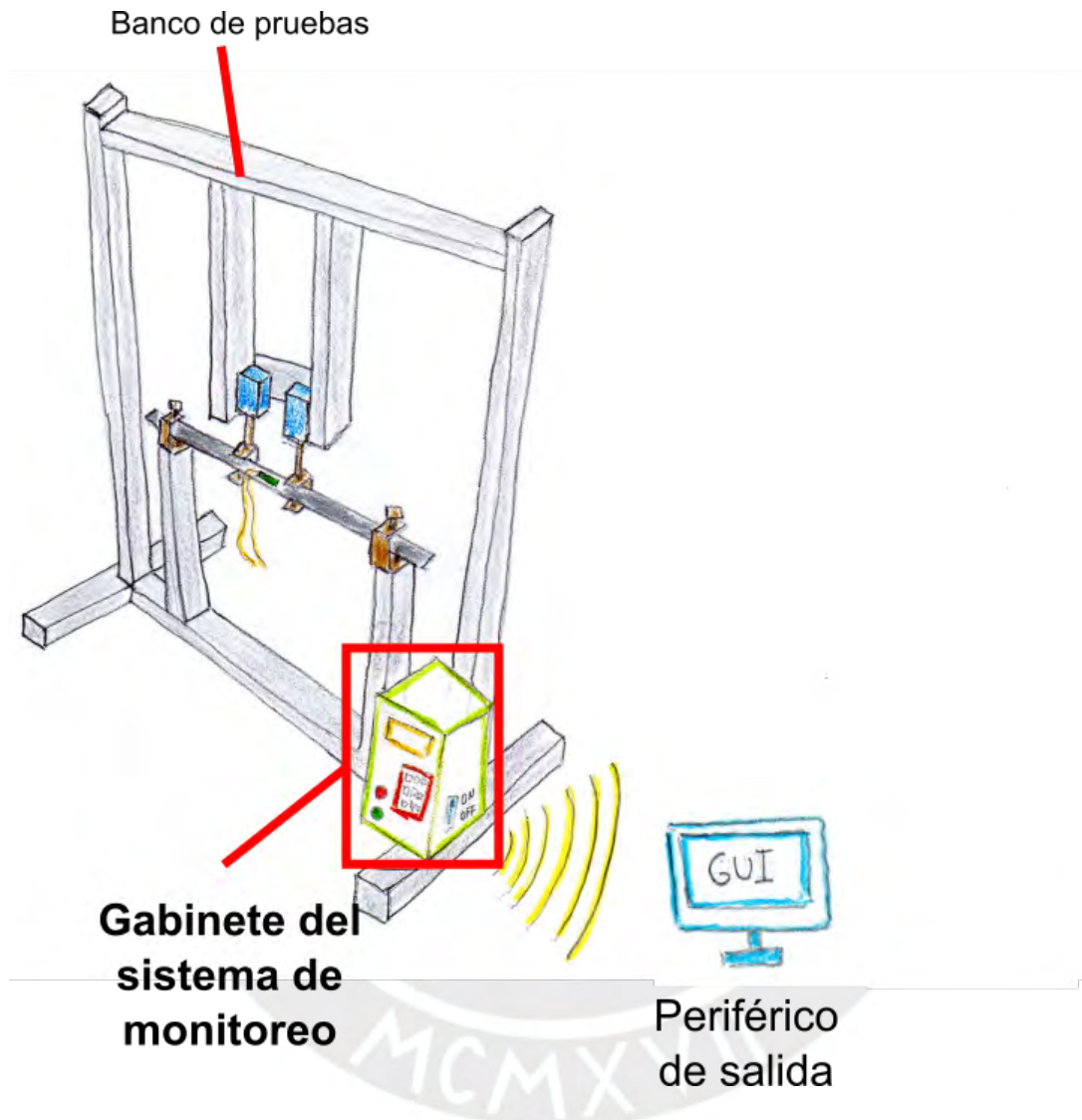


Figura C.4: Concepto de solución 2.

Procesamiento de datos. Los datos serán recibidos y procesados en una Raspberry Pi empleando el lenguaje de programación python. Finalmente, la Raspberry Pi funcionará también como un servidor que alojará los resultados del ensayo que podrán ser descargados y mostrados en la pantalla de un periférico de salida como un monitor, por ejemplo.

Panel de control. El panel de control albergará los siguientes componentes: pulsadores e indicadores, la Raspberry Pi, un circuito de acondicionamiento de señal, un amplificador, un convertor analógico digital y las fuentes de voltaje y acondicionamiento. Todos estos componentes estarán alojados en un case o contenedor (ver figura C.5)

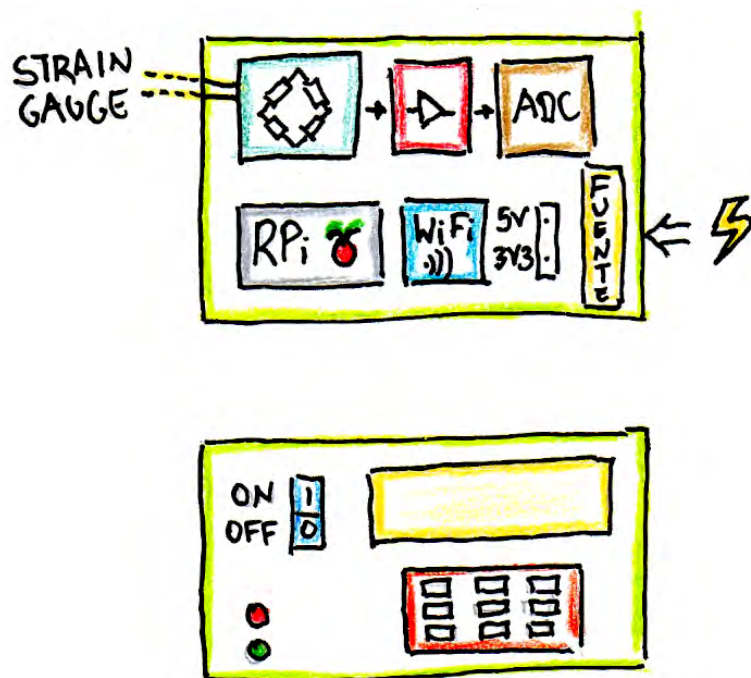


Figura C.5: Concepto de solución 2 - panel de control.

Tercer concepto de solución

Adquisición y transmisión de datos. En el tercer concepto de solución, el sistema de monitoreo se adhiere a la estructura (ver figura C.1). La deformación se medirá empleando *strain gauges* de tipo uniaxial y los datos adquiridos se transmitirán de forma inalámbrica a un servidor. Los *strain gauges* serán adheridos a la zona crítica de la probeta y luego serán conectados mediante cables al sistema de monitoreo (ver figura C.2). En esta solución se empleará un circuito de acondicionamiento, y la amplificación y la conversión de los datos se realizarán con un solo módulo (ver figura C.6). Para el procesamiento de datos y la transmisión inalámbrica se empleará un microcontrolador con Wi-Fi integrado.

Procesamiento de datos. Los datos serán recibidos y procesados en una Raspberry Pi o PC que servirá como un servidor. Se implementarán un algoritmo de procesamiento y una aplicación web empleando lenguaje de programación Python. La aplicación web servirá como un software de interfaz gráfica GUI y los resultados del ensayo podrán ser mostrados en cualquier dispositivo que tenga acceso a la red del servidor.

Panel de control. Los componentes del panel de control (pulsadores e indicadores), el circuito de acondicionamiento de señal, el amplificador, el convertor analógico-digital y el microcontrolador estarán alojados en un case que también estará fijo a la máquina (ver figura C.6).

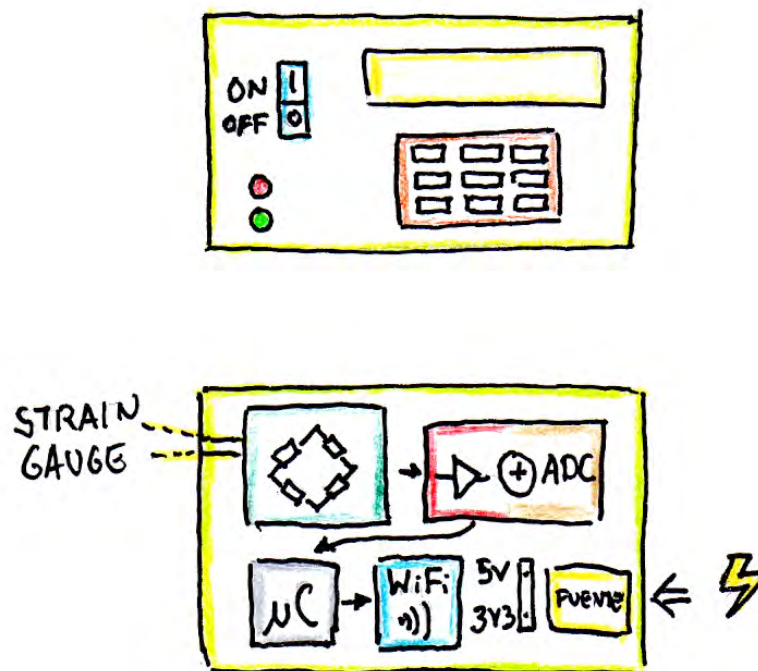


Figura C.6: Concepto de solución 3 - panel de control.

Evaluación de los conceptos de solución

A continuación se presentan la evaluación técnica y económica de cada solución. Estos análisis se realizan con el fin de determinar cuál es la solución más apropiada.

Evaluación económica de los conceptos de solución

En la Tabla C.1 se realiza un análisis económico donde el puntaje de 4 representa el menor costo y un puntaje de 1 representa el mayor costo. En esta tabla se evaluaron los siguientes criterios:

- **Costo de sensores.** Este criterio tiene el mismo peso para todas las soluciones porque se emplea el mismo sensor para adquirir los datos de deformación.
- **Costo de circuitos adicionales.** Este es el criterio económico más relevante porque cada solución emplea distintos tipos de circuitos. La tercera solución es la que emplea menos circuitos adicionales (acondicionamiento, amplificación y conversión, procesamiento y transmisión) por eso tiene el mejor puntaje. La solución 1 requiere adicionalmente de un módulo de transmisión Bluetooth.
- **Costo de estructura.** La evaluación económica de la estructura tiene el mismo peso para todas las soluciones porque los soportes metálicos que se emplearán son del mismo material y tienen el mismo costo.
- **Costo de software.** Este criterio es el segundo más importante porque en todas las soluciones se emplearán algoritmos de procesamiento que serán implementadas como software. En la solución 1 y 3, se implementará una interfaz gráfica web; por eso, se asigna un puntaje de 3. La solución 2 tiene puntaje de 2 porque no empleará un software propio para mostrar los datos.
- **Costo de mantenimiento.** El costo de mantenimiento será el mismo para cada solución porque los componentes de cada solución que estarán en contacto con la probeta y el eje de la máquina requerirán de la misma frecuencia de mantenimiento.

Tabla C.1: Tabla de evaluación del valor económico de las tres soluciones.

VALOR ECONÓMICO										
p : puntaje de 0 a 4 (Escala de valores según VDI 2225)										
0 = No satisface, 1 = Casi aceptable, 2 = Suficiente, 3 = Bien, 4 = Muy bien (ideal)										
g : es el peso ponderado y se da en función de la importancia de los criterios de evaluación										
Variantes de Concepto / Proyectos			S1		S2		S3		S ideal	
Nr	Criterios de evaluación	g	p	gp	p	gp	p	gp	p	gp
1	Costo de sensores	1	3	3	3	3	3	3	4	4
2	Costo de circuitos	3	2	6	2	6	3	9	4	12
3	Costo de estructura	1	3	3	3	3	3	3	4	4
4	Costo de software	2	3	6	2	4	3	6	4	8
5	Costo mantenimiento	1	3	3	3	3	3	3	4	4
Puntaje máximo			14	21	13	19	15	24	20	32
Valor económico Y			0.656		0.594		0.750		1	
Orden			2		3		1		-	

Evaluación técnica de los conceptos de solución

En la tabla C.2 se realiza un análisis técnico. En esta tabla se evaluaron los siguientes criterios:

- **Complejidad.** En este criterio un puntaje de 4 equivale a una solución de menor complejidad. La complejidad tiene un peso de 2 porque esta determina la factibilidad de la implementación del sistema de monitoreo. La solución 1 y la solución 2 tienen puntaje de tres porque pueden ser implementadas ya que los componentes que se emplean para estas soluciones son comunes y están disponibles en el mercado. En cambio, la solución 3 tiene un puntaje de dos porque requiere de un módulo que incluya un amplificador y un convertor en el mismo circuito.
- **Diseño.** Este criterio tiene un peso de 1 porque todas las soluciones que se diseñaron pueden ser implementadas. Sin embargo, la solución 3 tiene el mayor puntaje (tres) porque es la única propuesta que emplea un módulo de amplificación y conversión en un mismo circuito.
- **Velocidad de procesamiento.** Este criterio tiene un peso de 2 porque la velocidad de procesamiento garantiza que los datos sean adquiridos o mostrados en tiempo real. La solución 1 tiene mayor puntaje porque el procesamiento se realizará empleando una computadora de escritorio. En contraste, las soluciones 2 y 3 emplearán una Raspberry Pi que tiene una menor capacidad de procesamiento.
- **Uso de software.** El uso de software tiene un peso de 1 porque todas las soluciones emplearán un software en el sistema de monitoreo. No obstante, las soluciones 1 y 3 tienen la puntuación más alta porque brindan una mejor experiencia de usuario ya que emplean una aplicación dedicada para mostrar los resultados mientras que la solución 2 solo emplea hojas de cálculo.
- **Montaje.** Este es el criterio técnico más importante porque el análisis de fatiga se puede realizar en distintos tipos de máquinas de ensayos. La solución 3 tiene mayor puntaje porque al usar una menor cantidad de componentes electrónicos es más compacto y adaptable. En cambio, en la solución 1 se tiene que usar un componente adicional y en la solución 2 se emplea adicionalmente una Raspberry Pi dentro del módulo.

Tabla C.2: Tabla de evaluación del valor técnico de las tres soluciones.

VALOR TÉCNICO										
<p>p : puntaje de 0 a 4 (Escala de valores según VDI 2225) 0 = No satisface, 1 = Casi aceptable , 2 = Suficiente, 3 = Bien, 4 = Muy bien (ideal) g : es el peso ponderado y se da en función de la importancia de los criterios de evaluación</p>										
Variantes de Concepto / Proyectos			S1		S2		S3		S ideal	
Nr	Criterios de evaluación	g	p	gp	p	gp	p	gp	p	gp
1	Complejidad	2	3	6	3	6	2	4	4	8
2	Diseño	1	2	2	2	2	3	3	4	4
3	Velocidad de procesamiento	2	3	6	2	4	2	4	4	8
4	Uso de software	1	3	3	2	2	3	3	4	4
6	Montaje	3	2	6	2	6	3	9	4	12
Puntaje máximo			13	23	11	20	13	23	20	36
Valor técnico X			0.639		0.556		0.639		1	
Orden			1		2		1		-	

Gráfico de la evaluación técnico-económica de los conceptos de solución

A continuación se muestra el gráfico del análisis técnico-económico donde se representa a cada concepto de solución junto a la representación de una solución ideal. De la figura C.7 se puede concluir que la tercera solución es la más apropiada.

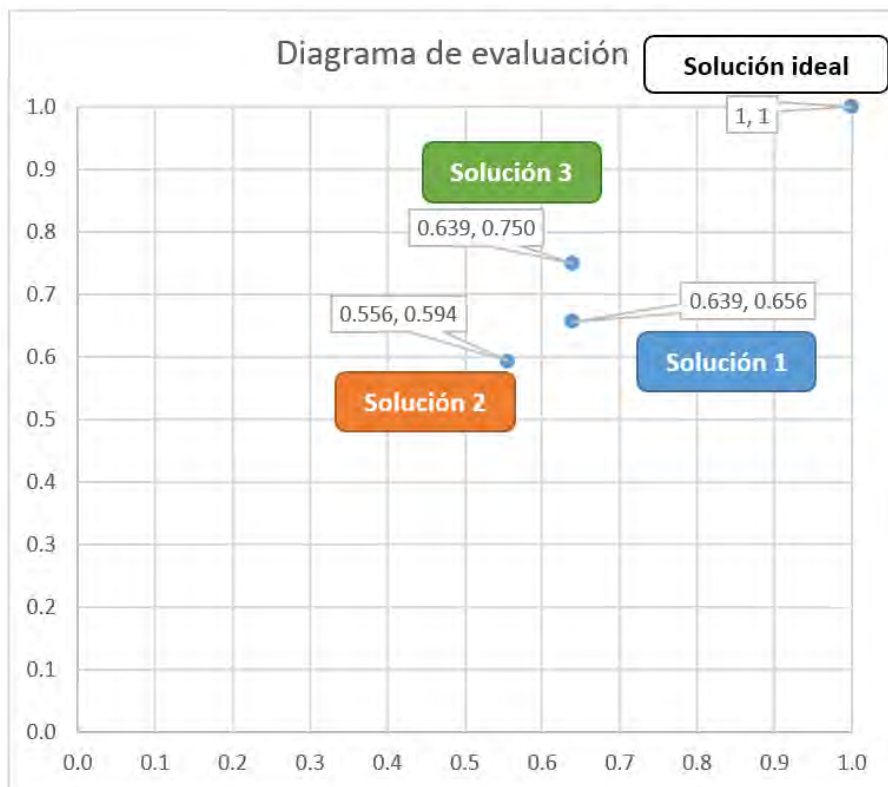


Figura C.7: Gráfico de la evaluación técnico-económica.

ANEXO D: Implementación del banco de pruebas

El sistema de monitoreo de deformación que se implementó no solamente debe ser probado usando cargas estáticas o constantes, sino también requiere de ser probado empleando cargas alternantes. Por esta razón, se implementó un banco de pruebas que permite generar este tipo de cargas. En la Figura D.1 se muestra a la estructura implementada con cada una de sus partes, y además, al sistema de monitoreo, posicionado y conectado al sistema. En esta sección se describe a cada uno de los elementos que se usan en conjunto con el banco de pruebas.

- **Solenoides.** Los solenoides son los elementos principales, pues estos generan la fuerza que actuará sobre la probeta. El banco de pruebas cuenta con dos solenoides que generan aproximadamente 6N de fuerza (ver figura D.4).
- **Panel de control del banco de pruebas.** Este componente es el encargado de controlar a los solenoides. Por este motivo, esta conformado por circuitos que tienen con función activar a estos dispositivos electromagnéticos. Así mismo, este componente sirve para regular el voltaje que será distribuido en cada uno de los circuitos del sistema.
- **Probeta.** La probeta a ser utilizada es una viga de aluminio de sección transversal rectangular y que tiene adherida una *strain gauge* a uno de sus lados (ver figura D.4).

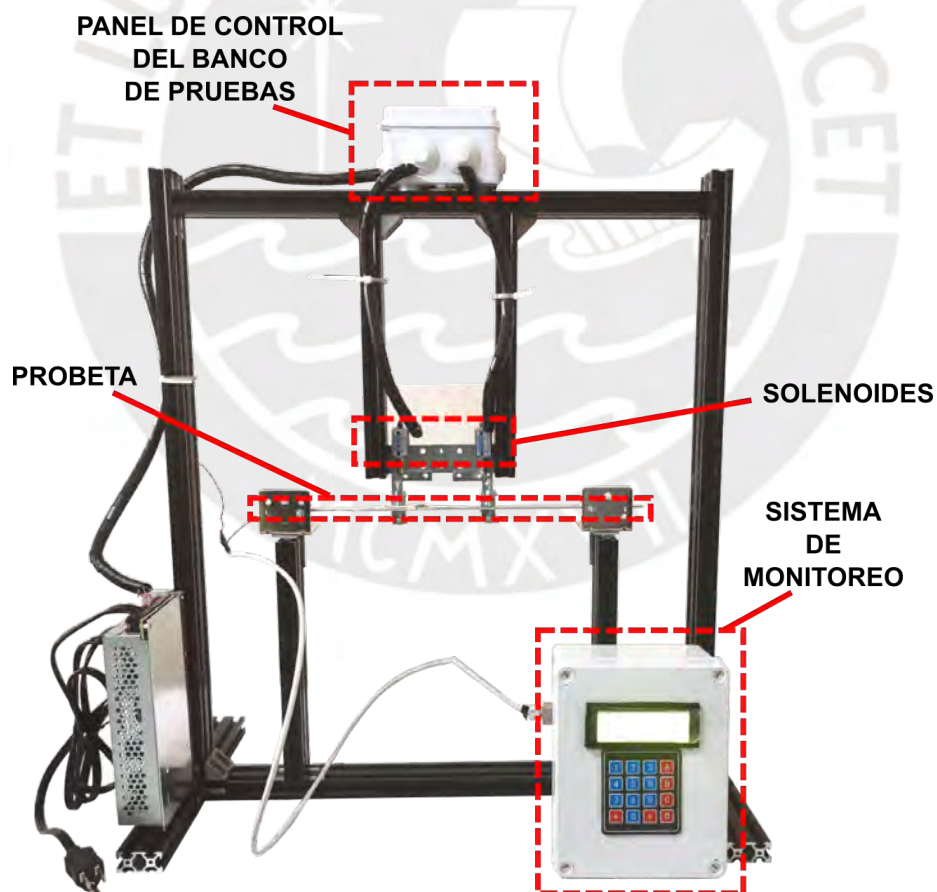


Figura D.1: Banco de pruebas y sistema de monitoreo.

Modelo de ensayos de fatiga de cuatro puntos

El banco de pruebas se implementó con el fin de realizar un ensayo de fatiga empleando un modelo de flexión de cuatro puntos. En este tipo de ensayo, la probeta se coloca sobre dos apoyos, cada uno en los extremos, y la localización de las dos fuerzas que son aplicadas sobre la probeta se encuentra equidistante a los apoyos (ver figura D.2).

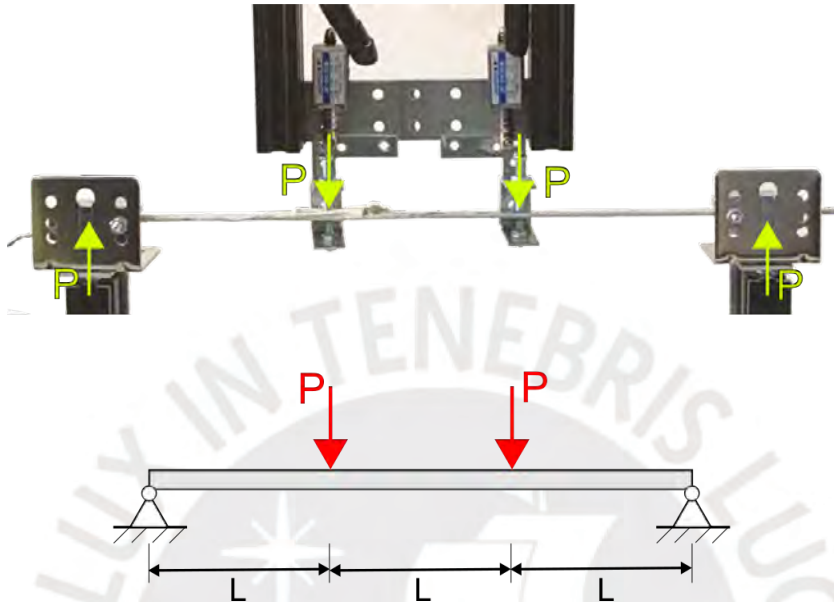


Figura D.2: Modelo de flexión de cuatro puntos.

El modelo de flexión de cuatro puntos se emplea porque esta disposición de fuerzas y reacciones genera flexión pura y esta condición se puede observar claramente en el diagrama de momentos flectores (ver figura D.3). Es decir, esta disposición permite medir los efectos de la deformación que solamente fueron causadas por el momento flector.

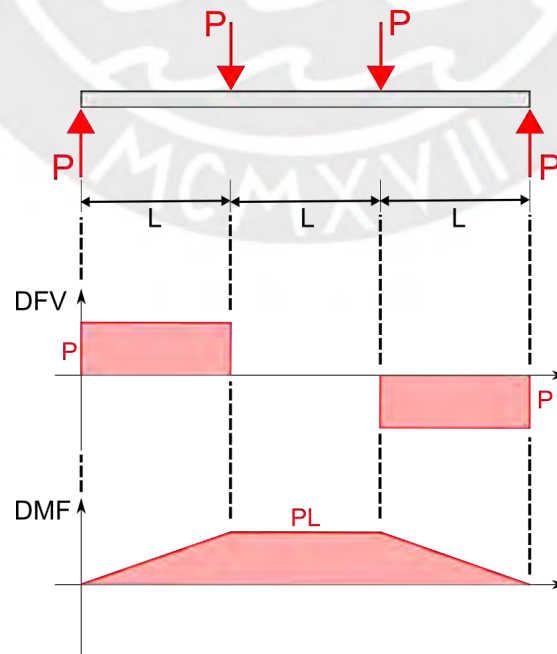


Figura D.3: Diagrama de flexión de cuatro puntos.

Modelo de cuatro puntos en el banco de pruebas

El modelo de flexión de cuatro puntos que se implementó en el banco de pruebas sigue la disposición geométrica descrita en la sección anterior (ver figura D.2). La probeta está simplemente apoyada sobre dos soportes en los extremos y las fuerzas son generadas empleando dos solenoides. Así mismo, para medir la deformación en la sección que se encuentra sometida a flexión pura se emplea una *strain gauge* ubicada en el centro de la probeta (ver figura D.4).

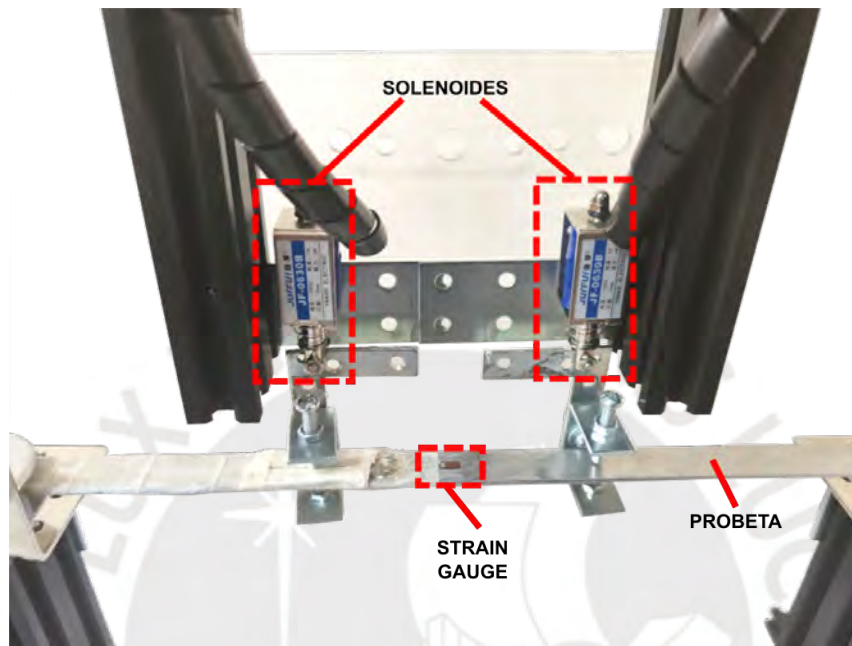


Figura D.4: Vista detallada de los solenoides y la probeta.

Si solamente se asume la disposición de cuatro puntos planteada anteriormente, solo se logrará medir los efectos de una carga estática. No obstante, para el caso planteado, se requiere de que esta carga sea dinámica. Es decir, la aplicación de las cargas debe cambiar de dirección en todo momento. Por esta razón, se emplearon solenoides de tipo *push-pull* que pueden ejercer una fuerza en ambos sentidos. La geometría y posición de las reacciones y de las fuerzas se muestra en la Figura D.5. Es importante notar que la dirección de las fuerzas y las reacciones cambiará en función de la posición de los solenoides.

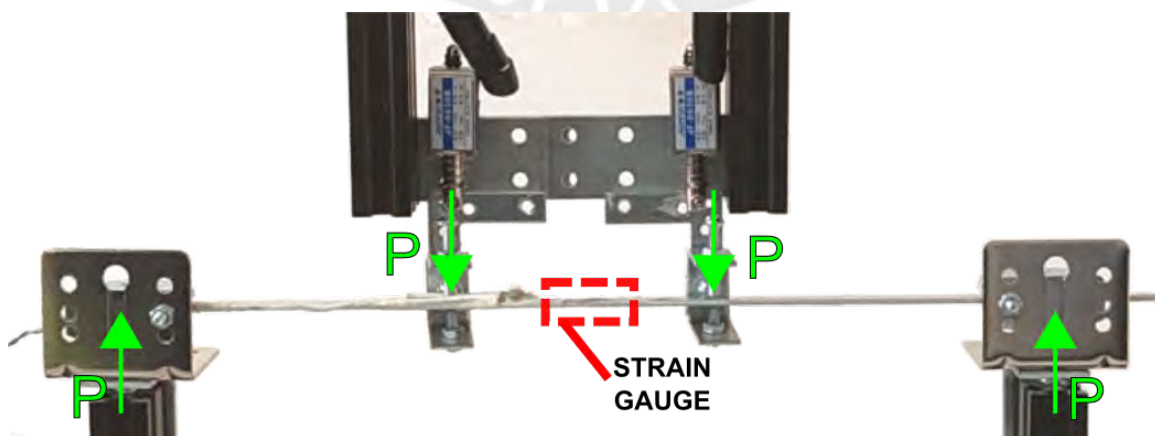


Figura D.5: Gráfico de las fuerzas aplicadas sobre la probeta.

Finalmente, debido a que las fuerzas de los solenoides se aplicaran en ambos sentidos, será posible obtener gráficos de fuerzas dinámicas. Además, para entender cómo actuará el esfuerzo en el centro de la probeta, podemos observar los gráficos de momento flector para cada caso en la Figura D.6. De los diagramas y de la posición en la que se encontrará la *strain gauge*, se puede deducir que, empleando el banco de pruebas, se podrá medir la deformación de la probeta, tanto a tracción y a compresión, en todo momento.

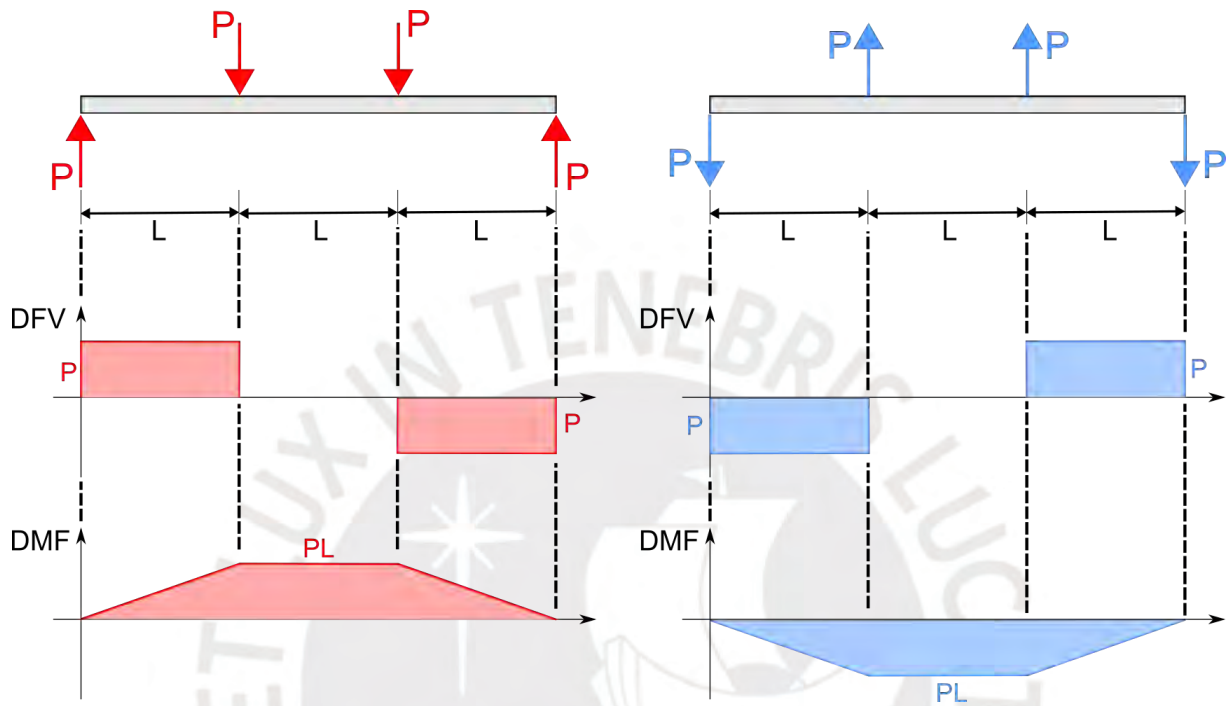


Figura D.6: Diagramas de fuerza cortante y momento flector en ambos sentidos.