



UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE INGENIERÍA



Desarrollo de una red de sensores inalámbrica con tecnología LoRaWAN para monitoreo estructural

TESIS PRESENTADA A LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE LA
REPÚBLICA POR

Ing. Juan Andrés Sánchez Frabasile

EN CUMPLIMIENTO PARCIAL DE LOS REQUERIMIENTOS
PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
MAGISTER EN INGENIERÍA ELÉCTRICA.

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Ing. Nicolás Pérez Universidad de la República
Dr. Ing. Agustín Spalvier Universidad de la República

TRIBUNAL

Dr. Ing. Pablo Monzón Universidad de la República
Dr. Ing. Gonzalo Cetrángolo Universidad de la República
Dr. Ing. Horacio Mendoza Universidad Nacional de Córdoba

DIRECTOR ACADÉMICO

Dr. Ing. Nicolás Pérez Universidad de la República

Montevideo
jueves 26 febrero, 2026

Desarrollo de una red de sensores inalámbrica con tecnología LoRaWAN para monitoreo estructural,
Ing. Juan Andrés Sánchez Frabasile.

ISSN 1688-2806

Esta tesis fue preparada en L^AT_EX usando la clase iietesis (v1.1).

Contiene un total de 107 páginas.

Compilada el jueves 26 febrero, 2026.

<http://iie.fing.edu.uy/>

Agradecimientos

Me gustaría agradecer a mis tutores Nicolás y Agustín por su disposición y aportes tan valiosos para la culminación de este trabajo. Al colega Dr. Ing. Gastón De Boni por su colaboración en la etapa de test de la red inalámbrica. Al colega Dr. Ing. Henry Figueredo por su colaboración en la etapa de ensayos de los dispositivos desarrollados. A la Facultad de Ingeniería por proveer la infraestructura e insumos para la ejecución de este trabajo, y a la Comisión Académica de Posgrado (CAP) por su financiamiento en la etapa final del mismo.

Dedicatoria

Al pueblo uruguayo en su conjunto

Resumen

En esta tesis se aborda el desarrollo de una red de sensores inalámbrica con tecnología LoRaWAN para el monitoreo de estructuras civiles. La implementación desarrollada como trabajo de aplicación está compuesta por dos nodos que relevan magnitudes estructurales de interés: la deformación local y el desplazamiento.

El primero de ellos contiene los circuitos de acondicionamiento para un sensor de desplazamiento lineal comercial, un LVDT (Linear Variable Differential Transformer) del fabricante TE Connectivity, modelo HR1000. El segundo nodo recoge la información de un sensor de deformaciones mecánicas implementado con un puente de galgas extensiométricas metálicas.

Estos nodos realizan medidas periódicas, transmitiendo la información relevada a través de una radio integrada en una placa de desarrollo Arduino MKRWAN 1310, con tecnología LoRaWAN. Los datos son recibidos por una puerta de enlace TTIG (The Things Indoor Gateway) con salida a Internet mediante un enlace Wi-Fi y redireccionados al servidor de red *The Things Network*, que gestiona una red comunitaria global de nodos IoT conectados mediante la tecnología mencionada. Por último, los datos son enlazados a una aplicación web llamada TagoIO, que provee la interfaz gráfica para la visualización de las variables asociadas al monitoreo de las estructuras.

Como primera etapa del trabajo, se realizó una revisión bibliográfica de las técnicas inspectivas de vanguardia aplicadas al monitoreo estructural. Los estudios revisados corresponden a publicaciones en revistas científicas arbitradas y publicaciones relevantes. Se seleccionó una tecnología de red adecuada para la implementación de redes de monitoreo continuo, con disponibilidad de datos en tiempo real e interfaz de usuario amigable.

En la fase experimental se abordó el diseño y la implementación de los circuitos de acondicionamiento de ambos sensores, la implementación de la red con conectividad LoRa y la interfaz de usuario, que implicó la elección de la plataforma web, la configuración de un dashboard y el desarrollo de scripts en lenguaje JavaScript para el procesamiento y envío de comandos de forma remota a los nodos de la red. En la etapa final, se integraron todas las partes y se evaluó el desempeño de la red, realizando ensayos individuales de los nodos y del rendimiento de la red en términos del número de paquetes recibidos por la aplicación web en función de la distancia nodo-gateway.

Para el LVDT se realizó una implementación basada en componentes de bajo costo. El nodo instrumentado fué calibrado con un actuador de pasos de resolución micrométrica, modelo NRT150, del fabricante THORLABS. El instrumento desarrollado presentó una respuesta lineal a los desplazamientos, con una sensibilidad de $94.7 \mu\text{m}/\text{V}$ y una incertidumbre asociada máxima de $\pm 0,26 \text{ mm}$ en el rango nominal completo de desplazamientos. Este resultado se ajusta al error máximo de linealidad reportado por el fabricante en la hoja de datos del transductor. Finalmente se contrastó el funcionamiento del nodo contra un comparador analógico del fabricante NEOTeck, con resolución de $10 \mu\text{m}$, obteniéndose un error relativo máximo de $0,68 \%$ respecto al mismo.

En el caso del nodo sensor de deformaciones, el circuito de acondicionamiento está basado en un módulo off-the-shelf desarrollado por AVIA Semiconductors, modelo HX711, que posee un conversor

analógico/digital de 24 bits y es adecuado para medir cambios relativos de resistencia con precisión utilizando un puente de Wheatstone. Para la evaluación de este nodo, se ensayó una barra de acero en voladizo, con 4 galgas montadas sobre su superficie, que fueron conectadas en configuración de puente completo. El instrumento desarrollado mostró una respuesta lineal con una sensibilidad de $28,6 \mu\varepsilon/\text{N}$ (micro-deformaciones/Newton). Se contrastaron sus lecturas contra las de un puente de medida modelo P3 del fabricante Micro-Measurements y otro desarrollado por el fabricante Tequipment, modelo SM1009. El instrumento construido presentó un error relativo máximo de 1,4 % respecto al puente P3 y 4,3 % respecto al SM1009.

Tabla de contenidos

Agradecimientos	I
Dedicatoria	II
Resumen	III
Introducción	VIII
0.1. Motivación	VIII
0.2. Objetivos	IX
0.2.1. Objetivo general	IX
0.2.2. Objetivos Específicos	X
0.3. Contribuciones de esta tesis	X
0.4. Estructura del documento	X
1. Revisión Bibliográfica	1
1.1. Técnicas de Monitoreo Estructural	1
1.1.1. Sensores de deformación	3
1.1.2. Sensores de desplazamiento	8
1.2. Sensores Inalámbricos	12
1.3. Implementación de Redes de Monitoreo y Control Estructural	13
2. Descripción del sistema	14
2.1. Nodos de Red	15
2.1.1. Operación de los nodos	16
2.2. Interfaz de usuario	18
3. Red de Datos	20
3.1. Tecnologías LPWAN	20
3.2. LoRaWAN	22
3.2.1. ¿Por qué LoRaWAN?	22
3.2.2. Características de LoRaWAN	23
3.2.3. Arquitectura de Red	25
3.2.4. Procedimiento de conexión de un nodo a la red	27
3.2.5. Ensayo de funcionamiento de la red	29

4. Implementación de sensor de desplazamiento lineal - LVDT	32
4.1. Principio de funcionamiento	33
4.2. Implementación	35
4.2.1. Etapa de Excitación	36
4.2.2. Etapa de Demodulación	39
4.3. Ensayos y análisis	42
4.3.1. Calibración	42
4.3.2. Incertidumbre asociada al instrumento	45
4.3.3. Ensayo de carga	47
5. Implementación de sensor de deformación - Galgas extensiométricas	50
5.1. Principio de Funcionamiento	50
5.2. Método de Medición	53
5.2.1. Deformación real y aparente por variaciones de temperatura	54
5.2.2. Configuración del puente de medida	54
5.3. Implementación del sistema de medida	56
5.3.1. Módulo HX711	58
5.4. Análisis y Ensayos	58
5.4.1. Ensayo 1	60
5.4.2. Ensayo 2	60
5.4.3. Ensayo 3	63
6. Análisis de costos	65
6.1. Despliegue de la red	65
6.1.1. Gateway	65
6.1.2. Nodos	65
7. Conclusiones	68
7.0.1. Trabajos Futuros	69
A. Configuración de red	72
A.0.1. Registro de Gateway en TTN	72
A.0.2. Registro de nodo en TTN	72
A.0.3. Configuración de los nodos de red	73
A.0.4. Creación de una interfaz de usuario de TagoIO	73
A.0.5. Descarga de datos desde la interfaz de usuario de TagoIO	74
A.0.6. Codificación de las tramas LoRaWAN en los nodos de red	74
A.0.7. Descripción de tramas LoRaWAN	76
B. Parámetros de configuración de nodos de red	78
C. Cálculos Analíticos	79
C.1. Modelo teórico de la deformación por deflexión de una barra en voladizo	79
C.2. Maximización de la sensibilidad de un puente de medida	81
C.3. Configuraciones de conexión de un puente de medida	82
C.4. Cálculo de la dependencia de la resistencia de la galga respecto a la temperatura	82
C.5. Cálculo del voltaje de salida del puente de medida (Puente de Wheatstone) cuando se utilizan galgas con valor nominal que difiere con las resistencias fijas del circuito	83

Tabla de contenidos

Referencias	85
Índice de tablas	91
Índice de figuras	92

Introducción

0.1. Motivación

La humanidad se encuentra transitando una época de cambios vertiginosos a nivel tecnológico que se han consolidado en un gran paquete denominado “4^{ta} Revolución Industrial” o “Industria 4.0” [1]. Esta revolución se fundamenta en 3 pilares. En primer lugar, la gran capacidad para extraer datos de interés, ya sea de procesos productivos, fenómenos sociales u otros procesos. A esto se hace referencia cuando se habla de “Big Data”. Se posee la tecnología necesaria para extraer grandes cantidades de datos en forma continua, y de este aspecto surge naturalmente el segundo pilar: la capacidad para procesar ese gran volumen de información, que se sustenta con el prolífico desarrollo de los dispositivos electrónicos, específicamente de circuitos integrados (IC, por sus siglas en inglés), los cuales engloban a los microcontroladores, microprocesadores y FPGAs [2]. Las altas prestaciones en la velocidad de operación y la reducción de tamaño hacen posible el procesamiento en tiempos razonablemente cortos, según los requisitos de cada campo de aplicación.

El último de los 3 pilares es el desarrollo de las telecomunicaciones, que permite transmitir la información, ya sea en forma cableada o inalámbrica, a grandes distancias y a velocidades igualmente altas. Algunas de las tecnologías distribuidas más populares son: Wi-Fi, Ethernet, LTE (red 4G y 5G), LTE-M, GSM (red 2G), LoRa (Long Range), SigFox, ZigBee, NB-IoT, etc, donde cada estándar cubre necesidades distintas y son complementarios entre sí [3].

Las tecnologías antes mencionadas impactan en todas las áreas del conocimiento, pues la disponibilidad de datos puede utilizarse para optimizar procesos productivos, científicos, estudiar el impacto de políticas sociales o hacer análisis de mercado [4]. Particularmente, surge un potencial ámbito de aplicación en lo que se denomina como “Monitoreo de Salud Estructural” (MSE o SHM, por sus siglas en inglés). El MSE consiste sencillamente en monitorear la evolución del estado de conservación de una estructura, detectando anomalías y patologías durante el transcurso de su vida útil. El objetivo es detectar cambios que permitan anticipar posibles fallas y, de esta forma, realizar reparaciones de pequeña escala o mantenimiento preventivo. De esta manera, se logra optimizar tanto la vida útil de la estructura como los recursos económicos empleados para su manutención, además de maximizar la seguridad de los usuarios.

Para alcanzar estos objetivos se emplea una gran variedad de técnicas de inspección, muchas de las cuales se basan en la realización de ensayos no destructivos (END) tales como emisión de señales acústicas, rayos X, inspección visual [5], o también aquellas que relevan magnitudes estructurales como deformación, desplazamiento, formas modales, entre otras [6]. En cualquier caso, se requiere complementar estas técnicas con el procesamiento de señales y algoritmos computacionales que permitan evaluar los datos extraídos de los ensayos para realizar un análisis más ajustado sobre el estado de conservación de las estructuras.

En lo que respecta a Uruguay, los métodos de monitoreo para infraestructura están basados fuertemente en la inspección visual. Este representa un método valioso cuando se cuenta con personal

0.2. Objetivos

experimentado, pero genera una alta relación de dependencia respecto al recurso humano, lo cual se traduce en un gasto mayor. Tampoco permite generar alertas tempranas de fallas, solo se detectan cuando las mismas tienen efectos visibles sobre la estructura, como grietas, rajaduras, pérdidas de sección, deformaciones o vibraciones excesivas. Sobre todo, no representa un método viable cuando se trata de estructuras de difícil acceso tales como represas, antenas, torres o puentes.

Un caso reciente y de público conocimiento sobre la falla de una estructura que pudo tener un impacto importante sobre el turismo es el del puente ondulado de La Barra de Maldonado (puente Leonel Viera). La patología fue advertida cuando derivó en efectos visibles sobre la estructura (rajaduras y deformaciones significativas) y volvió riesgosa la circulación de vehículos [7], [8].

Hoy en día resulta imperiosa la aplicación de técnicas de monitoreo más versátiles basadas en medidas objetivas, si se tiene en cuenta que más del 50 % de los puentes operativos del país tienen más de 50 años de antigüedad, cuando la vida útil promedio de un puente es de unos 100 años y las cargas admisibles por normativa se han incrementado desde la época en la que muchos de ellos fueron construidos [9]. En la actualidad, la carga máxima para camiones es de 48 toneladas, aproximadamente un 13 % mayor que en la década de los 80 [10], [11]. Por estas razones es necesario contar con métodos de inspección que permitan obtener un diagnóstico fiel del estado de las estructuras.

Otro aspecto fundamental a tener en cuenta es la incidencia del cambio climático, que genera una tendencia a la polarización de las estaciones, agudizando los fenómenos de inundaciones, vientos arrachados y olas de calor [12], [13]. Esto afecta el régimen bajo el que operan las estructuras que puede diferir del régimen original para el que fueron diseñadas [14], [15]. Las inundaciones socavan los pilares de los puentes, mientras que el calentamiento global produce una elevación del nivel del mar como consecuencia del deshielo de los glaciares. A su vez, aumenta la salinidad en el aire producto del aumento de temperatura, lo cual acelera la oxidación en estructuras a base de hormigón armado. Estos son algunos de los efectos que repercuten sobre la infraestructura existente y que conducen a la aparición de patologías que deben ser estudiadas y atendidas, pero sobre todo detectadas a tiempo.

Para cumplir con este objetivo se vuelve necesario el desarrollo de métodos y dispositivos que brinden acceso a indicadores de salud estructural. Adicionalmente, se debe buscar la optimización en costos y facilidades de implementación que permitan realizar un monitoreo remoto y en tiempo real, posibilitando la aplicación del mantenimiento necesario para maximizar la vida útil de las estructuras.

0.2. Objetivos

0.2.1. Objetivo general

El objetivo de este trabajo es realizar una revisión general de las técnicas de monitoreo estructural existentes y desarrollar una prueba de concepto sobre la implementación de una red inalámbrica de sensores con conectividad LoRaWAN centrada en la aplicación de dos técnicas de monitoreo tradicionales: las galgas extensiométricas y los LVDT (Linear Variable Differential Transformer). Para el desarrollo se procuró la utilización de componentes off the shelf, de bajo costo relativo y preferentemente distribuidos en plaza. Esto permite establecer el punto de partida para una línea de investigación que evalúe la capacidad y las limitaciones existentes para el desarrollo de este tipo de sistemas a nivel local y su competitividad.

0.2.2. Objetivos Específicos

- Implementación de electrónica de alimentación y acondicionamiento de señal para el sensor de desplazamientos (LVDT).
- Ensayo del método en elemento estructural a escala de laboratorio y comparación de funcionamiento con un dispositivo de medición de desplazamientos de carácter comercial.
- Implementación de electrónica de alimentación y acondicionamiento de señal para galgas extensiométricas.
- Ensayo del método en elemento estructural a escala de laboratorio y comparación de funcionamiento con un dispositivo de carácter comercial.
- Implementación de una red inalámbrica de sensores, donde cada sensor representa un nodo con capacidad de recibir mensajes, lanzar mediciones y transmitir el resultado de la medida a través de la tecnología de red LoRaWAN.
- Implementación de una interfaz gráfica de usuario que permita visualizar los datos en tiempo real y enviar comandos hacia los nodos de la red.

0.3. Contribuciones de esta tesis

La implementación del transductor de desplazamiento (LVDT) desarrollada en este trabajo posee una característica original. Al utilizar un LVDT de 6 hilos las señales en ambos bobinados secundarios se demodulan por separado. Comunmente estas dos señales pasan por un circuito restador, tal como un amplificador de instrumentación ya que en la diferencia de las señales es donde se encuentra la información del desplazamiento. En el presente trabajo esta resta se realiza luego de digitalizar las señales, por medio del firmware del microcontrolador utilizado. Este aspecto simplifica el circuito de acondicionamiento y reduce su costo de fabricación.

Se escribió un artículo en base a este aspecto y el mismo fue enviado al congreso internacional IEEE-INDUSCON2025, “Development of a Low-Cost LVDT Signal Conditioning Circuit for Structural Monitoring”. El trabajo fue aceptado para su presentación en el mes de octubre.

0.4. Estructura del documento

El capítulo 1 del documento está compuesto por una revisión de las técnicas de inspección tradicionales para estructuras haciendo énfasis en el relevamiento de dos magnitudes: deformación y desplazamiento. En este capítulo también se indaga sobre las tecnologías de sensores emergentes en el área de aplicación y sobre el paradigma que guía el desarrollo del monitoreo estructural que se orienta hacia la concepción de estructuras o incluso ciudades inteligentes capaces de detectar sus propias fallas y de corregir anomalías de comportamiento para contribuir de esta manera a maximizar su vida útil y las condiciones de seguridad para los usuarios. El capítulo 2 introduce al lector en los aspectos más generales del sistema desarrollado, describiendo la estructura general de la red y sus componentes, así como los aspectos básicos de su funcionamiento. El capítulo 3 ahonda en la tecnología de red elegida, LoRaWAN. Allí se realiza una comparación de sus capacidades con las de otras tecnologías del mismo tipo pertenecientes al grupo de las LPWAN (Low Power Wide Area Network) y se describen aspectos de su funcionamiento tales como la arquitectura de una red LoRa, los dispositivos que la componen y

0.4. Estructura del documento

sus modos de operación.

En los capítulos 4 y 5 el lector puede encontrar todos los detalles correspondientes a la implementación de los sensores de desplazamiento y deformación, comenzando por sus principios de funcionamiento, siguiendo por el diseño y la implementación de sus circuitos de acondicionamiento y finalizando con los ensayos de funcionamiento respectivos.

El capítulo 6 contiene las conclusiones extraídas y las líneas de trabajo a futuro identificadas como la ejecución de pruebas de campo y la realización de un análisis profundo del consumo energético del sistema. Por último se encuentran los anexos con detalles técnicos sobre la configuración de los dispositivos de la red, los cálculos para el diseño de los nodos de red y el análisis sobre algunos de los ensayos de funcionamiento de los sensores. Adicionalmente, se realiza un análisis de los costos asociados al desarrollo de la red desplegada.

Capítulo 1

Revisión Bibliográfica

1.1. Técnicas de Monitoreo Estructural

El monitoreo de salud estructural representa un área de estudio que engloba varias disciplinas. Partiendo de la instrumentación e implementación de sensores hasta el desarrollo de modelos computacionales basados en las características relevadas en campo que permiten determinar el estado de “salud” o de conservación de una estructura. La evaluación de la “salud estructural” se lleva a cabo a través de una serie de etapas que se ilustran en la figura 1.1.

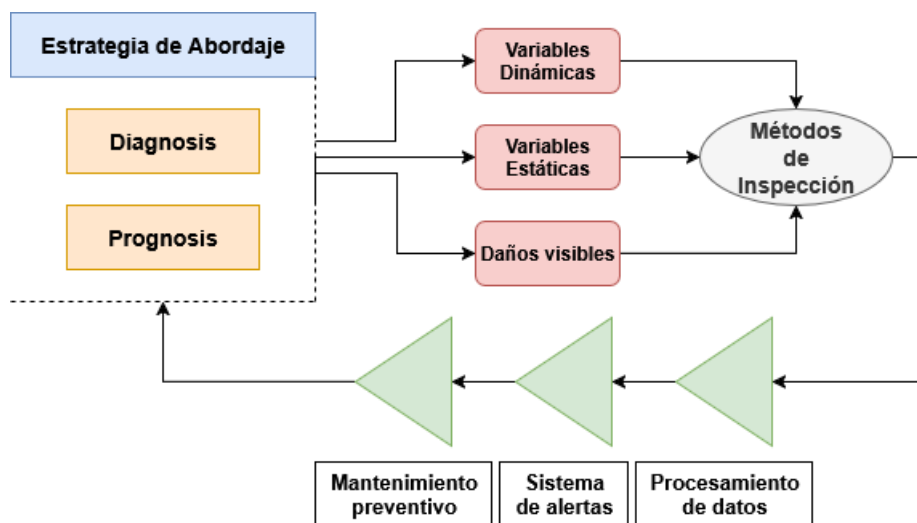


Figura 1.1: Sistema de monitoreo estructural (SME)

La determinación de indicadores de daño, el desarrollo de modelos estructurales basados en el procesamiento de datos y la implementación de sensores y actuadores pretende asistir a la ejecución de inspecciones de infraestructura que sean capaces de detectar patologías durante su operación. Por ejemplo, en el caso de puentes, se puede medir el desplazamiento vertical del punto central del “vano” para controlar que el mismo no supere cierto valor de umbral establecido por normativa bajo determinadas condiciones de carga. Dicho ensayo se puede llevar a cabo con un comparador analógico [16]. Este problema es completamente distinto a poder diagnosticar de forma precoz la existencia de anomalías en el comportamiento de la estructura e incluso poder predecir, en base a características propias de la misma como rigidez o modos de vibración predominantes, cuál es su vida útil remanente en las

1.1. Técnicas de Monitoreo Estructural

condiciones actuales de operación.

Para hacer una clasificación preliminar de las técnicas de monitoreo o inspección estructural existentes, se puede tomar como referencia el trabajo realizado por Gharehbaghi, V. R., et al. [5]. En primer lugar es preciso definir en forma clara el concepto de daño. Según Farrar y Warden, el daño en un sistema estructural o mecánico se define como todo cambio generado tanto en las propiedades geométricas como en el material constitutivo del sistema, que afectan negativamente su operación actual o futura (e.g., corrosión) [17]. Una vez definido este concepto, se pueden clasificar las distintas técnicas de monitoreo en referencia a su finalidad, tal como lo establece Rytter A. [6].

- **Diagnosis:**

- Nivel I: Identificación de la existencia de un defecto a escala global de la estructura.
- Nivel II: Localización del daño y su orientación (e.g., si se trata de una rajadura, ¿hacia dónde se extiende?).

- **Prognosis:**

- Nivel III: Determinación de la magnitud del daño.
- Nivel IV: Estimación de la vida útil remanente de la estructura.

La diagnosis engloba los métodos que sensan o extraen información que permite determinar la existencia de patologías o anomalías en las estructuras, mientras que la prognosis pretende estimar, según algún criterio, la integridad del sistema y su vida útil remanente. Para esto, se requiere la utilización de modelos estructurales o algoritmos de reconocimiento de patrones que permitan comparar el estado actual de la estructura contra otro ya conocido.

Esta descripción arroja claridad sobre la utilidad de cada método según el objetivo que se persiga. Si bien siempre será de interés conocer la vida útil remanente de una estructura, el esfuerzo que conlleva lograr esa estimación no siempre se justifica, sobre todo en estructuras de fácil acceso y de geometrías simples que son fáciles de instrumentar. Por otro lado, en aplicaciones aeroespaciales, donde no es posible realizar casi ninguna reparación o mantenimiento, se vuelve vital contar con una estimación de la integridad estructural del sistema, así como conocer la ubicación de fallas y la magnitud de las mismas [18].

Una de las principales motivaciones para el desarrollo del monitoreo estructural está determinada por el hecho de que en un principio, todos los métodos estaban basados en inspecciones visuales o en el uso de equipamiento que requiere acceso directo a las partes bajo análisis de la estructura. Esto no es viable en muchos casos, sobre todo en edificaciones emplazadas en lugares de difícil acceso, con geometrías complejas o de gran tamaño. S. Das y P. Saha [19] realizan una revisión bibliográfica muy completa sobre la evolución temporal de las técnicas de inspección. Algunas de las técnicas tradicionales son la inspección visual, las radiografías y la termografía. Para esto último se utiliza una cámara termográfica que muestra un mapa de calor de la estructura permitiendo detectar anomalías asociadas a procesos térmicos.

Luego surgieron técnicas basadas en la emisión de señales acústicas [20], [21], [22], la radioscopia en tiempo real realizada a través de un fluoroscopio¹, métodos basados en las corrientes de Foucault para detectar daños en estructuras metálicas, entre otras [23].

En los últimos años, se extendió el uso de sensores, ya que su diseño más compacto y portátil permite realizar ensayos en distintos puntos de una misma estructura.

¹dispositivo muy costoso, que requiere de la operación de personas calificadas

1.1. Técnicas de Monitoreo Estructural

Considerando que este trabajo aborda la implementación de dos técnicas específicas de monitoreo (medición de deformación mecánica y desplazamiento relativo), se pondrá énfasis en el análisis de su evolución temporal.

1.1.1. Sensores de deformación

Según el estudio de S. Das y P. Saha [19] existen esencialmente 3 tecnologías de sensores de deformación de uso extendido en el medio: eléctricos (galgas extensiométricas, LVDT, etc.), ópticos (sensores de fibra óptica) y de cuerda vibrante. Esta última queda por fuera de este estudio, por lo cual no será analizada. Por otro lado, en el artículo también se mencionan los sensores de tipo inalámbrico que si bien no representan una clase en sí misma dado que también existen sensores inalámbricos para medir otras magnitudes, su tecnología es relevante en el desarrollo de este campo de aplicación.

Galgas Extensiométricas

Todos los materiales poseen cierto grado de elasticidad; es decir, al someterlos a una fuerza de tracción o compresión, se deforman de manera proporcional a dicha fuerza, como se observa en la figura 1.2. Cuando la fuerza desaparece, el material recupera su forma original. La magnitud de la deformación experimentada para una fuerza dada depende de la constante de proporcionalidad denominada “módulo de Young” (E) o “módulo elástico”. Dicha deformación se relaciona, por medio de la ley de Hooke, con la tensión interna o esfuerzo (*stress*) que soporta el material [24], siendo esta última precisamente la magnitud que se pretende estimar a través de la aplicación de galgas.

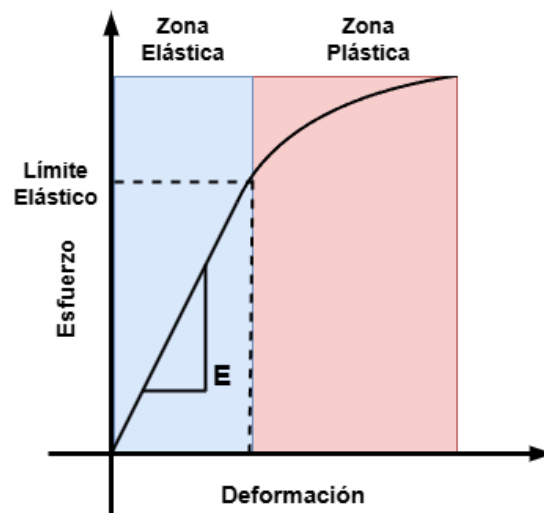


Figura 1.2: Curva de stress mecánico vs deformación de un material

Dentro de los tipos de galgas existentes, la que predomina es la galga metálica, cuyo funcionamiento se basa en el efecto piezoresistivo, es decir, que cuando la galga es sometida a una fuerza de tracción o de compresión se deforma y al deformarse produce un cambio en la resistencia eléctrica del conductor que la compone, como lo indica la fórmula $R = \rho \frac{L}{S}$ para un conductor homogéneo e isotrópico, donde ρ representa la resistividad del conductor, L su longitud y S su sección transversal.

1.1. Técnicas de Monitoreo Estructural

Su bajo costo, pequeño tamaño y fácil montaje constituyen las características más importantes de este transductor.

Se han buscado muchas alternativas a estos dispositivos con la motivación de atender necesidades diferentes. Por ejemplo, las galgas capacitivas son elementos aptos para soportar temperaturas extremadamente altas (del orden de cientos de grados centígrados), mientras que las de tipo piezoeléctrico o cerámicas son idóneas para ensayos dinámicos. Por último, existen algunos tipos menos comunes como las galgas mecánicas cuya principal característica es su gran durabilidad, pero que son muy poco utilizadas por la dificultad que conlleva acceder a las lecturas, pues las mismas se marcan sobre una placa metálica y deben observarse a través de un microscopio [25]. Las tecnologías mencionadas anteriormente y otras se exponen en la tabla 1.1.

Tabla 1.1: Tipos de galgas extensiométricas

Tipo de galga	Principio de funcionamiento	Ventajas	Desventajas
Metálicas	Cambio en la resistencia del conductor	Respuesta lineal	FG (factor de galga) bajo, alta dependencia con la temperatura y muy susceptible a la EMI
Semiconductoras	Cambio en la resistencia del semiconductor	FG alto	Respuesta no lineal
Capacitivas	Cambio en la capacidad	Soporta altas temperaturas (hasta 800°C [25])	El circuito de medida es complejo, son costosas (sobre todo cuando se requiere alta precisión en las medidas)
Piezoeléctricas	Generación de diferencia de potencial cuando se somete a un esfuerzo mecánico ([25], [26])	Respuesta rápida (aptas para ensayos dinámicos), alta sensibilidad	No aptas para mediciones estáticas (el ΔV generado no es constante en el tiempo), susceptibles a la temperatura y vibraciones externas
Foto-elásticas	Variación en índice de refracción del elemento sensor	FG hasta 3 órdenes de magnitud mayor que el de las galgas metálicas, insensible a la EMI	No es aplicable para sensor materiales opacos como los metales
Mecánicas	Marca grabada en una placa metálica	Robustes mecánica extremadamente alta	Se necesita un microscopio para leer la medida

Sensores de Fibra Óptica

El desarrollo de la fibra óptica no solo tuvo un impacto significativo en el ámbito de las telecomunicaciones, sino que también impulsó el avance en el diseño y aplicación de sensores basados en esta tecnología. Existen principalmente dos tipos de fibra óptica, los cuales se ilustran en la figura 1.3. Esta tecnología cuenta con muchas ventajas:

- Cables más pequeños y livianos que sus pares de cobre.
- Inmunidad frente a la EMI (interferencia electromagnética) y la RFI (interferencia de radiofrecuencia).
- Inmunidad frente a la corrosión (las fibras son dieléctricas).
- Bajas pérdidas en transmisión (baja disipación de potencia).
- La magnitud bajo estudio se puede medir de forma independiente en varios tramos de la fibra. Esto equivale a tener un sistema distribuido de sensores bajo el mismo cableado (es decir, la tecnología admite la multiplexación de sensores en forma sencilla).



Figura 1.3: Tipos de fibra óptica: Unimodal (arriba), Multimodal (abajo) [27]

Las características listadas hacen que esta tecnología sea idónea para empotrar sensores dentro de las estructuras, y gracias a sus bajas pérdidas y buena estabilidad en las medidas, viabilizan el monitoreo a distancia y en intervalos prolongados de tiempo.

En primer lugar, los FOS (Fiber Optic Sensors) se pueden separar en dos categorías: intrínsecos y extrínsecos. Los primeros son aquellos en los cuales la magnitud a medir se relaciona con el cambio de alguna propiedad física propia de la fibra (i.e. su índice de refracción), mientras que los segundos relacionan el mensurando con cambios externos a la fibra (i.e. un cambio en la curvatura del cable). Existen 4 propiedades de la luz que pueden ser moduladas [28]: la fase (sensor interferométrico), el estado de polarización (sensor polarimétrico), la intensidad (sensor de intensidad modulada) y la longitud de onda (sensor espectrométrico). Por lo tanto, se puede hablar de 4 tipos de sensores, según cuál de estas propiedades sea modulada.

Fiber Bragg Grating sensors

Corresponde dedicar un apartado a esta tecnología, que es la más prometedora en lo que respecta a la medición tanto de deformación como de temperatura aplicada al monitoreo estructural moderno [29].

Su funcionamiento está basado en implantar una serie periódica de alteraciones en una fibra óptica a la cual se denomina “rejilla de Bragg”, ver figura 1.4.

La fibra es expuesta a radiación en forma controlada para generar diferentes índices de refracción a lo largo de la misma. Esto provoca que actúe como un filtro selectivo ante determinadas longitudes de onda. Por lo tanto, al propagarse por ella un haz de luz blanca, existe una longitud de onda que se refleja; que se denomina longitud de onda de Bragg (λ_B) y está determinada por dos parámetros: la periodicidad espacial de la rejilla (el paso) y el índice de refracción original de la fibra.

De esta manera, cuando existen deformaciones, la rejilla se estira o se contrae haciendo variar la λ_B , y cuando hay variaciones de temperatura se modifica la periodicidad de la rejilla y también el índice de refracción de la fibra, provocando un corrimiento equivalente de λ_B hacia un lado u otro del espectro. Estas variaciones en el valor de λ_B son detectadas con ayuda de un espectrómetro [30].

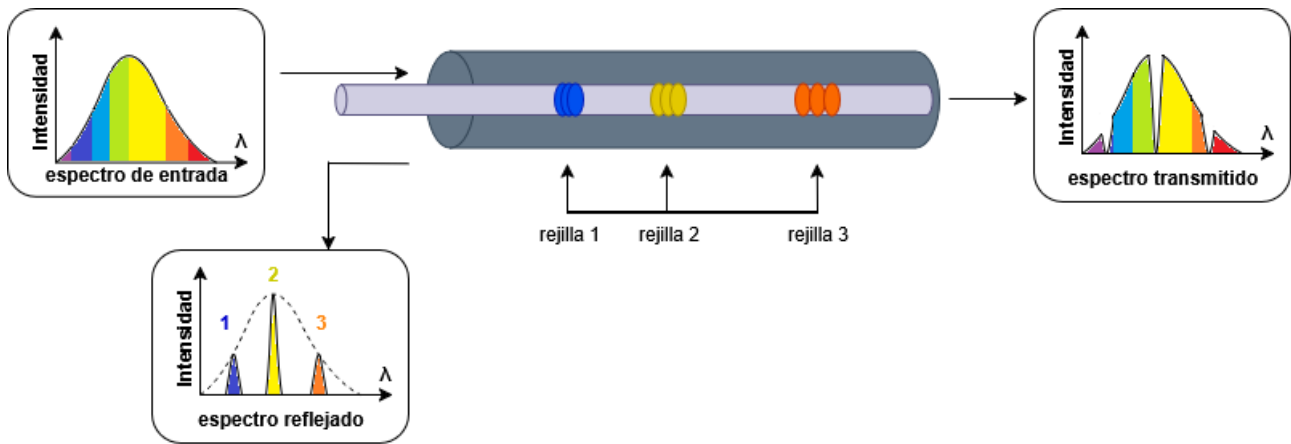


Figura 1.4: Fiber Bragg Grating principio de funcionamiento [31]

En resumen, algunos de los principales problemas que presentan los métodos tradicionales de medición de deformaciones son el cableado y la sensibilidad frente a las condiciones ambientales y la EMI. Por estos motivos el desarrollo de sensores basados en fibra óptica proporciona una solución prometedora sobre algunos de los aspectos más limitantes de las técnicas convencionales, como la alta capacidad de multiplexación de sensores emplazados sobre una misma fibra, la inmunidad ante la EMI y ante la corrosión. Estos factores la posicionan como una tecnología muy apropiada para su montaje embebido en las estructuras, reduciendo los efectos ambientales sobre los sensores y robusteciendo su sensibilidad frente a cambios en las variables estructurales de interés. En la tabla 1.2 se exponen las 4 tecnologías mencionadas.

1.1. Técnicas de Monitoreo Estructural

Tabla 1.2: Tipos de sensores de fibra óptica

Tipo de sensor	Propiedad de la luz medida	Ventajas	Desventajas
Sensor de intensidad modulada	Se basa en el monitoreo de la intensidad del haz de luz que se propaga por la fibra [28]	Simple de implementar, bajo costo, apto para multiplexación. Utiliza el método OTDR (optical time-domain reflectometry) [32] que permite sensar las pérdidas de intensidad de luz provista por la fuente (midiendo el tiempo de vuelo) a través de toda la fibra con una buena resolución espacial.	Solo realiza lecturas relativas, susceptible a fluctuaciones en la fuente de luz (si no se usa un regulador o estabilizador de la fuente)
Sensor espectrométrico (FBG)	Se graba una o varias rejillas de Bragg que actúan como un filtro para una longitud de onda determinada λ_B [29]. Las variaciones del mensurando provocan corrimientos de esta λ_B sobre el espectro, los cuales son medidos con ayuda de un espectroscopio	Gran facilidad de implementación, gran capacidad de multiplexación (se pueden generar muchas rejillas sobre la misma fibra generando un sensor quasi-distribuido)	No es muy apto para ensayos dinámicos (respuesta lenta), costo de fabricación elevado
Sensor polarimétrico	Fibra birrefringente (doble índice de refracción) que polariza el haz de luz proveniente de la fuente [33], [34]	Gran capacidad de multiplexación, fácil montaje tanto superficial como embebido en la estructura, bajo costo	Respuesta no lineal, dificultad para demodular la señal adquirida (atenuación de señal, <i>fading</i>)
Sensor interferométrico	Variación en el patrón de interferencia entre dos rayos de luz que se propagan por una fibra en concordancia con perturbaciones externas [35], [29]	Facilidad de multiplexación, respuesta lineal, bajo costo, gran sensibilidad y alta resolución, muy apto para mediciones de temperatura, presión e índices de refracción [36]	Su alta sensibilidad también lo vuelve susceptible a cambios en el entorno como vibraciones mecánicas ajenas al fenómeno bajo estudio, variaciones de la fuente de luz o variaciones térmicas

1.1. Técnicas de Monitoreo Estructural

1.1.2. Sensores de desplazamiento

Al igual que la deformación, el desplazamiento representa una variable estructural muy relevante dentro del MSE. Es una manera clásica e intuitiva de inspeccionar la operación de puentes, por ejemplo, midiendo el desplazamiento vertical del vano cuando es sometido a cargas vehiculares pesadas, como fué indicado en 0.1.

Por esta razón, se ha realizado un esfuerzo importante a lo largo del tiempo por desarrollar técnicas eficaces para su medición, tal como se indica en una exhaustiva revisión del estado del arte en esta materia realizada por Ma Zhangxiong et al. [37].

Una primera clasificación de las tecnologías existentes a tales efectos es la siguiente: métodos con contacto y métodos sin contacto. Una de las principales desventajas de la primera categoría radica en la necesidad de montar los sensores sobre plataformas auxiliares fijas. Las técnicas principales se listan en las tablas 1.3 y 1.4. Sus limitaciones motivaron el desarrollo de la segunda categoría (sin contacto), que se lista en las tablas 1.5 y 1.6. Una de las técnicas más novedosas dentro de esta categoría es la utilización de cámaras de video y de fotografía a través de las cuales se toman una serie de imágenes de la estructura bajo estudio y luego se aplica procesamiento de imágenes para extraer la información relativa al desplazamiento o la variación en la posición de puntos de referencia.

Tabla 1.3: Sensores de desplazamiento con contacto

Tipo de sensor	Principio de funcionamiento	Ventajas	Desventajas
LVDT	Se basa en un transformador con dos bobinados secundarios y un núcleo ferromagnético móvil que se desplaza solidario a la estructura. Al desplazarse el núcleo, varía el voltaje generado a la salida del dispositivo	Gran exactitud (cercanía al valor real del mensurando) y linealidad en su respuesta; Gran robustez mecánica; Resolución de movimiento teóricamente infinita (no hay contacto entre el núcleo móvil y la carcasa).	El sensor debe instalarse sobre una plataforma auxiliar. Se debe asegurar que la plataforma esté fija, pues las vibraciones afectan las medidas del sensor
Acelerómetros	Miden el movimiento relativo de una masa interna respecto a la carcasa del dispositivo	Facilidad de instalación y bajo costo computacional	Las medidas presentan mucho ruido en baja frecuencia (frecuencias a las cuales vibran las estructuras) y el error obtenido del proceso de integración de la aceleración para obtener el desplazamiento es significativo.
Inclinómetros	A través de la relación entre desplazamiento angular y lineal ($\theta(x) = \frac{du(x)}{dx}$) se puede hallar el desplazamiento lineal de la estructura midiendo la variación del ángulo de inclinación	Aptos para ensayos dinámicos	Se deben instalar muchos sensores para medir el movimiento de rotación de una región de la estructura bajo estudio y no se ha conseguido buena exactitud en las medidas hasta el momento, especialmente en baja frecuencia

1.1. Técnicas de Monitoreo Estructural

Tabla 1.4: Sensores de desplazamiento con contacto, continuación

Tipo de sensor	Principio de funcionamiento	Ventajas	Desventajas
Sensores de deformación	Utilizan el algoritmo de “superposición de modo” [38]	Fácil montaje; otras ventajas dependen del sensor elegido	Requiere conocimiento previo de las formas modales y del eje neutro de la estructura bajo estudio [37]
Sistema de cañerías con medición de presión (CPS)	El método se basa en colocar una cañería con un fluido a lo largo de la estructura y medir la presión en distintos puntos de la misma [39], [40]	No se ve afectado fuertemente por condiciones ambientales	Montaje complejo; solo mide desplazamiento vertical
Sistema de navegación global por satélite (GNSS)	Un satélite envía su posición periódicamente a un receptor. Se calcula la posición del punto de interés de la estructura y se compara con los datos recibidos del satélite [41]	Permite medir el desplazamiento de la estructura en todas las direcciones; bajo costo computacional (ecuaciones sencillas)	Baja exactitud (5–8 mm, usando la técnica RTK [42]); muy susceptible a condiciones meteorológicas (nubosidad y lluvia); baja velocidad de muestreo (10 Hz), lo cual lo vuelve no apto para ensayos dinámicos

1.1. Técnicas de Monitoreo Estructural

Tabla 1.5: Sensores de desplazamiento sin contacto

Tipo de sensor	Principio de funcionamiento	Ventajas	Desventajas
Visión por cámara	A través de una cámara de fotos o de video se realizan capturas de la estructura bajo análisis. Luego, aplicando procesamiento de imágenes, se extrae la información que permite estimar el desplazamiento de la estructura	Actualmente existen cámaras con muy alta resolución y configuraciones avanzadas de parámetros (nivel de exposición, apertura del lente, balance de blancos, etc.) a costos accesibles	Se requiere instalar la cámara en un punto fijo respecto a la estructura bajo estudio (este problema puede resolverse siguiendo un punto fijo con la cámara además de tomar las imágenes de la estructura) [43]. El método tiene un alto costo computacional, lo cual dificulta el seguimiento en tiempo real
Radar	Emite una señal de FM que se refleja en los puntos “objetivo”. La señal reflejada es captada y demodulada por el radar, obteniendo la distancia entre este y el punto “objetivo” a partir de la fase o la frecuencia de la señal recibida [37]	Permite medir el desplazamiento de muchos puntos de la estructura al mismo tiempo	Debe ser instalado sobre un emplazamiento fijo respecto a la estructura bajo estudio
LDV	A través de una fuente de luz se emite un haz (láser) sinusoidal. Este se refleja contra el punto “objetivo” de la estructura y se capta el rayo reflejado a través de un receptor. La información de la distancia se obtiene del desfase entre el rayo incidente y el rayo reflejado ($d = \frac{cT}{4\pi} \Delta\phi$)	La extracción de la distancia entre la fuente y el punto de interés sobre la estructura es sencilla	Se debe montar en un emplazamiento fijo respecto a la estructura. El equipamiento es costoso, por lo cual se vuelve poco viable para monitoreo durante períodos de tiempo largos (por riesgo de vandalismo). Cuanto más lejano sea el emplazamiento del láser, mayor debe ser su potencia, lo cual representa un potencial riesgo para las personas. Para que las medidas sean precisas se debe colocar un reflector en la estructura y el rayo debe incidir de forma ortogonal a él

1.1. Técnicas de Monitoreo Estructural

Tabla 1.6: Sensores de desplazamiento sin contacto, continuación

Tipo de sensor	Principio de funcionamiento	Ventajas	Desventajas
LTS	Una fuente óptica emite un haz de luz láser hacia el objeto a medir. La luz reflejada incide sobre un detector. A través del ángulo de incidencia se calcula la distancia al objeto, utilizando principios geométricos de triangulación	Alta precisión y rapidez de respuesta	Solo tiene una precisión adecuada cuando la distancia entre el láser y el punto de interés es corta (desde 1 mm a un par de metros); equipamiento costoso; susceptible a condiciones ambientales
LiDAR	Una fuente de luz emite un pulso láser que se refleja en el punto de interés y la onda reflejada es captada por un detector. El desplazamiento se calcula a través del tiempo que emplea el pulso en llegar al detector	Mide el desplazamiento en las 3 direcciones cardinales; costo computacional bajo	Baja exactitud en comparación con las demás tecnologías (2–3 cm de error). Existen sistemas de este tipo con mayor precisión, pero son costosos
Estación total (TS)	Emite un haz de luz que se refleja sobre una superficie colocada en el punto de interés de la estructura. Luego, a través de la distancia a la superficie y el ángulo del haz respecto a la línea horizontal, se calcula la distancia usando trigonometría [44]	Mide desplazamiento vertical y horizontal; buena precisión (en el orden de mm); bajo costo computacional	Baja velocidad de muestreo; no apto para mediciones prolongadas (por riesgo de vandalismo); susceptible a vibraciones de su punto de anclaje

1.2. Sensores Inalámbricos

Uno de los mayores problemas a la hora de instrumentar las estructuras es el sobre costo que adiciona el cableado, sobre todo cuando se trata de estructuras de gran tamaño, geometrías complejas y accesibilidad limitada. En respuesta a este problema surgieron los sistemas de MSE inalámbricos. Este enfoque proporcionó facilidades de implementación y reducción de costos pero originó un nuevo problema: la vida útil de las baterías. En efecto, la gran limitación de las RSI² se halla en el costo que conlleva el recambio o la recarga de las baterías de los nodos. Esto, a su vez, dio lugar al surgimiento de un nuevo campo de investigación: los “métodos de extracción de energía”. En el período 2004–2015, el número de investigaciones en esta área creció sustancialmente, en la búsqueda de fuentes de energía sostenibles y técnicas de extracción eficientes [45]. En el artículo citado se mencionan cinco grupos de fuentes: solar, eólica, vibraciones, térmica y RF. Esta última consiste en captar la energía emitida por estaciones de radio, TV, radiobases GSM y WiFi, entre otras, a través de antenas de distinta clase. Esta tecnología presenta la gran ventaja de no estar sujeta a las condiciones ambientales, lo cual representa un aspecto importante en la implementación de redes para MSE.

Cabe mencionar que resulta de gran interés para la comunidad científica la optimización del método de extracción de energía basado en las vibraciones mecánicas de las estructuras, sobre todo en el caso de puentes, ya que estos, al estar sometidos al tráfico vehicular, naturalmente generan energía vibratoria [46], [47].

En lo que respecta a los sensores, en la última década se ha investigado en tres tipos de tecnologías: sensores alimentados con baterías, sensores que obtienen su energía de la señal de control o interrogación (sensores RF pasivos), y sensores que obtienen energía de la propia variación de la magnitud a medir (e.g., vibración mecánica) [48]. Los tres casos se ilustran en la figura 1.5.

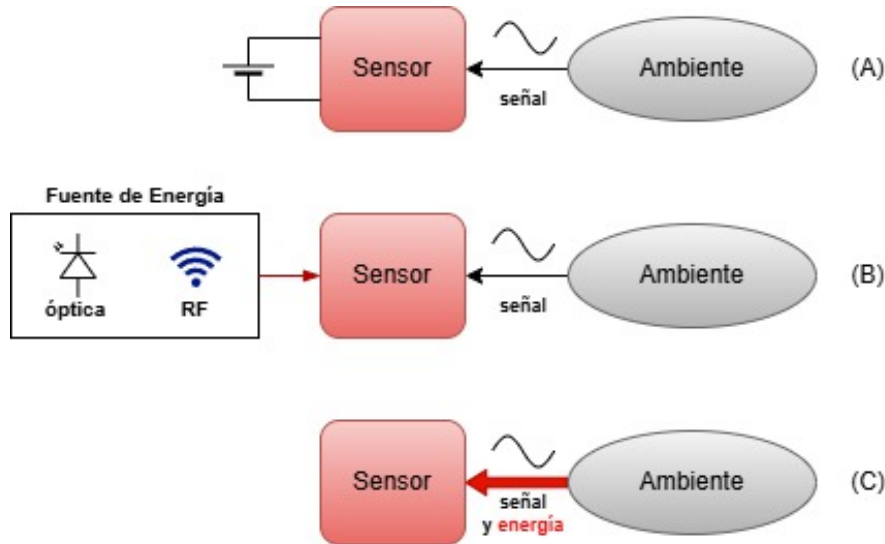


Figura 1.5: (A) Sensores inalámbricos convencionales. (B) Sensores que adquieren energía de la señal de control. (C) Sensores que adquieren energía de la variación de la magnitud que deben medir.

²Red de sensores Inalámbrica

1.3. Implementación de Redes de Monitoreo y Control Estructural

El avance del IoT³, tanto en el campo de las tecnologías emergentes de sensores como en las tecnologías de transmisión inalámbricas, ha dado lugar al desarrollo de sistemas de monitoreo estructural basados no solo en redes inalámbricas de sensores, sino en sistemas inteligentes capaces de autogestionarse (ver figura 1.6). En esa dirección apuntan las investigaciones más recientes, tal como expresan Lamonaca et al. [49].

Una de las interrogantes que aún subsiste es: ¿cuál es la arquitectura óptima para los sistemas de monitoreo estructural?; algunos estudios plantean la confección de redes de sensores distribuidos donde cada nodo actúa como un agente inteligente capaz de tomar decisiones en base a la información que proporcionan los sensores bajo su control [50], [51]. De esta manera, cada agente puede controlar independientemente una región o un aspecto específico de la estructura. Además, pueden interconectarse para alcanzar objetivos comunes, tomando decisiones a nivel local o global, según la necesidad. Esta discusión está directamente relacionada con la escalabilidad de los sistemas. Se debe tener en cuenta que para monitorear una estructura de gran porte se necesitan cientos de sensores. La naturaleza de las fallas es muy diversa, y estas pueden estar localizadas en cierta región sin que otras zonas presenten señales o anomalías cuantificables de su existencia. Esto refuerza la concepción planteada anteriormente de sistemas que realizan procesamiento in-situ y, en base a los resultados, verifican la presencia de daños.

El último paso en la búsqueda de la construcción de estructuras inteligentes es la integración de los sistemas de monitoreo con sistemas de control estructural. Bajo este enfoque se puede contar con un sistema cerrado que integre tanto sensores como actuadores. Por ejemplo, utilizando amortiguadores que ejerzan fuerzas compensatorias variables según las necesidades de cada caso, tal como plantea Sajad Javadinasab et al. [46].

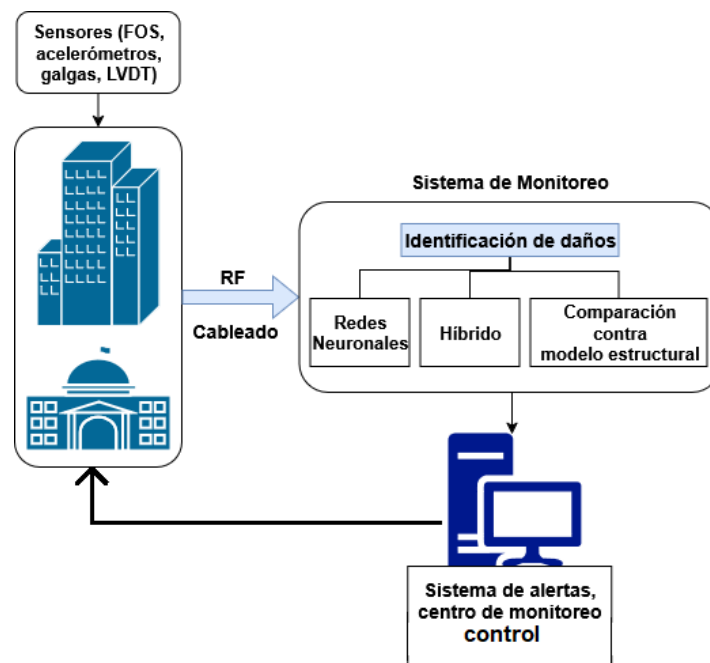


Figura 1.6: Sistema de monitoreo estructural convencional.

³Internet of Things

Capítulo 2

Descripción del sistema

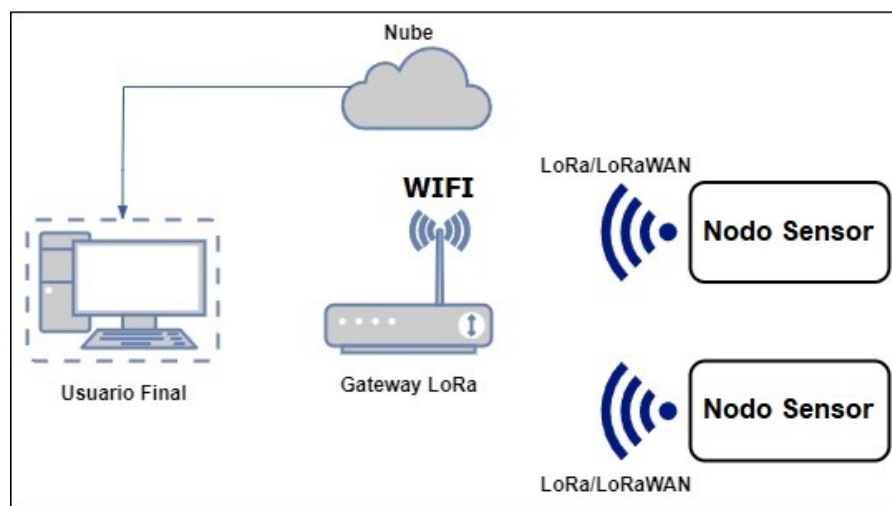


Figura 2.1: Diagrama de bloques - sistema

El sistema desarrollado consiste en una red de sensores inalámbricos cuya tecnología de transmisión de datos es LoRaWAN. La figura 2.1 ilustra un diagrama de bloques del sistema, el cual se compone por dos nodos. Cada uno de ellos posee un sensor encargado de medir una magnitud estructural de interés (desplazamiento y deformación).

Estos nodos realizan mediciones en forma periódica, con un intervalo de tiempo configurable remotamente por el usuario. Una vez tomada la medida, el nodo envía el dato correspondiente junto con los parámetros de configuración actuales a una puerta de enlace (*gateway*) TTIG (The Things Indoor Gateway), modelo TBHM100. Esta recibe los mensajes y los reenvía mediante el protocolo TCP/IP (protocolo estándar de comunicación en internet) al servidor de red utilizado, que en este caso es *The Things Network* (TTN). Una vez que los datos llegan al servidor, este ejecuta un script que los estructura según el formato *JavaScript Object Notation* (JSON), un estándar ampliamente adoptado para el intercambio de datos entre aplicaciones web y APIs.

Una vez que los datos son procesados en el servidor de red son finalmente transmitidos a una interfaz gráfica de usuario, desarrollada mediante la aplicación web TagIO que proporciona un (*Front-End*) sencillo de utilizar y configurar. Allí, el usuario puede monitorear la evolución temporal de las variables medidas y ajustar remotamente los parámetros operativos de los nodos (la interfaz se muestra en la

figura 2.6).

Dado que se pretende aplicar el sistema al monitoreo de salud estructural de obras civiles, la tecnología de comunicación implementada resulta de vital importancia. Se requiere que la comunicación entre los nodos y la aplicación web que despliega los datos sea inalámbrica y de largo alcance, ya que en muchas ocasiones las estructuras bajo estudio se encuentran emplazadas en lugares remotos, de acceso restringido o lejos de cualquier radiobase. Otro aspecto igualmente importante, por las mismas razones, es la autonomía energética de los nodos, los cuales son alimentados por baterías. No obstante, la optimización del consumo energético no constituye un objetivo central de este trabajo.

2.1. Nodos de Red

Los nodos de red integran a cada sensor junto con la electrónica de acondicionamiento correspondiente y un módulo de radio LoRaWAN¹, como se observa en la figura 2.2. Este módulo se encuentra incluido en una placa de desarrollo Arduino MKRWAN 1310 [52], la cual se encarga tanto de disparar las medidas como de gestionar la transmisión de las mismas hacia el *Gateway*. La transmisión de los datos se realiza utilizando una antena omnidireccional flexible marca Molex, modelo 211140, ilustrada en la figura 2.3.

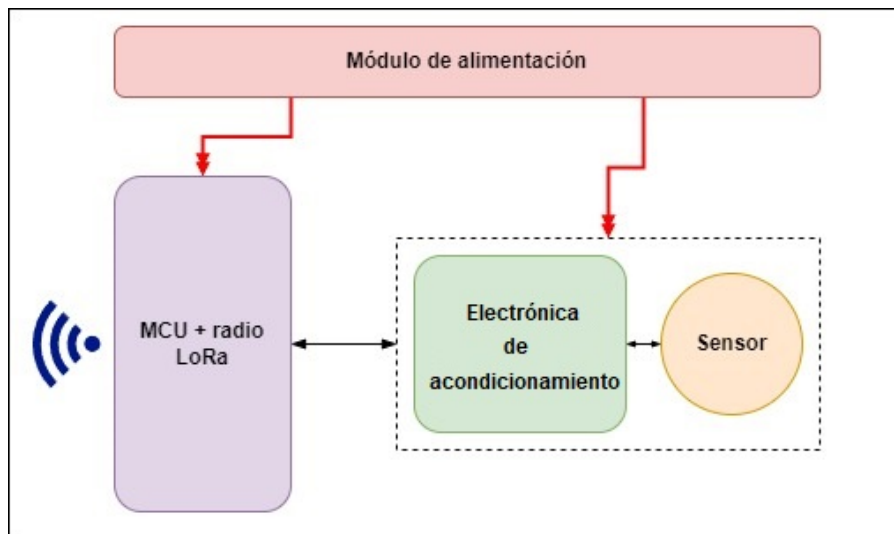


Figura 2.2: Diagrama de bloques - Nodo de Red.



Figura 2.3: Antena omnidireccional, flexible Molex.

¹Este concepto se desarrollará en el capítulo 3

2.1. Nodos de Red

El componente central de los nodos es la placa Arduino MKRWAN 1310, ver figura 2.4. Esta incluye entre sus componentes más relevantes: un microcontrolador (MCU) de bajo consumo SAMD21 Cortex®-M0+, de 32bit y arquitectura ARM, un módulo LoRa (Chip Murata CMWX1ZZABZ) con una sensibilidad máxima de -135dBm, apta para Transmisión/Recepción en las bandas ISM 433MHz, 868MHz y 915MHz, un conector UFL para antena de RF, un módulo BQ24195L de Texas Instruments para la gestión de carga/descarga de baterías Li-ION, un conector JST para la conexión de una batería de 3.7V, LEDs de *status* (ON-OFF, carga de batería) y un chip de encriptación de datos modelo ATECC508A.

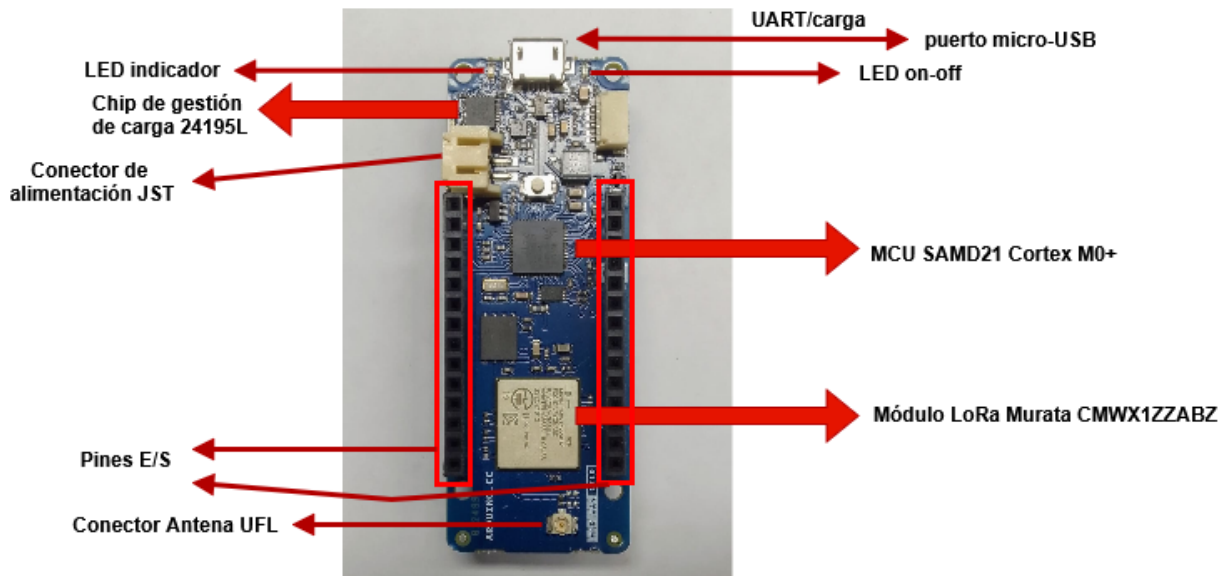


Figura 2.4: Arduino MKRWAN 1310.

2.1.1. Operación de los nodos

El intervalo de tiempo entre medidas es fijado por defecto en 2 minutos. Este parámetro es configurable a nivel de usuario a través del *dashboard* desarrollado en TagoIO. Antes de que transcurra este tiempo el nodo se mantiene en un estado de bajo consumo. Para esto se programa un timer interno de la placa Arduino que activa el sistema luego de este lapso y dispara una serie de medidas del sensor conectado al nodo. Otro de los parámetros configurables es precisamente el número de mediciones tomadas. Las mismas serán promediadas para ganar robustez frente a valores espurios y luego serán transmitidas hacia el *gateway*.

El firmware que ejecutado por los nodos durante el proceso de toma de muestras, transmisión y recepción de mensajes hacia y desde la red se ilustra a través del diagrama de flujo observado en la figura 2.5. En términos generales es igual para todos los nodos.

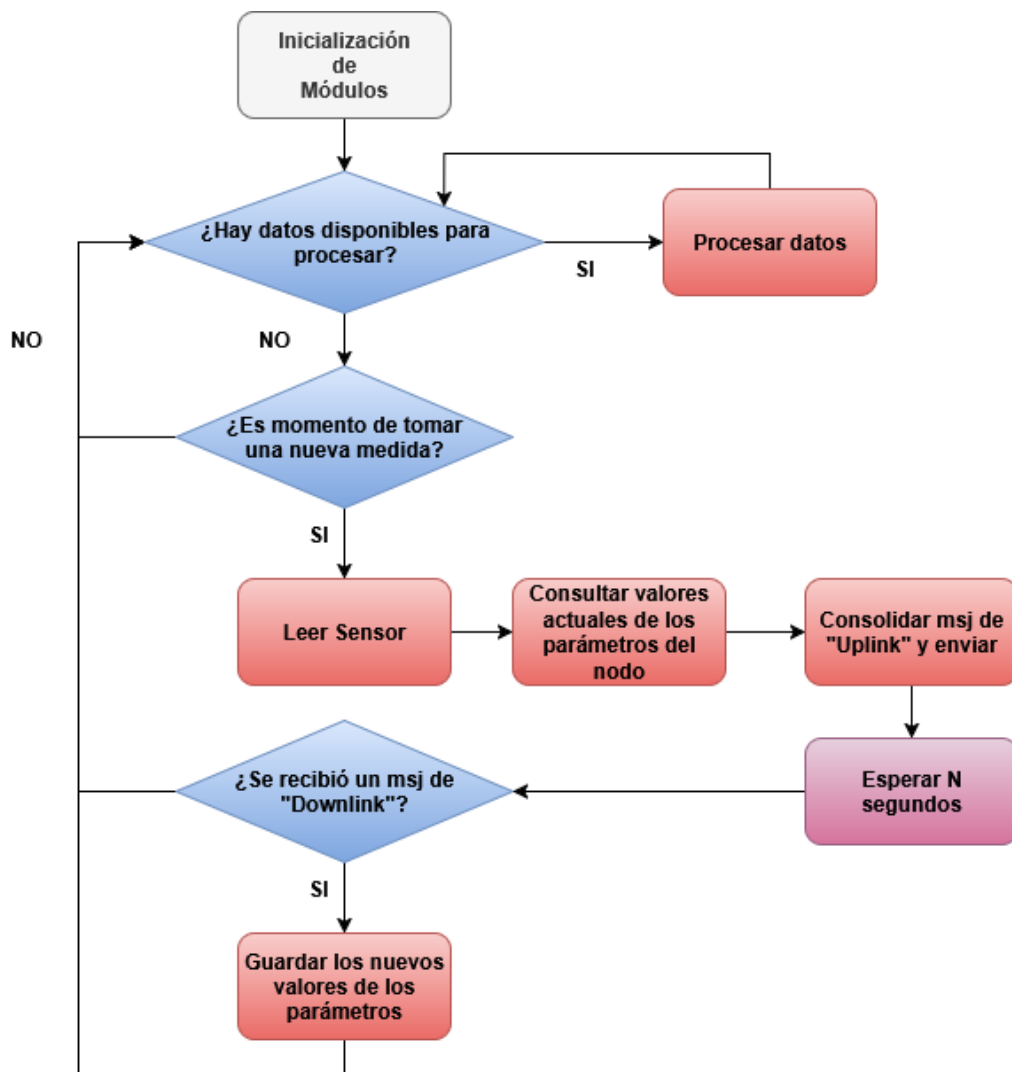


Figura 2.5: Diagrama de flujo correspondiente al firmware ejecutado por Arduino MKRWAN 1310.

Nodo sensor de desplazamiento

Este nodo se encuentra implementado a partir de un sensor de desplazamientos de tipo inductivo, un LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) de 6 hilos², modelo HR1000 desarrollado por el fabricante TE Connectivity [53].

El LVDT está constituido por un transformador con un bobinado primario y dos secundarios idénticos. A su vez posee un núcleo ferromagnético que se mueve libremente sobre el eje longitudinal interior de los devanados. La respuesta del sensor es tal que la diferencia de voltaje entre ambos secundarios es lineal respecto a la posición del núcleo medida desde el centro de los bobinados. De esta manera si se adosa el núcleo al elemento estructural que se desea estudiar, sus desplazamientos serán solidarios a él y el sensor registrará los cambios en la posición.

Nodo sensor de deformaciones

Para la medición de deformaciones se utilizan galgas extensiométricas metálicas del fabricante KYOWA [54]. Estos sensores están constituidos por unos pocos filamentos de material conductor que se deforman de manera solidaria al sustrato o material base sobre el cual son montadas, variando su resistencia eléctrica. En particular, las galgas implementadas para este trabajo son de tipo uniaxial, es decir, que solo se deforman ante fuerzas de tracción o de compresión. Para medir estos cambios en la resistencia son conectadas a un puente de medida o puente de Wheatstone en alguna de las configuraciones básicas como cuarto-puente, medio-puente o puente-completo. Estas configuraciones denotan el número de transductores activos en el circuito. Tanto el montaje en la estructura como su conexión en el circuito de medida son relevantes para determinar la magnitud de la respuesta proporcionada por el transductor. Dado que las variaciones registradas en la resistencia son muy pequeñas, la adquisición de la señal resultante debe ser muy precisa, lo cual lleva a la utilización de un circuito integrado que permite adquirir voltajes muy pequeños, integrado en el módulo HX711 [55]. Este módulo toma la señal del puente de medida y la transmite a la placa Arduino donde el voltaje es escalado según la configuración de puente utilizada y transmitido hacia el *gateway*.

2.2. Interfaz de usuario

La interfaz de usuario es desarrollada en la plataforma TagoIO. La misma proporciona un registro en tiempo real de los datos adquiridos por los sensores como se observa en la imagen 2.6. Allí se presentan dos gráficas: una para las medidas de desplazamiento en función del tiempo y otra para la medida de deformación y temperatura en función del tiempo. A su vez, se tienen dos formularios (uno por cada nodo), en los cuales se pueden editar los parámetros de configuración para cada nodo tales como: intervalo entre medidas (en segundos, minutos u horas), el número de lecturas promediadas antes de transmitir el nuevo valor medido por los sensores y, en el caso del nodo de deformaciones, la configuración de conexión de las galgas al puente de medida (que puede tomar 3 valores: “CUARTO_PUENTE”, “MEDIO_PUENTE” y “PUENTE_COMPLETO”). Este tercer parámetro indica al Arduino cuál es el factor de escala que se debe usar para el voltaje de salida del puente.

La interfaz también permite descargar los datos visualizados en formato CSV (*comma separated values*) para su procesamiento y análisis.

²Modelo de transductor con los 6 bornes accesibles. Los 2 del bobinado primario y los 4 correspondientes a ambos secundarios

2.2. Interfaz de usuario

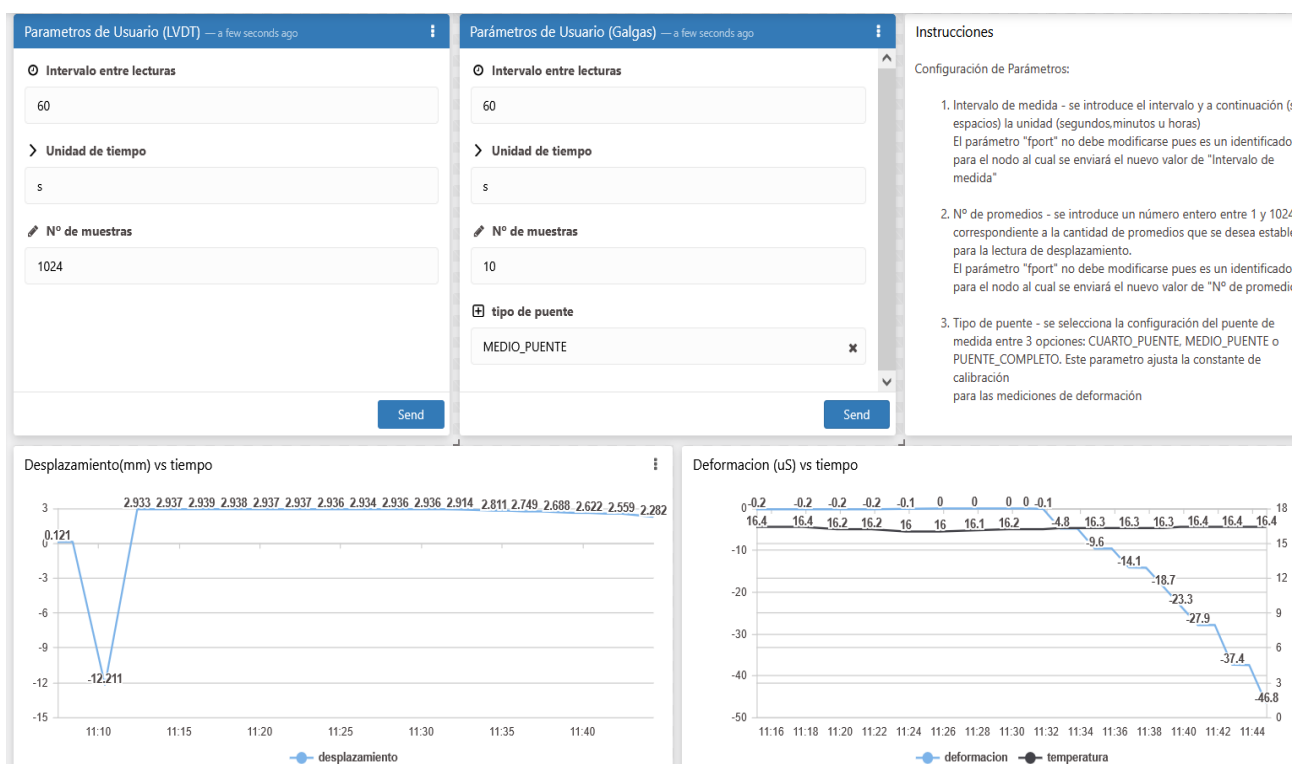


Figura 2.6: Interfaz de usuario

Capítulo 3

Red de Datos

La red de sensores implementada utiliza tecnología de conectividad LoRaWAN. Consta de dos nodos sensores, un *gateway*¹, un servidor de red, un servidor de aplicación y una interfaz gráfica para visualizar los datos y/o descargarlos para su procesamiento posterior. La topología de la red se denomina como “estrella de estrellas” pues los nodos transmiten a varios *gateways* a la vez y al recibir cualquier mensaje estos últimos retransmiten al servidor de red. Por lo tanto este último constituye uno de los puntos de acumulación de la red, al igual que cada *gateway*.

3.1. Tecnologías LPWAN

Las tecnologías LPWAN surgieron como una solución eficiente a las comunicaciones efectuadas en el área de aplicación del IoT (Internet of Things) [56]. El objetivo principal de este tipo de tecnología es reducir al mínimo el consumo de energía de los nodos y maximizar el área de cobertura. Cada dispositivo puede estar separado por una distancia considerable de la radiobase y de otros nodos con los cuales deba comunicarse (desde varios metros hasta algunos kms). De estos dos aspectos deriva el nombre de la tecnología “LPWAN” (Low Power Wide Area Network). Naturalmente aumentar el área de cobertura implica una mayor longitud de onda, lo cual reduce la velocidad de transmisión de datos dado que se requiere más tiempo para la transmisión de cada símbolo. Por esta razón el ancho de banda para estas tecnologías suele ser limitado ya que en otro caso el canal de comunicación se vería congestionado fácilmente. Dos de las tecnologías LPWAN más extendidas son LoRaWAN y Sigfox que funcionan en bandas no licenciadas del espectro específicamente, en las bandas ISM (espectro destinado a la transmisión de datos para uso Industrial, Científico o Médico). Estos segmentos del espectro radioeléctrico están destinados a la transmisión de datos con los fines mencionados. Por ejemplo: los microondas, los controles remotos, las llaves de autos, los enchufes inteligentes (*smart-switches*) transmiten información en estas bandas de frecuencia.

Abhaykumar Kumbhar [57] realiza un estudio sobre dichas bandas en el cual describe sus características, ventajas, desventajas y el nivel de congestión de cada banda. Por ejemplo, la banda centrada en 2.4GHz es muy utilizada para intercambio de datos vía WiFi, Bluetooth o ZigBee.

Dado que son varios los propósitos con los cuales son utilizados estos segmentos del espectro y a su vez son aún más los dispositivos que los utilizan, la UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones) se encarga de dictar regulaciones regionales. Una de ellas es el tiempo de acceso al medio, regulado por el parámetro ToA (Time on Air) que hace referencia al tiempo máximo que un dispositivo puede

¹puerta de enlace

3.1. Tecnologías LPWAN

estar transmitiendo. También se puede regular de forma equivalente estableciendo un valor máximo para el ciclo de trabajo (DC -Duty Cycle-) de un dispositivo cualquiera, es decir el tiempo que está transmitiendo sobre el tiempo total (transmisión + reposo).

Hoy en día existen varias tecnologías LPWAN, cada una con sus defectos y sus virtudes como se establece en el estudio realizado por Mohammad & Jan [58]. Lo que puede concluirse del mencionado artículo es que cada tecnología es la óptima en ciertos escenarios, es decir que resultan ser complementarias unas de otras. Por ejemplo, LoRaWAN es la más adecuada para redes con baja densidad de dispositivos y baja actividad (baja tasa de transmisión de datos respecto al tiempo) tanto en zonas rurales como urbanas. En el caso contrario (redes con alta demanda de datos) lo óptimo es la utilización de LTE-M (Long-Term Evolution for Machines) que funciona sobre la infraestructura de red montada para LTE (utiliza los mismos dispositivos).

En las tablas 3.1 y 3.2 tomadas de [58] se pueden observar las características que tiene cada tecnología y el área de cobertura asociada a cada una (dependiendo del emplazamiento de los nodos y el gateway) en entornos rurales y urbanos.

Tabla 3.1: LPWAN - características de cada tecnología. Tabla extraída de [58]

	SigFox	LoRaWAN	NB-IoT	LTE-M
Banda de Frecuencia (MHz) ²	868	868	868	700
Ancho de banda (kHz)	200	1175	180	1080
Sub-banda BW (Hz)	100	125k	15k	18k
Espacio entre canales (kHz)	0	200	3.75	15
Modulación	D-BPSK	FSS/CSS	OFDMA	OFDMA
Sensibilidad del receptor (dBm)	164	154	150	146
Capacidad de dispositivos por celda ³	100k	10k	40k	50k
Downlink payload (Bytes)	8	14	125	1k
Uplink payload (Bytes)	12	51	125	1k
Data Rate (bps)	100	1760	50k	1000k
Ciclo de trabajo/Restricción Tx	140msg/day	1 %	—	—
Bi-direccional	HD ⁴	HD	HD	FDD ⁵ ,TDD ⁶ ,HD

²Banda no licenciada del espectro (ISM) en Europa.

³Se refiere a la cantidad de nodos por área de cobertura que admite la red sin degradar su funcionamiento.

⁴HD (Half Duplex).

⁵FDD (Frequency division duplex).

⁶TDD (Time division duplex).

⁷SF (Spread Factor). Es un parámetro de configuración utilizado por la modulación LoRa que denota el factor de ensanchamiento de la señal a transmitir. Se profundizará sobre este concepto en la sección 3.2.2.

Tabla 3.2: LPWAN - área de cobertura de cada tecnología. Tabla extraída de [58]

	Ciudad Cobertura(km^2)	Rural Cobertura(km^2)
SigFox	1.296662	36.47679
LoRaWAN, SF=9 ⁷	0.570355	18.57258
NB-IoT	0.69244	24.33866
LTE-M	0.466199	15.49615
EC-GSM	0.430936	16.08256

3.2. LoRaWAN

3.2.1. ¿Por qué LoRaWAN?

La red que se desea montar es en principio para propósitos académicos por lo cual los principales requerimientos que tiene se listan a continuación:

- Baja densidad de dispositivos o nodos: por tratarse de una red para monitoreo de estructuras con propósitos académicos. La red a desplegar constituye una prueba de concepto para evaluar su funcionamiento y dinámicas. Para esto basta con la implementación de unos pocos sensores (0 a 5), sin perjuicio de que luego se agreguen más.
- Baja cadencia de datos: El principal objetivo de la red es monitorear los procesos de cambio de algunas magnitudes de interés en elementos estructurales. Teniendo en cuenta que los procesos de variación o degradación de las estructuras son en general cuasiestáticos, no resulta necesario el intercambio de datos en forma continua. Por el contrario, es suficiente con la ejecución de unas pocas mediciones por hora. Para dar contexto, la transmisión de 36 tramas/h, de 1 seg de duración (1 trama cada 1.67 minutos) representa un Ciclo de Trabajo (DC) de 1 %. Este aspecto es acorde con las posibles limitaciones que la tecnología puede presentar en cuanto a ToA o DC, a la hora de desplegar la red.
- El volumen de datos a transmitir también es pequeño, solo se debe transmitir el nombre y el valor de la magnitud relevada, aunque también es deseable transmitir datos de control, como los que se listan en el apéndice B. En primera aproximación se estima que el tamaño de la carga útil (*payload*) de las tramas no supera los 30 Bytes. Esto descarta el uso de tecnologías como LTE-M, más orientada a la transmisión de datos con gran ancho de banda.

Si bien las conclusiones obtenidas por M. I. Hossain and J. I. Markendahl [58] tienen una mirada empresarial, es decir que la solución óptima hace referencia a aquella con mayor rentabilidad económica para empresas que se insertan en un escenario de mercado competitivo o que pretenden capturar un mercado todavía inexistente, hay conclusiones igualmente pertinentes en lo que respecta a una red de sensores enfocada en cubrir necesidades académicas como la que se describe en este trabajo. Como se expresa en el referido artículo, LoRaWAN ofrece una gran facilidad para montar redes con baja densidad de dispositivos y baja demanda de datos. En lo que respecta al montaje de una red aplicada al MSE hay dos aspectos que resultan muy importantes para decidir por una tecnología sobre las demás. Ya que ni la Facultad de Ingeniería (FING), ni el Instituto de Estructuras y Transporte (IET) de la misma institución, cuentan con una infraestructura de red aplicada a IoT, su despliegue se debe realizar desde cero. A tales efectos, LoRaWAN corre con la ventaja que implica la sencillez de instalación y

configuración de sus nodos (*end devices*) y de los Gateways (*Packet Forwarders*). Adicionalmente, el monitoreo de estructuras no exige una alta cadencia de transmisión de datos, escenario en el que LoRaWAN también saca ventaja sobre el resto de las tecnologías. Bajo estas dos premisas se concluye que LoRaWAN es la solución óptima en este caso.

3.2.2. Características de LoRaWAN

Lo primero que hay que saber sobre esta tecnología es que constituye un protocolo de capa MAC (*Media Access Control*) implementado sobre la modulación LoRa que opera en la capa física según el modelo de red OSI [59]. Esta tecnología emplea la modulación de espectro ensanchado *Chirp Spread Spectrum* (CSS) [60], propiedad de la empresa Semtech desde 2012. Los principales atributos de esta modulación son su largo alcance, robustez frente al ruido y la EMI, como lo expresan Reynders, B. y Pollin, S [61]. En ese mismo estudio se concluye que la modulación de espectro ensanchado es superada por la modulación de ancho de banda angosto (e.g. NB IoT) si se tiene en cuenta el uso eficiente del espectro. En el escenario planteado para el presente trabajo esto no representa una prioridad, ya que la cantidad de nodos es baja y se puede transmitir en varios canales de cada sub-banda de frecuencia, o multiplexando por codificación (variando el factor de ensanchamiento) aunque es un aspecto a tener en cuenta si la cantidad de dispositivos comienza a aumentar. La cantidad de nodos soportada por la red dependerá del intervalo de tiempo entre lecturas sucesivas. Mientras más de uno no intente transmitir a la misma vez con el mismo SF y sub-banda, no habrá problemas. De otro modo se dará lugar a la colisión de paquetes, lo cual ocasionará una consecuente caída de la tasa de recepción de mensajes.

Parámetros de transmisión

Al utilizar una modulación de espectro ensanchado por chirp (CSS), LoRaWAN incorpora el parámetro de transmisión *Spread Factor*, el cual determina la duración de cada símbolo transmitido. Este parámetro puede tomar valores enteros del 7 al 12. Un mayor valor de SF incrementa la duración del símbolo, lo que se traduce en una menor velocidad de transmisión y un mayor ToA, pero aumenta la robustez ante interferencias y el alcance. Por otro lado, se debe tener en cuenta que las regulaciones regionales para redes LoRaWAN establecen restricciones sobre el ancho de banda (BW) de cada mensaje a transmitir.

La combinación de SF y BW define un tercer parámetro de transmisión denominado Data Rate (DR) que toma valores enteros entre 0 y 13 según los valores de SF y de BW utilizados.

Finalmente, el parámetro *Coding Rate* (CR) introduce redundancia en los datos transmitidos mediante técnicas de corrección directa de errores (FEC) [62]. Se expresa como una fracción n/N , donde n es la cantidad de bits útiles y N el total de bits transmitidos. Los valores típicos de CR en LoRaWAN son $4/5$, $4/6$ y $4/7$. Un valor de CR mayor implica mayor redundancia, lo cual mejora la fiabilidad de la recepción pero también incrementa el ToA.

La sub-banda ISM utilizada por LoRaWAN en regiones como América Latina y Australia se denomina AU915, y abarca desde los 915 MHz hasta los 928 MHz, la misma se ilustra en la figura 3.1. Si bien en estas regiones no existen restricciones legales estrictas en cuanto a los valores de ToA o DC, sí se establecen requisitos técnicos específicos relacionados con las sub-bandas de frecuencia utilizadas, el BW de los mensajes y los DR [63].

- *upstream* (paquetes del nodo al Servidor): 64 canales (nombrados como 0- 63) centrados cada 200 kHz, con un ancho de banda de 125 kHz, un DR=0-5 y un CR=4/5, comenzando desde 915.2 MHz hasta 927.8 MHz

3.2. LoRaWAN

- *upstream*: 8 canales (nombrados como 64-71) centrados cada 1.6MHz, con un ancho de banda de 500kHz y un DR=6, comenzando desde 915.9 MHz hasta 927.1 MHz
- *downstream* (paquetes desde el Servidor al nodo): 8 canales (nombrados como 0-7) centrados cada 600kHz, con un ancho de banda de 500kHz y un DR=8-13, comenzando desde 923.3 MHz hasta 927.5 MHz

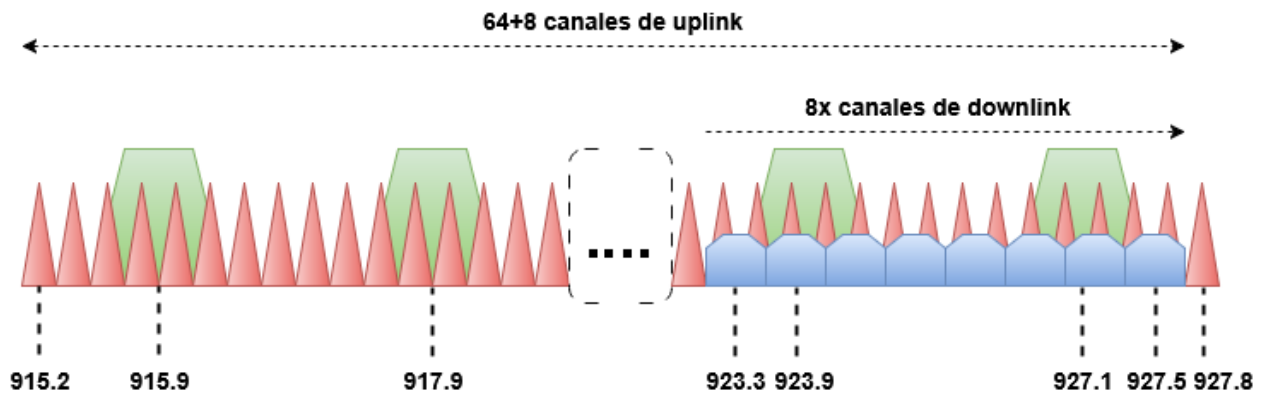


Figura 3.1: Banda de frecuencia AU915. En rojo y verde se ilustran los canales de *upstream*. En celeste se observan los canales de *downstream*

3.2.3. Arquitectura de Red

Las redes LoRaWAN presentan una arquitectura denominada “estrella de estrellas” en la cual los nodos transmiten sus mensajes al *gateway* más cercano. Sin embargo, cualquier *gateway* que este al alcance de un nodo que transmite datos recibirá esta información y la retransmitirá al servidor de red central. Por lo tanto se tiene una estrella centrada sobre el servidor de red y otras estrellas a un nivel más periférico, centradas sobre cada *gateway*. La mencionada arquitectura se ilustra en la figura 3.2. Un aspecto importante es que cada nodo transmite sus mensajes en cualquier momento sin que exista ningún tipo de control sobre el acceso al canal de comunicación o de multiplexación del mismo para dividir su uso. Esta forma libre de utilizar el canal por parte de los dispositivos finales (nodos) se basa en el protocolo ALOHA [64] y una de sus grandes desventajas es que si el número de dispositivos transmitiendo en forma simultánea comienza a crecer se produzcan colisiones entre paquetes de datos. Sin embargo LoRaWAN presenta algunas características que pueden disminuir estos efectos como la utilización de distintos valores de SF o de la elección de canales de frecuencia diferentes para algún grupo de nodos.

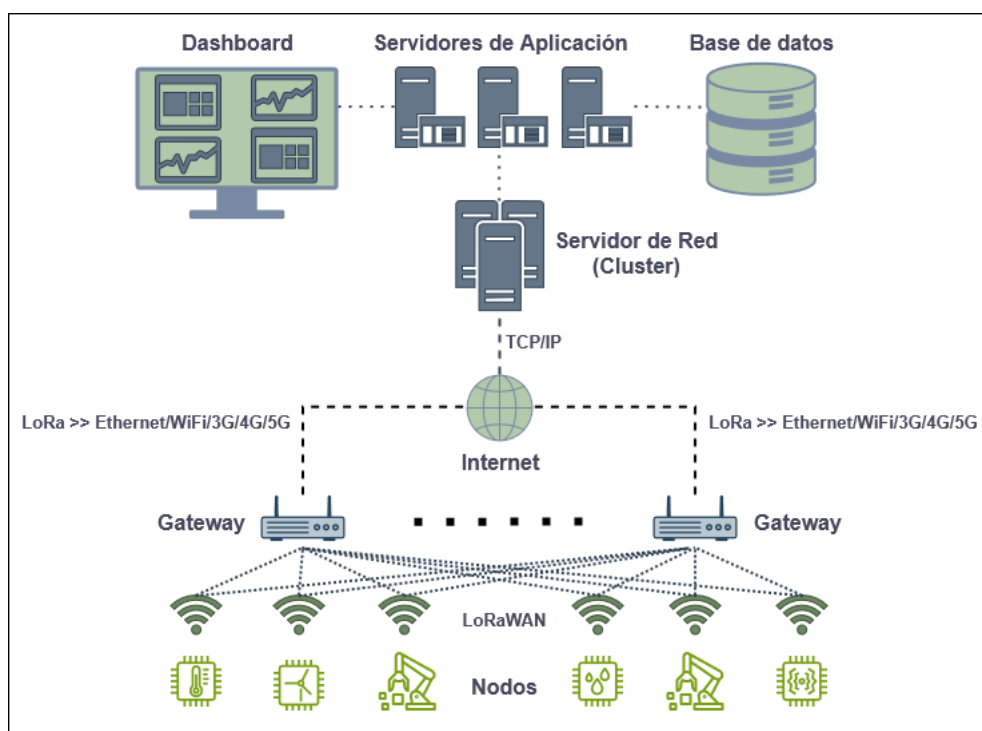


Figura 3.2: Arquitectura Red LoRa

Servidor de red

El servidor de red *The Things Stack* es el componente central, desarrollado y mantenido por la empresa *The Things Industries* (TTI). Esta solución cuenta con distintas ediciones, entre ellas una versión gratuita conocida como Community Edition, que da soporte a la red *The Things Network* (TTN). TTN constituye una red LoRaWAN comunitaria, global y de acceso abierto, basada en *The Things Stack*, y ofrece a los usuarios una interfaz web para gestionar dispositivos finales, *gateways* y enlazar datos con aplicaciones o bases de datos. Si bien su uso es gratuito, dispone de funcionalidades limitadas en comparación con las versiones comerciales que brinda la empresa.

El servidor de red posee muchas capacidades, como gestionar los mensajes que recibe desde los gateways. Si identifica paquetes duplicados, procesa uno y descarta el resto. Elige la mejor ruta para reenviar los mensajes de *Downlink* hacia el nodo correspondiente. También puede ajustar la potencia de transmisión y el SF de los nodos a través del algoritmo *Adaptive Data Rate* (ADR), cuando se encuentra activado, para mejorar el tráfico en el canal de comunicación y optimizar el consumo de energía de los nodos.

Servidor de Aplicación

Por su parte, los servidores de aplicación procesan los datos específicos de la carga útil recibida desde los nodos, dándoles formato y reenviándolos hacia aplicaciones de usuario o integraciones externas. Además, pueden generar comandos o mensajes destinados a los dispositivos finales (*downlink*), que serán enviados a través del servidor de red.

Nodos o Dispositivos finales

Los nodos o dispositivos finales son aquellos que integran los sensores e interactúan con el medio, extrayendo las medidas de los sensores y luego enviándolas al servidor de red a través del gateway en cada ocasión. Estos dispositivos requieren cierta inteligencia para gestionar el relevamiento y posterior manejo de los datos.

Existen 3 tipos de nodos: Clase A, B y C. Se distinguen por el consumo de energía, siendo A la clase con menor consumo y C la de mayor consumo. La clasificación responde a las necesidades que pueda tener cada red en particular. La clase A solo permite la recepción de mensajes de *downlink* dentro de dos pequeñas ventanas de tiempo posteriores al envío de un mensaje de *uplink*. Es decir que solo se podrán reconfigurar los parámetros de los nodos una vez que se haya transmitido algún dato hacia el gateway, lo cual puede llegar a implicar horas e incluso días. Este modo de operación permite optimizar la energía utilizada por el nodo, pues se puede establecer al dispositivo en un estado de bajo consumo durante todo el tiempo que se encuentre inactivo. El dispositivo solo abandona este modo de operación una vez que deba transmitir una nueva lectura del sensor. Una vez que envía la información hacia el servidor de red, permanece activo esperando la llegada de un mensaje de *downlink* durante los intervalos de tiempo mencionados y, en caso de no recibir ninguno, vuelve al estado de bajo consumo hasta la próxima transmisión de datos.

Los dispositivos de clase B operan en forma similar a los de clase A, pero adicionan una funcionalidad. Periódicamente, el servidor de red envía un mensaje de señalización denominado “baliza” a los nodos a través de los gateways. Este mensaje actúa como una señal de sincronismo para ellos, que al recibirla abren una ventana de tiempo para la recepción de mensajes de *downlink*. A dicha ventana se la denomina *Ping-Slot* (el ancho de la ventana se puede ajustar por firmware).

Por último, los dispositivos de clase C se diferencian principalmente de los de clase A en el manejo de las ventanas de recepción. En clase C, la segunda ventana de recepción permanece abierta de forma continua, permitiendo al nodo recibir mensajes *downlink* en cualquier momento.

Se puede deducir fácilmente que cuanto más tiempo permanezca activo el dispositivo esperando la llegada de mensajes, mayor será su consumo de energía. La tabla 3.3 ofrece una descripción sencilla de las características de cada tipo de nodo.

Gateway

Cada gateway debe registrarse en un servidor de red LoRaWAN, a la vez que se encuentra conectado al mismo a través de WiFi, Ethernet o red celular (3G/4G/5G).

Tabla 3.3: Clases de nodos

Atributo	Clase A	Clase B	Clase C
consumo de energía	bajo	medio	alto
latencia de recepción de <i>Downlinks</i>	alta	media	baja
apto para MSE	Sí	Sí	No

Existen dos tipos de gateways: de interior y de exterior. Las diferencias principales radican en su estanqueidad, la potencia de transmisión y la sensibilidad del receptor, siendo estas capacidades más robustas en las unidades para uso a la intemperie. En el presente trabajo se utilizó un gateway de interior *The Things Indoor Gateway* (TTIG), desarrollado por *The Things Industries* que se enlaza con el servidor de red a través de WiFi.

Para comenzar a utilizar este dispositivo se lo debe registrar en un servidor como TTN (el procedimiento de registro se agrega en el apéndice A.0.1) o instalarle un servidor de red propio (solo admitido por algunos *gateways*) lo cual permite crear redes locales o privadas que no están expuestas a gestionar paquetes de usuarios externos como sí, sucede en caso de registrar los *gateways* en TTN.

En este último caso los dispositivos funcionan como un “pasa manos” (*packet forwarder*), limitándose a recibir tramas LoRaWAN de cualquier nodo que esté dentro de su rango de cobertura y retransmitiéndolas al servidor de red *The Things Stack* (TTS).

3.2.4. Procedimiento de conexión de un nodo a la red

Modos de activación

Cada vez que un nodo desea conectarse a la red de dispositivos TTN debe ejecutar un proceso de activación. Para esto existen dos modos: *On The Air Activation* (OTAA) y *Activation By Personalization* (ABP). Los mismos son descritos a continuación para las versiones 1.0.x del protocolo LoRaWAN.

Los módulos de radio LoRa utilizados en el presente trabajo utilizan la versión 1.0.2 del protocolo.

OTAA

El modo OTAA es el más seguro de los dos. Consiste en enviar un mensaje de petición de unión (*Join-Request*) al servidor de red. El mensaje consta de 3 parámetros: una *AppEUI*, una *DevEUI* y un *DevNonce*. El primer parámetro es creado cuando se registra una nueva aplicación en la red TTN. Es un identificador de cada aplicación creada. El segundo es un identificador único que el fabricante asigna a cada dispositivo (módulo de radio LoRa). El tercero es un código generado por el nodo. Se utiliza por el servidor de red como registro de la petición recibida, de tal forma que si otro dispositivo intentara conectarse utilizando el mismo *DevNonce*, el servidor negaría la conexión.

Al recibir el mensaje, si no hay errores, el servidor genera dos claves de sesión: una *AppSKey* (Application-Session-Key) y una *NwkSKey* (Network-Session-Key). La primera es distribuida al/los servidores de aplicación (puede haber más de uno). Luego se envía un mensaje de aceptación de conexión al nodo (*join-accept message*), el cual contiene 6 parámetros: un *AppNonce*, un *NetID*, un *DevAddr*, un *DL-Setting*, el *RxDelay* y el *CFList*. Los dos parámetros relevantes son el *AppNonce*, que se utiliza por el nodo junto con la *AppKey* para derivar las dos claves de sesión, y el *DevAddr* (*Device-Address*), asignado por el servidor en forma dinámica, que identifica al nodo en la red.

Cabe aclarar que tanto el *DevEUI* como la *AppKey* son códigos únicos de cada dispositivo que provee

3.2. LoRaWAN

el fabricante. La *AppKey* se obtiene automáticamente al registrar un dispositivo en el servidor de red (TTN), mientras que la *DevEUI* se puede extraer directamente del dispositivo utilizando un firmware sencillo provisto por la librería *MKRWAN.h* desarrollada por Arduino. El procedimiento de activación se muestra en la figura 3.3.

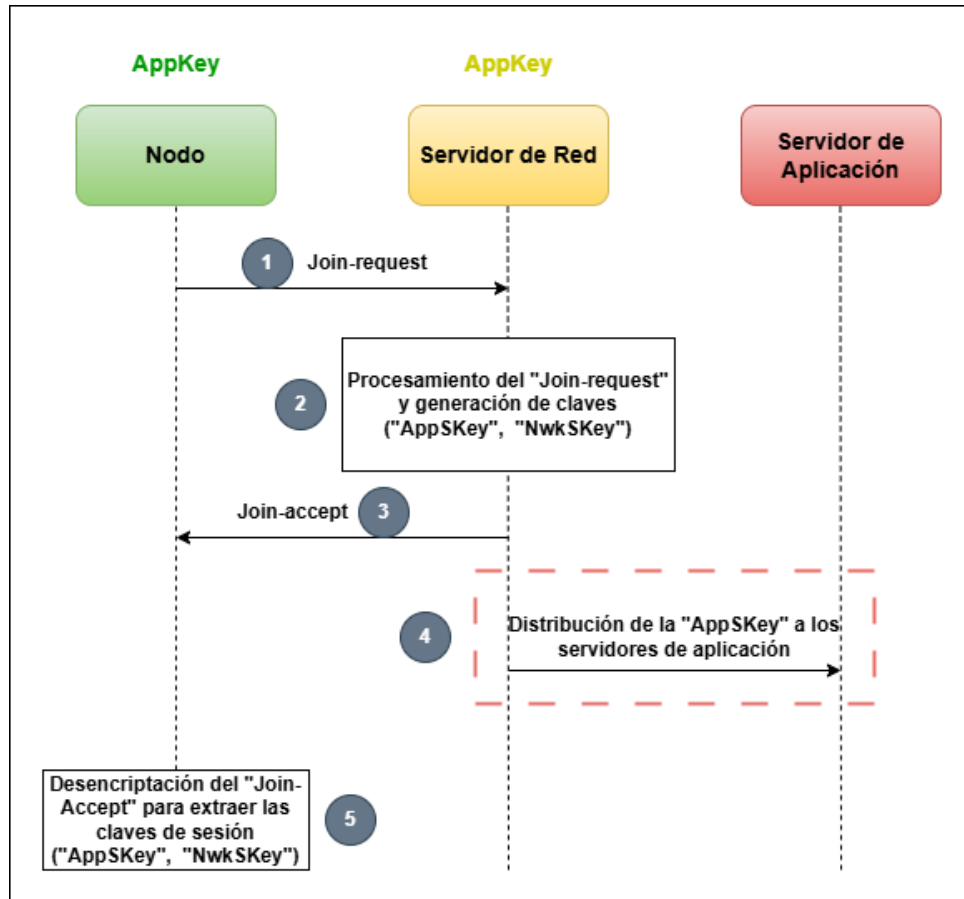


Figura 3.3: Activación OTAA (On The Air Activation) [65]

ABP

Este método es más directo y simple; por consiguiente, es más rápido, pero también más inseguro e impráctico bajo ciertas circunstancias. La activación bajo el modo ABP se realiza una única vez en la cual el servidor de red (TTN) asigna una dirección de red (*DevAddr*) y un par de claves de sesión: *AppSKey* y *NwkSKey*. Estas 3 claves permanecen incambiadas durante toda la vida útil del nodo. La gran ventaja es que no se debe iniciar una nueva sesión cada vez que se reinicia o se desconecta el dispositivo de la red. La desventaja es que si se desea asociar el nodo a una nueva red las claves y la dirección asignadas deberán cambiarse manualmente.

Por otro lado tener claves de seguridad fijas trae vulnerabilidades adicionales. Si estas son accedidas por terceros luego no podrán cambiarse fácilmente, y en el caso de que esto fuera posible accediendo al dispositivo físicamente tampoco se erradicaría totalmente el peligro pues un atacante podría generar mecanismos que le permitieran seguir operando sobre el nodo aún cuando se cambiaran las claves.

Otro aspecto negativo del modo ABP es que el contador de tramas que es un registro que lleva TTN del tráfico de mensajes hacia y desde cada nodo, al utilizar el modo ABP nunca se resetea pues esto ocurre cuando se inicia una nueva sesión. Por lo tanto cuando se alcanza el valor máximo para este contador el nodo dejará de enviar y recibir mensajes con lo cual su vida útil quedará supeditada a este registro.

En definitiva el procedimiento de activación por personalización es más directo y simple pero presenta varias desventajas frente al modo OTAA que no son admisibles a mediana y gran escala.

En la figura 3.4 se provee un esquema de este modo de activación que muestra la dirección del nodo y las claves manejadas por cada componente de la red.

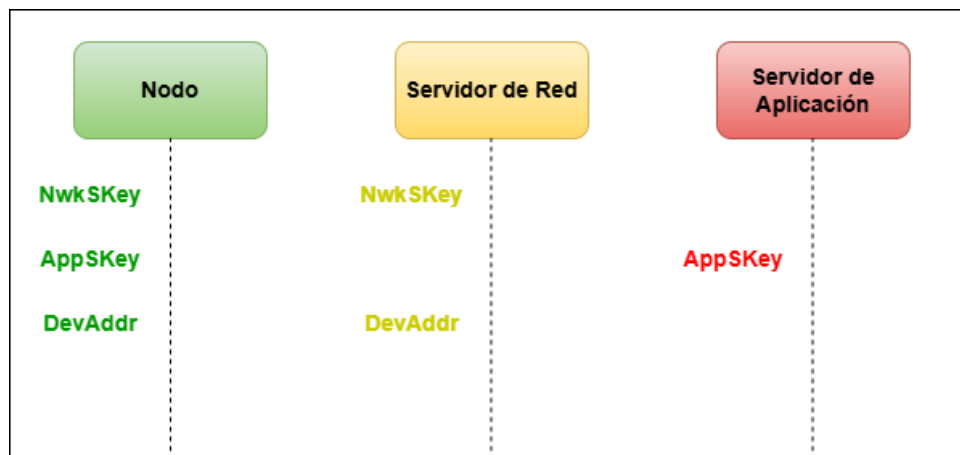


Figura 3.4: Activación ABP (Activation By Personalization) [65]

3.2.5. Ensayo de funcionamiento de la red

Para validar el funcionamiento de la red y cuantificar su rendimiento, se realiza un ensayo que consiste en enviar datos desde uno de los nodos al servidor a través del gateway durante un intervalo de tiempo fijo y con una cadencia a determinar.

El servidor de red TTS implementa un algoritmo de adaptación de Data Rate (ADR) que está basado en la SNR de la señal recibida desde los nodos. Este consiste en calcular la diferencia entre el SNR máximo en los últimos 20 mensajes de *uplink* y el SNR mínimo para demodular correctamente un mensaje enviado con el DR actual. Los cálculos detallados se pueden consultar en [66]. El objetivo de

3.2. LoRaWAN

este algoritmo es optimizar el tiempo de uso del canal de comunicación, a la vez que permite ahorrar energía controlando la potencia de transmisión de los nodos y su valor de SF. Este es un método de control de acceso al medio que TTN utiliza para gestionar la red de dispositivos. Por ejemplo, en Europa se limita el ciclo de trabajo en 1 %, mientras que en EE. UU. se limita el tiempo de permanencia de una señal en el aire a 400 ms. Para la región AU915 no hay regulaciones legales, pero un inadecuado uso del canal de comunicación genera perjuicios para todos los usuarios de la red, ya que aumentan las colisiones y pérdidas de datos.

Mientras el ADR permanece activo, el tiempo de transmisión consumido por un nodo al enviar una trama es variable, por lo cual no se puede calcular con exactitud. En su lugar, se calcula el tiempo considerando el peor caso, que corresponde a un $SF = 11$, un $BW = 125$ kHz (fijo por regulación regional), un $CR = 4/5$ (fijo por regulación regional) y una carga útil de subcapa MAC de 20 bytes, que es el valor máximo para la aplicación desarrollada en este trabajo. Además, hay que considerar los preámbulos y encabezados de las tramas. El preámbulo de capa física está fijado en 8 símbolos [67]. El tiempo de símbolo para la modulación LoRa se calcula como $T_s = \frac{2^{SF}}{BW}$ [68], donde cada símbolo equivale a $SF \times \text{bits}$.

Luego, la cantidad de bytes a transmitir por trama⁸ en el peor caso será igual a:

$$N = \text{Bytes}_{\text{encabezados}} + \text{Bytes}_{\text{carga util}} + \text{Bytes}_{\text{preambulo}} = 28 + 20 + 11 = 59 \text{ Bytes}$$

Por lo tanto, el tiempo en el aire (ToA) será $\text{ToA} = T_s \times N \simeq 0,97$ seg. El intervalo entre tramas se establece en 20 segundos. De esta manera, al cabo de 33.3 minutos deberán llegar a la aplicación web 100 tramas. Si el número de tramas recibidas es menor, entonces ha ocurrido una pérdida de paquetes. Esta prueba no pretende ser muy rigurosa en cuanto a determinar el área de cobertura efectiva de la red. Únicamente apunta a dar una idea sobre la distancia máxima a la que se puede transmitir antes de comenzar a perder eficiencia.

El ensayo se realizó en una zona urbana pero abierta, precisamente en las inmediaciones de la Facultad de Ingeniería, UDELAR. Se mantuvo línea de vista entre los dispositivos. El *setup* de la prueba se ilustra en la figura 3.5 y los resultados de la misma se exponen en la tabla 3.4.

En principio los resultados obtenidos no reflejan lo que indica la literatura que en términos generales prevee coberturas en entornos rurales de varios kilómetros, mientras que en entornos urbanos la cifra se reduce a un par de kilómetros, dependiendo de la interferencia radio-eléctrica y la cantidad de obstáculos que limiten el enlace [69]. Sin embargo otros estudios también muestran que la topografía del terreno también influye sobre el nivel de recepción de las señales. En este caso el emplazamiento del nodo presentaba una diferencia de altitud considerable frente al *gateway* y, adicionalmente existían colinas emplazadas entre ambos dispositivos [70]. Esta razón sumada a la baja ganancia direccional ($1 \text{ dBi}_{@902 \text{ MHz}}$)⁹ de la antena utilizada contribuyen a reducir el alcance de las señales transmitidas.

⁸la constitución de las tramas LoRaWAN se muestra con detalle en el anexo A.0.7

⁹La ganancia direccional proporciona a la antena una mayor capacidad para transmitir energía sobre un plano, reduciendo la cobertura global tridimensional. Es decir, a mayor ganancia direccional mayor es el alcance de las señales sobre un plano pero se reduce la cobertura en las direcciones verticales.

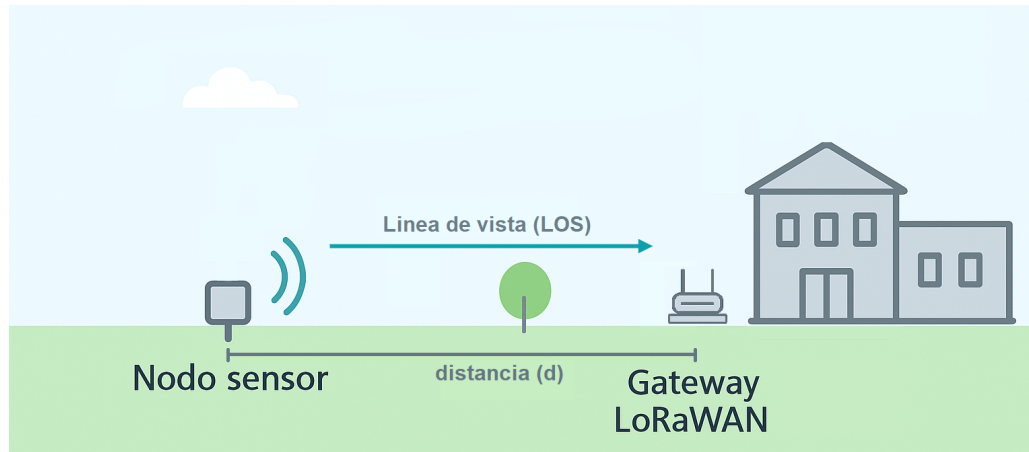


Figura 3.5: Prueba de rendimiento de la red LoRaWAN desplegada

Tabla 3.4: Ensayo de alcance de transmisión de nodos

Distancia (m)	Tasa de recepción de paquetes (%)
10	100
50	100
200	97
400	80

Capítulo 4

Implementación de sensor de desplazamiento lineal - LVDT

El nodo encargado de medir desplazamientos utiliza un sensor LVDT (Linear Variable Differential Transformer) modelo HR1000, del fabricante TE CONNECTIVITY. El mismo se ilustra en la figura 4.1. Se trata de un LVDT de 6 hilos, seleccionado con el fin de construir un nodo sensor basado en componentes de bajo costo, para el cual se desarrollará la electrónica de acondicionamiento.



Figura 4.1: LVDT HR1000

Como se expresó en capítulos anteriores, las ventajas más destacadas de este dispositivo son:

- Alta linealidad en su rango de operación.
- Gran repetibilidad de su punto de voltaje nulo (o desplazamiento nulo).
- Gran durabilidad mecánica.
- Salida analógica, solo limitada por la electrónica de acondicionamiento.
- Respuesta en frecuencia solo limitada por la inercia del desplazamiento del vástago.

4.1. Principio de funcionamiento

Este sensor de tipo inductivo está constituido, básicamente, por un transformador con dos bobinados secundarios y un núcleo ferromagnético móvil, como se observa en la figura 4.2. El voltaje inducido en los secundarios varía linealmente conforme al apartamiento del núcleo respecto al punto central del bobinado primario.

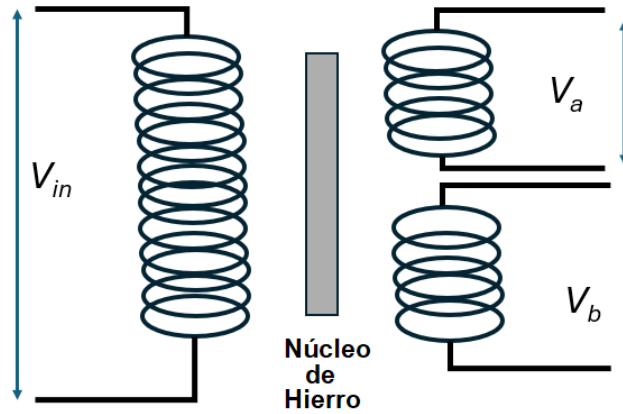


Figura 4.2: Circuito esquemático - LVDT

En la figura 4.3 se muestra el devanado primario a lo largo de todo el eje del cilindro y dos secundarios simétricos respecto al centro. En el interior se desplaza el núcleo de alta permeabilidad, μ_1 , y en el espacio restante se tiene aire, con una permeabilidad igual a μ_0 . Al circular corriente por el devanado primario se generan los campos magnéticos B y H^1 que influyen sobre el espacio circundante al núcleo y los devanados secundarios.

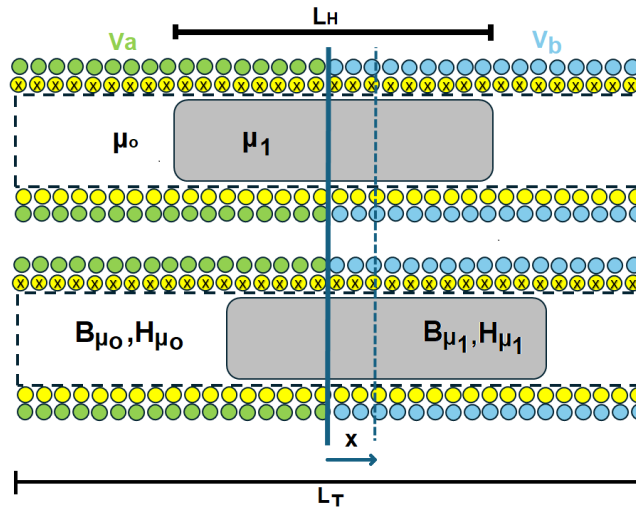


Figura 4.3: LVDT HR1000, diagrama constructivo. Los círculos celestes y verdes denotan los bobinados secundarios mientras que los amarillos ilustran el devanado primario.

¹H es la contribución a B realizada exclusivamente por la corriente que circula por el primario

4.1. Principio de funcionamiento

Hipótesis simplificadoras:

- El campo magnético H es uniforme a lo largo del eje. Esto no es estrictamente cierto, pero en una primera aproximación puede considerarse dependiente únicamente de la corriente por el primario.
- La corriente en los secundarios es despreciable frente a la del primario y no contribuye al flujo del campo magnético.
- Dentro de la zona abarcada por el núcleo, $B = \mu_1 H$; fuera del mismo, $B = \mu_0 H$.
- Los campos B y H fuera del cilindro son nulos.
- Se asume que los devanados secundarios son simétricos respecto al centro del cilindro y del primario.

Bajo estas hipótesis:

$$\oint_C H \cdot dl = N_p i_p(t) \quad (4.1)$$

$$H = \frac{N_p i_p(t)}{L_T} \quad (4.2)$$

Donde L_T la longitud del cilindro, N_p el número de vueltas del bobinado primario e $i_p(t)$ la corriente que circula por el primario.

Los flujos que atraviesan los devanados secundarios son $\Phi_a(x, t)$ y $\Phi_b(x, t)$. Estos dependen de la posición del núcleo, x . Como $\mu_1 \gg \mu_0$, se asume que las espiras fuera del hierro tienen un flujo despreciable. Por lo tanto, solo se consideran las espiras de los secundarios que se encuentra dentro de la zona de influencia del núcleo ferromagnético. Si los secundarios se suponen con devanados uniformes y una densidad de espiras:

$$n = \frac{N_s}{\frac{L_T}{2}} \quad (4.3)$$

Siendo N_s la cantidad total de vueltas de cada secundario. Entonces, las f.e.m. inducidas son:

$$V_a = -N_{s_a} \frac{\partial \Phi_a(x, t)}{\partial t}, \quad \Phi_a(x, t) = B_a(x, t) \cdot A = \mu H_a(x, t) \cdot A \quad (4.4)$$

$$V_b = -N_{s_b} \frac{\partial \Phi_b(x, t)}{\partial t}, \quad \Phi_b(x, t) = B_b(x, t) \cdot A = \mu H_b(x, t) \cdot A \quad (4.5)$$

entonces, integrando las ecuaciones (4.2), (4.3), (4.4) y (4.5) se obtiene la siguiente expresión para los voltajes inducidos:

$$V_a = \frac{-N_s}{\frac{L_T}{2}} \left(\frac{L_H}{2} - x \right) \cdot \frac{\mu_1 A N_p}{L_T} \cdot \frac{di_p(t)}{dt} \quad (4.6)$$

$$V_b = \frac{-N_s}{\frac{L_T}{2}} \left(\frac{L_H}{2} + x \right) \cdot \frac{\mu_1 A N_p}{L_T} \cdot \frac{di_p(t)}{dt} \quad (4.7)$$

4.2. Implementación

Donde L_H denota la longitud del núcleo. Si la corriente por el primario es sinusoidal con frecuencia angular ω , el módulo de la diferencia de voltajes entre los secundarios queda:

$$|V_a - V_b| = \left[\frac{4N_s}{L_T} \cdot \frac{\mu_1 AN_p}{L_T} \cdot \omega I_p \right] x \quad (4.8)$$

Como se aprecia en la expresión anterior, el módulo de la diferencia es proporcional a una constante constructiva del LVDT (número de vueltas de los devanados, longitud total, material del núcleo), la frecuencia angular de excitación, la amplitud de la corriente por el primario, y el desplazamiento lineal del vástago, x .

Nótese que si el desplazamiento del núcleo se mide de forma ratiométrica respecto a la suma de los voltajes secundarios, la salida se independiza de las fluctuaciones del voltaje de excitación en el primario [71]:

$$V_a + V_b = \left[\frac{2N_s}{L_T} \cdot \frac{\mu_1 AN_p}{L_T} \cdot \omega I_p \right] L_H \quad (4.9)$$

$$\frac{V_a - V_b}{V_a + V_b} = \frac{x}{\frac{L_H}{2}} \quad (4.10)$$

Adicionalmente, si se considera que $V_a = k_a V_p$ y $V_b = k_b V_p$, donde k_a y k_b son los coeficientes de acoplamiento entre los devanados secundarios y el primario, entonces $\frac{V_a - V_b}{V_a + V_b} = \frac{k_a - k_b}{k_a + k_b}$. Asumiendo que ambos secundarios tienen una dependencia muy similar respecto a la temperatura, la medición ratiométrica también compensa los efectos térmicos sobre el voltaje medido.

4.2. Implementación

Se pretende desarrollar un dispositivo con una apreciación de 0.01 mm para la realización de ensayos de laboratorio sobre elementos estructurales.

La figura 4.4 ilustra un diagrama de bloques del sistema a desarrollar. Como se observa, el mismo incorpora un circuito que genera la señal de excitación para el sensor, un circuito de demodulación para la señal resultante en los secundarios del LVDT y por último la placa adquisidora, resuelta a través de un Arduino MKRWAN 1310.

Dado que el LVDT es básicamente un transformador, se lo debe alimentar con una señal AC. Para esto se desarrolla un oscilador que produce una senoide de frecuencia (f_{osc}) y amplitud (v_{osc}).

Para determinar estos dos parámetros se toman como referencia los datos provistos por el fabricante en la hoja de datos del sensor y las notas de aplicación [72], [73] que establecen las siguientes cotas:

- $400 \text{ Hz} < f_{osc} < 5 \text{ kHz}$
- $v_{osc} < 12,25 \text{ V}_{rms@ 25 \text{ mA}}$, el valor de corriente es el máximo recomendado por el fabricante en [72] y corresponde a un valor de disipación de potencia de 150 mW

Finalmente se seleccionan los valores $f_{osc} = 4,5 \text{ kHz}$ y $v_{osc} = 3 \text{ V}_{rms}$, que cumplen con las restricciones planteadas.

Usualmente se utiliza una topología en la cual se conectan los secundarios en serie y oposición y se realiza una detección sincrónica. En ese caso es necesaria la detección de la fase para determinar la dirección del desplazamiento. En el caso de un LVDT de 6 hilos se puede demodular la señal de cada

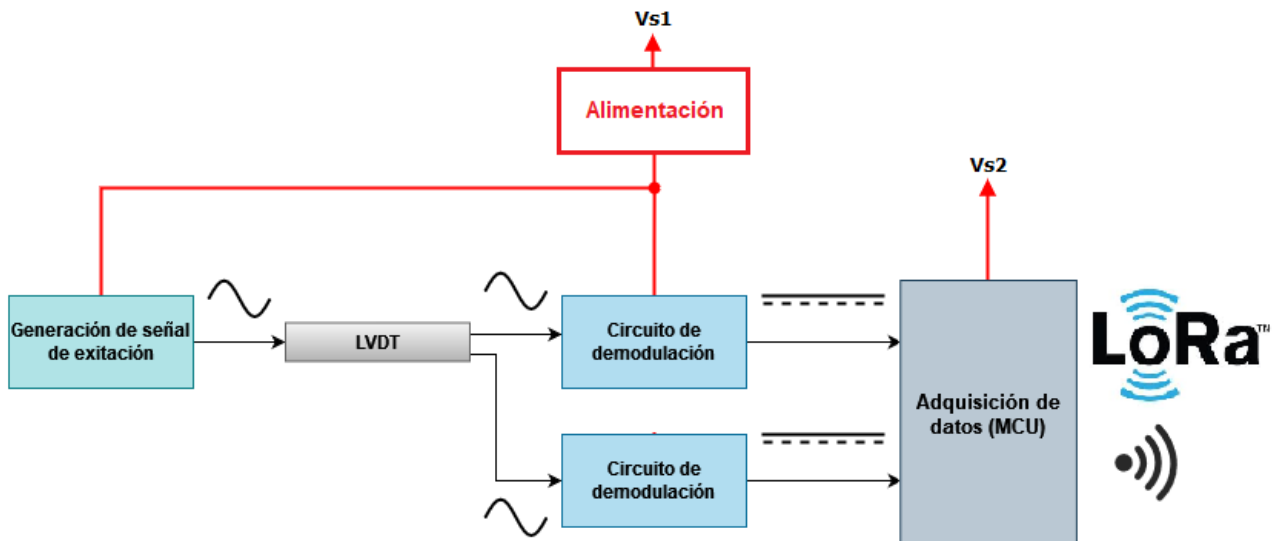


Figura 4.4: Diagrama de bloques correspondiente al módulo LVDT

secundario por separado y luego restar dichas señales en forma analógica (vía amp. diferencial) o digital (vía firmware) para obtener un valor de voltaje DC con signo, de esta manera se elimina la necesidad de conocer la fase.

Dado que se tiene acceso a los voltajes de ambos secundarios, el desplazamiento se medirá en forma ratiométrica ($\frac{V_a - V_b}{V_a + V_b}$) teniendo en cuenta las ventajas descritas anteriormente para esta metodología.

4.2.1. Etapa de Excitación

Circuito de Alimentación

La alimentación del circuito se resuelve por medio de una fuente simétrica construida a partir de 2 baterías 18650 de Li-Ion, de 3.7 V y 3500 mAh de capacidad [74]. Cada una de ellas es conectada a un módulo conversor de voltaje DC-DC que eleva el nivel de tensión desde 3.7 V hasta 7 V generando un voltaje bipolar de ± 7 V, el diagrama esquemático se muestra en la figura 4.5.

Dado que se utiliza la misma fuente (V_{s1}) para alimentar tanto el circuito de excitación como el de demodulación, se pierde la aislación galvánica entre ellos. Esto no representa un riesgo adicional para alguna de las partes, ya que el sistema funciona de forma aislada, es decir, que se alimenta en base a baterías.

Por otra parte, la alimentación de la placa Arduino MKR se realiza en forma independiente con una batería de Li-Ion, recargable, de 3.7 V nominales y 1200 mAh de capacidad.

Circuito de excitación

El oscilador se implementó según la configuración *Buffered phase-shift Oscillator* de 4 etapas, según lo sugerido en las notas de aplicación [75] de *Texas Instruments*. La topología implementada se muestra en la figura 4.6.

Para generar la señal sinusoidal de 4.5 kHz se requieren 3 etapas de filtrado o desfase igual a 60° . Gracias a la acción de los amplificadores seguidores, ninguna etapa carga a la anterior, de modo que el circuito se puede diseñar como 4 etapas en cascada, independientes unas de otras.

4.2. Implementación

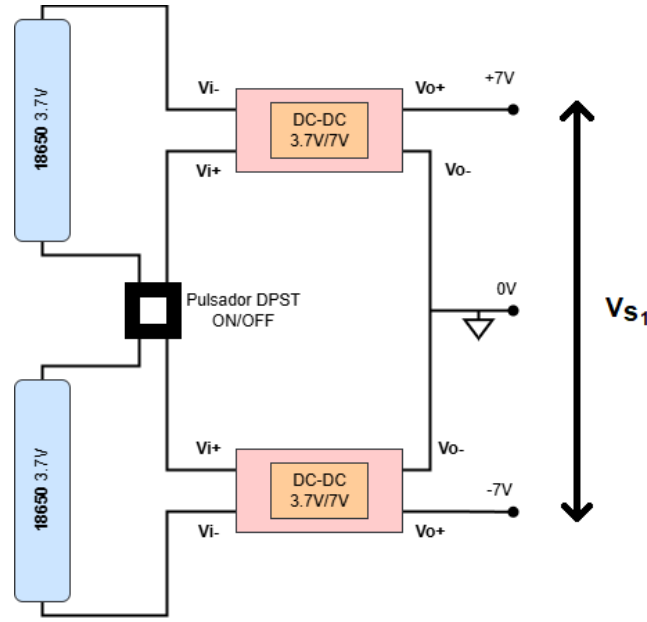


Figura 4.5: Circuito de Alimentación

La expresión de un filtro pasabajos pasivo de primer orden se muestra en la ec. 4.11.

$$H(\omega j) = \frac{\omega_c}{\omega_c + \omega j} \quad (4.11)$$

Se requiere que $Arg(H(\omega_{osc}j)) = 60^\circ$ a la frecuencia de oscilación ω_{osc} . Sustituyendo en la expresión de $Arg(H(\omega j))$ se deduce que ω_c debe ser igual a 2.6 kHz.

Por otro lado, teniendo en cuenta que en ω_{osc} los filtros presentan una atenuación correspondiente a $|H(\omega_{osc}j)| = \frac{1}{2} \frac{V}{V}$, al cabo de los 3 filtros se tendrá una atenuación total de $(\frac{1}{2})^3 = \frac{1}{8} \frac{V}{V}$ y, por consiguiente, la etapa de amplificación deberá tener una ganancia superior a $8 \frac{V}{V}$ para compensar dicho valor. Es importante observar que quien se encargará de limitar la amplitud de la oscilación de la señal de salida será la no linealidad del amplificador operacional AO1 en la figura 4.6. Más específicamente, cuando la oscilación comienza a crecer, lo continúa haciendo hasta alcanzar un valor de pico cercano al voltaje de alimentación de los operacionales. En ese momento el amplificador AO1 entrará en zona de saturación, limitando la ganancia del lazo y equilibrándola para mantener estable la oscilación.

Una vez que se cuenta con la señal de excitación, la misma se amplifica en voltaje hasta el valor requerido ($3 V_{rms}$) con una etapa de salida constituida por un amplificador de voltaje no inversor, AO5 en la figura 4.6.

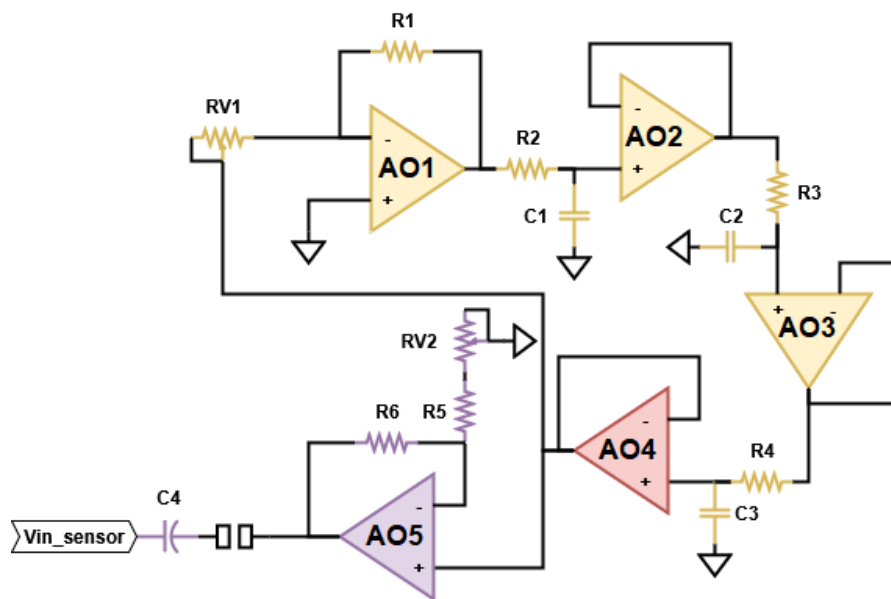


Figura 4.6: Circuito esquemático del oscilador

En la tabla 4.1 se enumeran los componentes utilizados en el circuito construido.

Tabla 4.1: Circuito de Excitación (circuito primario)

componente	valor
C_1	2.2 nF
C_2	2.2 nF
C_3	2.2 nF
C_4	330 uF
R_1	470 k Ω
R_2	27 k Ω
R_3	27 k Ω
R_4	27 k Ω
R_5	68 k Ω
R_6	100 k Ω
R_{V_1}	50 k Ω
R_{V_2}	50 k Ω
$AO_1, AO_2, AO_3, AO_4, AO_5$	LM324

4.2.2. Etapa de Demodulación

En un LVDT de 6 hilos, la información del desplazamiento se puede obtener rectificando el voltaje inducido en cada secundario y restando sus valores medios, sin conocer la fase del voltaje.

De esta manera, la demodulación se realiza a través de dos circuitos rectificadores de precisión de media onda que evitan la caída de voltaje en los diodos (V_γ), seguidos por filtros pasabajos que retienen el valor medio de la señal rectificada.

La implementación de los rectificadores se resuelve con una configuración que proporciona una mayor precisión en la respuesta, ya que el amplificador operacional del circuito de la figura 4.7 trabaja en zona lineal, por lo cual puede responder a cambios rápidos de voltaje. Durante el semiciclo negativo de la señal de entrada, el circuito se comporta como un amplificador inversor normal con una ganancia igual a $\frac{R_f}{R_i}$. Este aspecto representa otra ventaja de esta configuración, pues se puede ajustar la ganancia para aumentar el valor medio de la señal rectificada. Por otro lado, en el semiciclo positivo de V_{in} se enciende D_A , forzando la tensión de salida del amp. op. a $-V_\gamma$ (voltaje de umbral del diodo), impidiendo que este sature negativamente. Adicionalmente, por la tierra virtual, la corriente fluye desde la entrada hacia la salida, pero al estar D_A encendido, no circula corriente a través de R_f , por lo cual la tensión de salida se iguala a 0, dejando a D_B polarizado inversamente. Luego, cuando la polaridad de V_{in} cambia, la corriente i_{R_i} se invierte imponiendo una corriente a través de R_f desde la salida hacia la entrada. En este intervalo D_B conduce pero su caída de voltaje (V_γ) no influye sobre la salida del circuito que es determinada por la red de realimentación aunque sí, se exige una mayor dispensación de corriente al operacional. La operación del circuito y los estados de los diodos se ilustra en la figura 4.7.

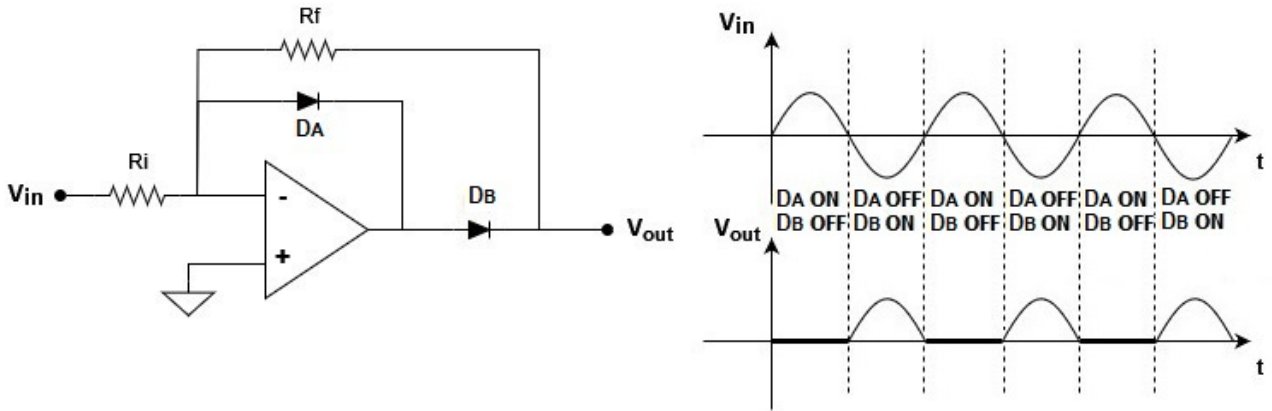


Figura 4.7: Circuito rectificador de precisión

Luego, el valor medio de la señal resultante viene dado por la ecuación 4.12. Para extraer este valor, se implementan sendos filtros pasabajos RC de primer orden para cada rectificador. Para determinar su frecuencia de corte se tiene en cuenta que, cuanto menor sea la misma, menor será el rizado sobre la señal. En contrapartida, si se toma un valor muy bajo, podrían no detectarse algunos de los desplazamientos experimentados por la estructura, teniendo en cuenta que las frecuencias típicas a las que vibran estas están en el orden de 1 a 10 Hz para casos como puentes, edificios, etc. Finalmente, la frecuencia de corte se establece en 10 Hz.

$$\bar{V}_{out} = \frac{1}{T} \int_{\frac{T}{2}}^T \left(-\frac{R_f}{R_i} V_{i_p} \right) \sin \left(\frac{2\pi}{T} t \right) dt = \frac{V_{i_p} R_f}{\pi R_i} \quad (4.12)$$

4.2. Implementación

Dado que el voltaje de excitación se fijó en $3 V_{rms}$ y que el transductor constituye un transformador con 2 secundarios independientes, cuando el núcleo magnético se encuentra en el centro del cilindro el voltaje inducido en ambos secundarios es el mismo, igual a $1.5 V_{rms}$. Por lo tanto V_{ip} es igual a $1.5 V_{rms} \times \sqrt{2} \simeq 2.13 V_p \implies \bar{V}_{out} = 0.68 V$. El demodulador completo se ilustra en la figura 4.8 mientras que la tabla 4.2 expone los componentes utilizados en el circuito.

Tabla 4.2: Circuito de Demodulación (circuito secundario)

Componente	Valor
C_5	$33\mu F$
C_6	$33\mu F$
R_7	$10k\Omega$
R_8	$10k\Omega$
R_9	560Ω
R_{10}	$10k\Omega$
R_{11}	$10k\Omega$
R_{12}	560Ω
D_1, D_2, D_3, D_4	1N4007
AO_6, AO_7	LM324

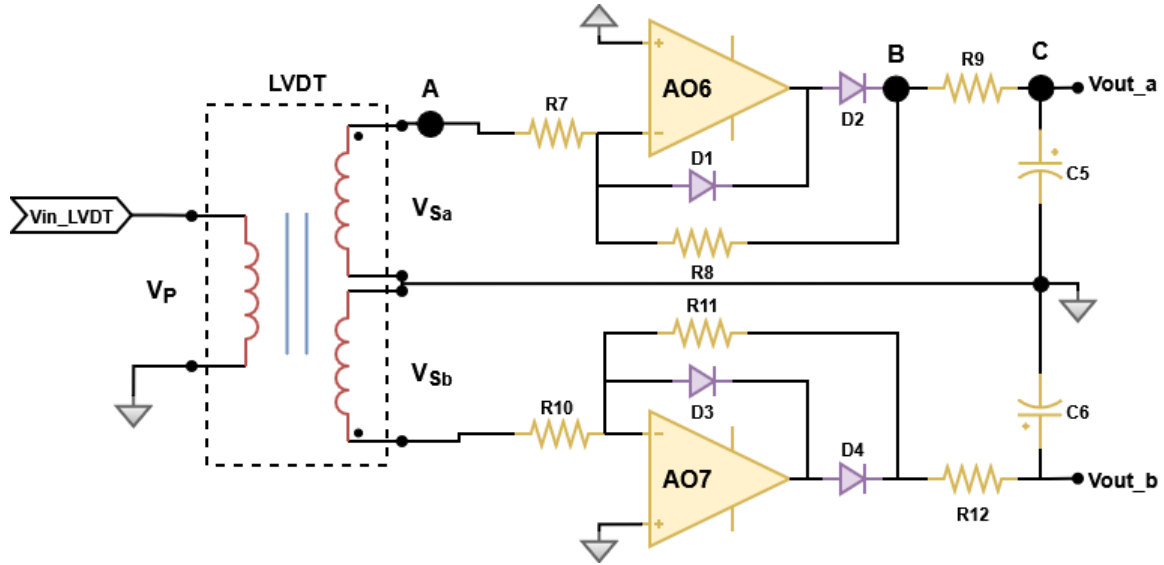


Figura 4.8: Circuito de demodulación para LVDT

En la figura 4.9 se muestran las formas de onda correspondientes a cada etapa del demodulador cuando el núcleo magnético del LVDT se encuentra situado en el centro del cilindro. Cada señal fue relevada en los puntos A, B y C resaltados en la figura 4.8. El voltaje en el punto B corresponde a la salida de los rectificadores. Dado que la impedancia vista hacia adelante en este punto es la serie de una resistencia y un capacitor la forma de onda obtenida no se condice con lo que muestra la figura 4.7 ya que ese es el caso para una carga resistiva. En el circuito bajo estudio los capacitores C_5 y C_6 no se descargan pues no hay un camino para hacerlo, la salida del circuito demodulador se conecta a las entradas analógicas de la placa de desarrollo Arduino MKRWAN 1310 que presenta una impedancia

4.2. Implementación

de entrada muy alta, por lo cual los condensadores de los filtros de salida mantienen un nivel de carga que evita un descenso hasta cero del voltaje.

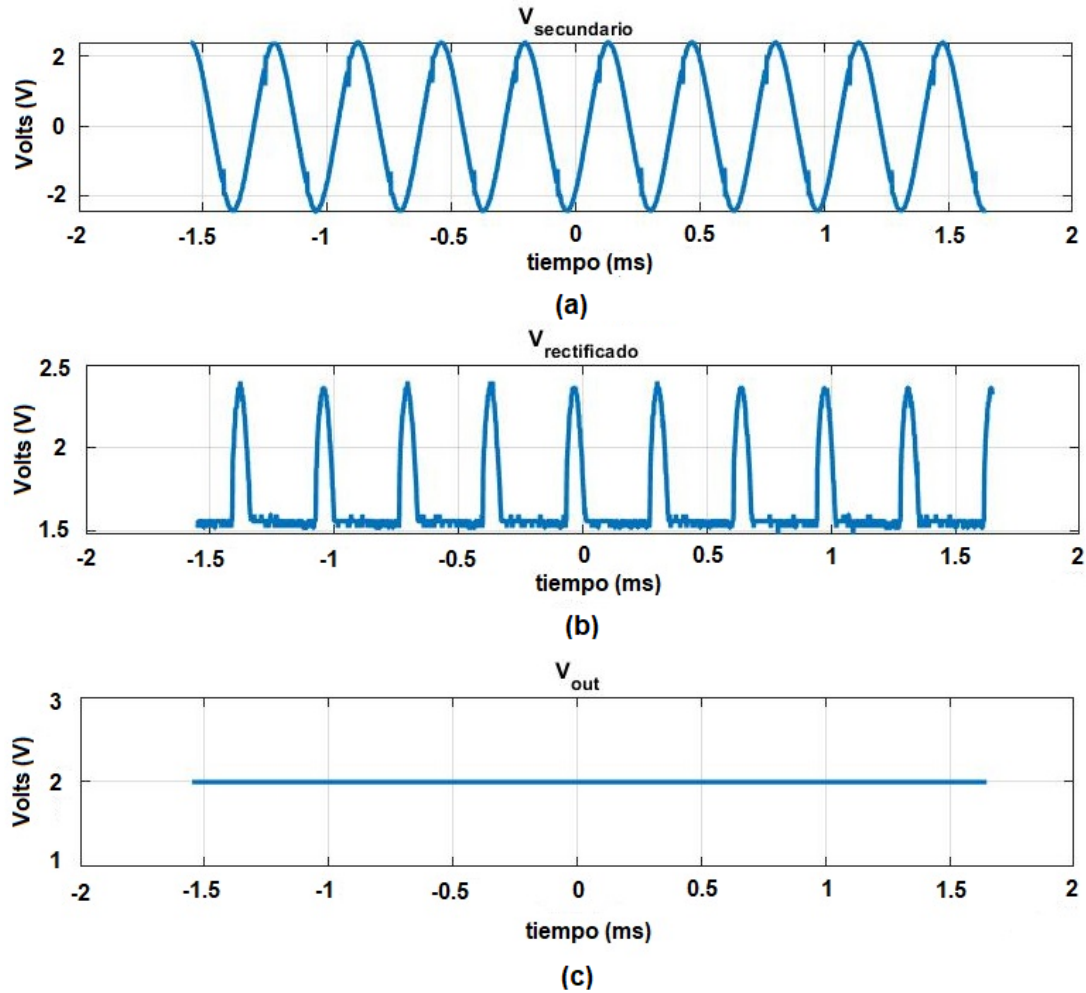


Figura 4.9: Formas de onda correspondientes a las distintas etapas del demodulador, con el núcleo del LVDT situado en el centro del cilindro. (a): Voltaje en el secundario “a”, (b): Voltaje en el secundario “a” rectificado, (c): Señal de salida del demodulador

4.3. Ensayos y análisis

4.3.1. Calibración

En primer lugar, se debe caracterizar la respuesta del sensor ante desplazamientos conocidos que serán determinados por un instrumento patrón. Esto permite hallar la sensibilidad del instrumento desarrollado en $\text{mm}/\sqrt{\text{V}}$ (ya que las medidas se toman en forma ratiométrica). Con este propósito se utiliza un actuador que permite desplazar una plataforma con precisión micrométrica. Este sistema, desarrollado por el fabricante THORLABS, modelo NRT150(/M) [76], posee una resolución de movimiento igual a $1 \mu\text{m}$.

El ensayo consiste en vincular la plataforma del actuador al núcleo ferromagnético del LVDT y desplazar el conjunto de manera que el núcleo recorra el rango completo de operación del sensor. Los movimientos se realizan en pasos de 1 mm. La figura 4.10 ilustra el ensayo realizado.

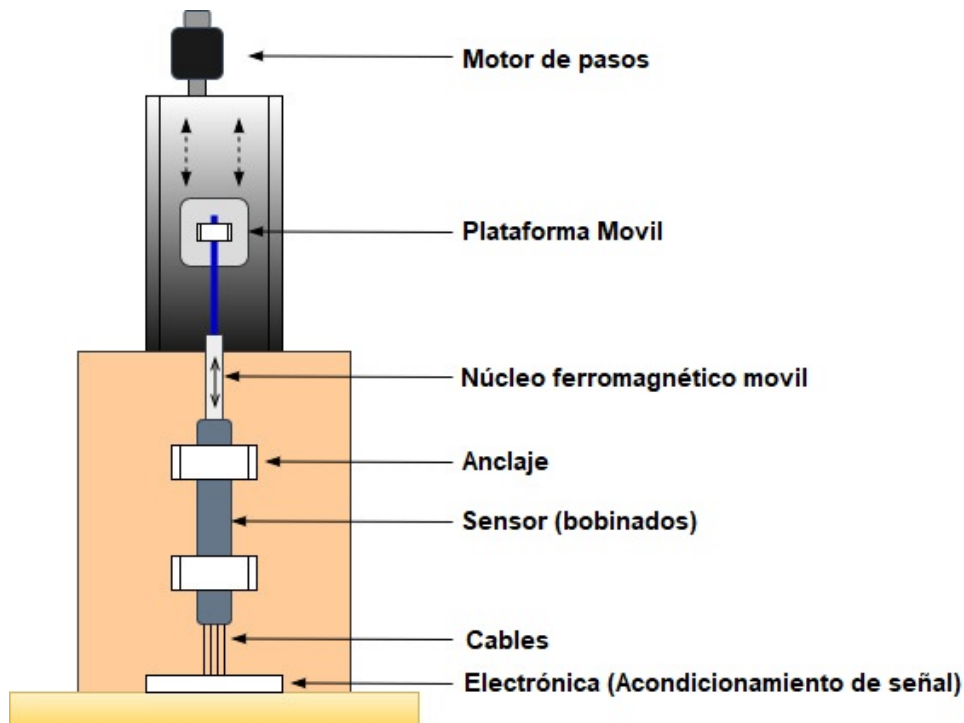


Figura 4.10: Ensayo de respuesta estática para LVDT

4.3. Ensayos y análisis

Como resultado, se obtiene la curva de respuesta estática del sensor ante los desplazamientos del núcleo, la cual se ilustra en la figura 4.11. De la curva se extrae su pendiente, que representa la sensibilidad del instrumento que es igual a $94.7 \mu\text{m}/\frac{\text{V}}{\text{V}}$.

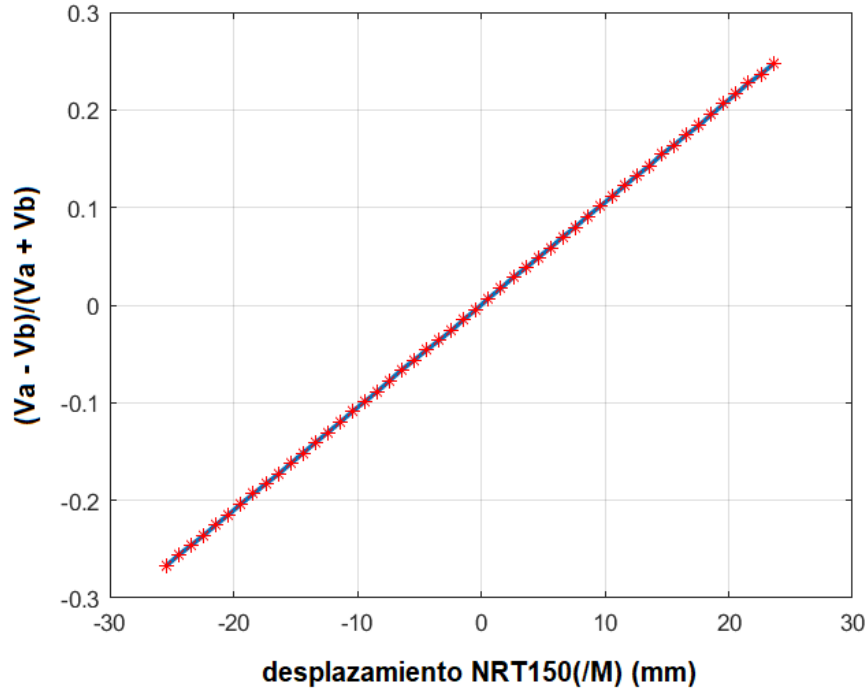


Figura 4.11: Relevamiento experimental de la respuesta estática del LVDT

Dado que el convertor AD de la placa Arduino MKRWAN 1310 cuenta con una resolución de 12 bits ($2^{12} = 4096$ valores representables), el instrumento podrá apreciar variaciones de voltaje iguales o superiores a 0.81 mV ($\frac{3.3 \text{ V}}{4096}$), lo cual equivale a un desplazamiento de $17 \mu\text{m}$ según el factor de sensibilidad hallado experimentalmente que permite realizar la conversión de mV a mm (para obtener este coeficiente se relevó la respuesta del transductor una vez más pero tomando como señal de salida $V_a - V_b$). Por lo tanto, para alcanzar la apreciación buscada de $10 \mu\text{m}$ se tienen dos opciones: bajar la referencia de voltaje del convertor para obtener un paso de voltaje menor o promediar las lecturas vía firmware utilizando aritmética de punto flotante.

Para bajar la referencia de voltaje sería necesario primero disminuir el voltaje de excitación del sensor, pues de otra manera el convertor AD se saturará y no será posible relevar los desplazamientos en el rango nominal de operación del LVDT. Por otro lado, promediar las lecturas con aritmética de punto flotante permite retener las cifras decimales en los promedios y, por lo tanto, detectar desplazamientos menores al mínimo establecido por el hardware. Esta es una solución sencilla de implementar, pero reduce la respuesta en frecuencia del instrumento (no se detectan cambios rápidos), ya que el promediado actúa como un filtro pasabajos.

Se resuelve utilizar el promediado de lecturas sucesivas para alcanzar la apreciación buscada.

A partir de este punto, se define una medida tomada con el dispositivo desarrollado como el promedio de P lecturas del LVDT. Es decir, $D = \frac{d_1 + d_2 + \dots + d_P}{P}$, donde D es la medida del dispositivo en mm, d representa a cada una de las lecturas del sensor en mm y P es la cantidad de lecturas promediadas para obtener una medida.

4.3. Ensayos y análisis

En la figura 4.12 se muestra un ensayo que ilustra cómo dispersa D calculando su desviación estandar para una serie de 1024 lecturas con distintos valores de promediado. A su vez, también se estudia cómo evoluciona el tiempo de ejecución de una medida para distintos valores de P .

Estrictamente, un valor de P igual o superior a 32 es suficiente para conseguir desviaciones inferiores a $10\text{ }\mu\text{m}$, tal como se buscaba. El tiempo de ejecución para cada medida sería de 2 ms en este caso, como se observa en la curva roja.

El valor de P es configurable a nivel de usuario, por lo cual puede adecuarse según la necesidad de la aplicación. En este caso se toma por defecto $P = 1024$, ya que esta decisión no afecta en gran medida el tiempo de ejecución ($t_s \simeq 75\text{ ms} \Rightarrow f_s = \frac{1}{t_s} = 13\text{ SPS}$), esto permite reconstruir señales periódicas de hasta 6.5 Hz ($\frac{f_s}{2}$) según el teorema de Nyquist-Shannon.

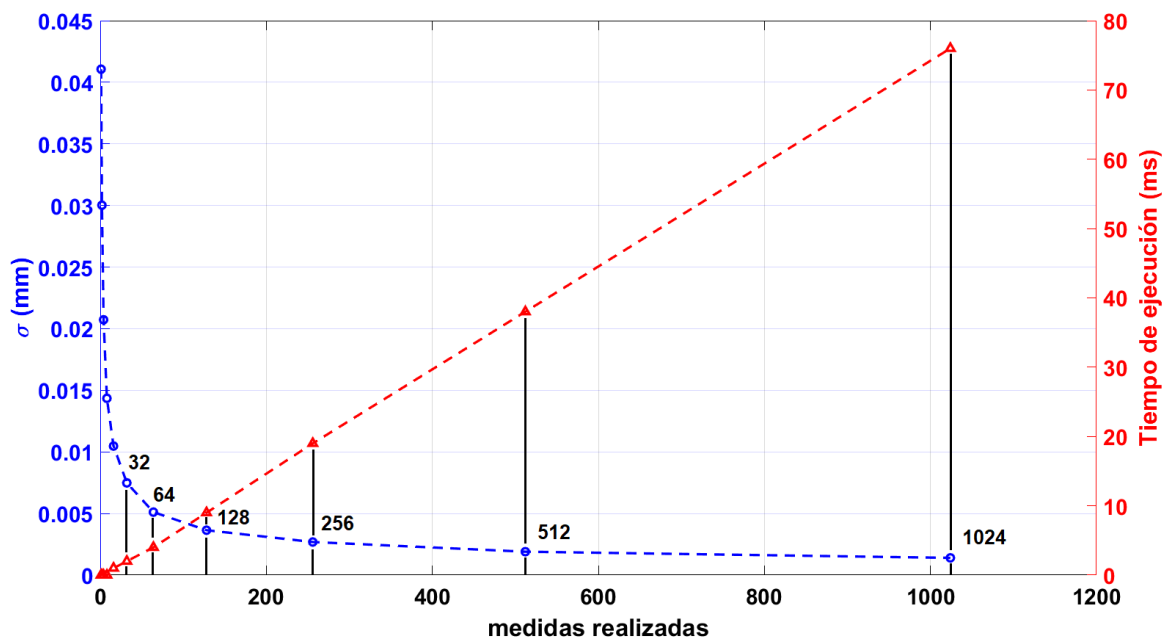


Figura 4.12: Se toma una serie de 1024 medidas (valores de D). La curva azul denota la dispersión de los datos según el valor de P . La curva roja denota el aumento en el tiempo de ejecución de una medida conforme aumenta P

4.3.2. Incertidumbre asociada al instrumento

La incertidumbre asociada a las medidas relevadas por el instrumento desarrollado cuenta con 3 componentes:

- incertidumbre de medida (σ_{med})
- apreciación del instrumento (σ_{apr})
- incertidumbre de calibración (σ_{calib})

Para determinar la incertidumbre de medida (σ_{med}) o incertidumbre estadística se considera un punto del rango de desplazamiento del núcleo (preferentemente la posición correspondiente a uno de los extremos de la escala, pues es la que presenta mayor dispersión), se toma una serie de mediciones en ese punto y se extrae su desviación estándar. Luego, se tiene que σ_{med} viene dado por $\sigma_{med} = 1,5 \mu m$.

En la figura 4.13 se puede observar el histograma junto con su correspondiente desviación estándar obtenida para un conjunto de 2000 lecturas.

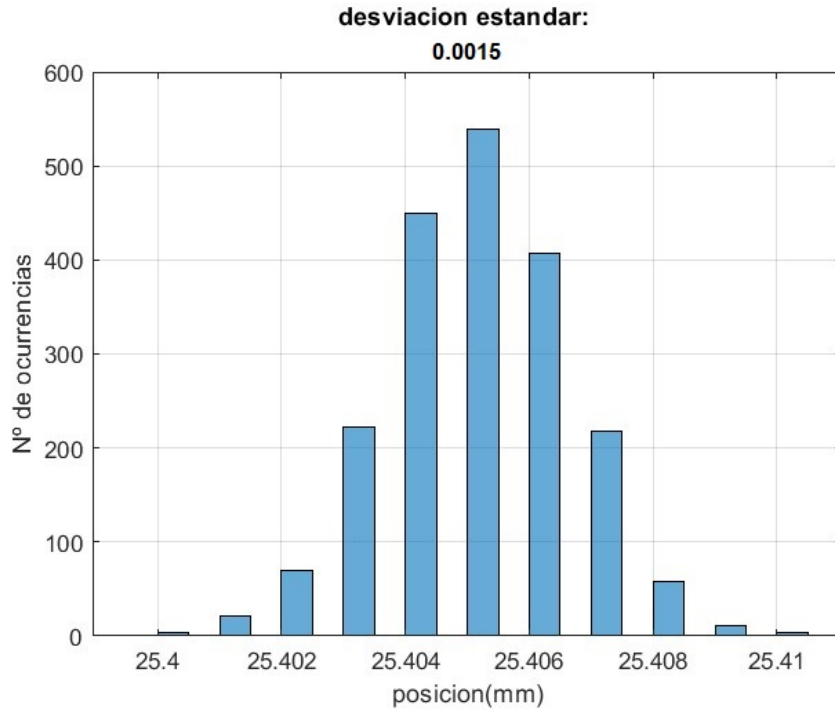


Figura 4.13: Histograma en la posición 25.4 mm, para un conjunto de 2000 medidas

Originalmente la apreciación del instrumento estaba limitada a la apreciación del conversor AD ($\frac{V_{REF}}{2^{12}} \simeq 0,81 \text{ mV}$) pero dado que cada medida es el promedio de 1024 lecturas, la apreciación final resulta ser $\frac{apr_{original}}{N \text{ de promedios}} = 0,8 \mu V$, que corresponde a 16 nm. Finalmente, para calcular la incertidumbre asociada a la apreciación del instrumento, dado que no hay razón para asumir que por debajo de los desplazamientos que alcanza a discriminar el instrumento un valor tenga preferencia sobre otro (todos son igualmente probables), la incertidumbre de cada lectura está asociada a la desviación estandar de una distribución estadística uniforme de muestras: $\sigma_{apr} = \frac{\frac{17 \mu m}{1024}}{2\sqrt{3}} = \frac{16 nm}{2\sqrt{3}} = 5 \text{ nm}$.

4.3. Ensayos y análisis

Por otro lado la incertidumbre asociada a la calibración del instrumento desarrollado contra el instrumento de referencia se determina graficando la curva de error entre la respuesta de ambos dispositivos y tomando la mayor desviación entre ambas. La misma se presenta en los extremos del recorrido, donde el error por no linealidad del LVDT es mayor, como lo indica el fabricante en la hoja de datos. Por lo tanto, $\sigma_{calib} = 0,15$ mm. La figura 4.14 ilustra esta situación. Allí se observa el gráfico de las diferencias punto a punto entre las posiciones medidas con cada instrumento y se encuentran marcados los niveles máximos de desviación provistos por el fabricante en la hoja de datos, correspondientes al error de linealidad en el rango completo de operación (0.25 %, 0.127 mm en el rango completo y 0.15 %, 0.0762 mm en medio rango).

De esta forma, la incertidumbre total del instrumento resulta del cálculo $\sigma = \sqrt{\sigma_{med}^2 + \sigma_{apr}^2 + \sigma_{calib}^2} \simeq 0,15$ mm.

Según el resultado anterior, la incertidumbre expandida queda: $k\sigma = \pm 0,26$ mm, donde se toma $k = \sqrt{3}$ para obtener un intervalo de confianza de 100 %. Esto quiere decir que todas las medidas estarán contenidas dentro de un intervalo de ± 0.26 mm en torno al valor real.

Nótese que para rangos de movimiento respecto al cero iguales o inferiores al 50 % se tiene una desviación aproximada de 0.04 mm, con lo cual la incertidumbre asociada a la lectura en este rango será aproximadamente 4 veces menor que en el caso en que se considera todo el rango de operación, lo que equivale a $\sigma = 0,038$ mm y, por lo tanto, $k\sigma \simeq 0,065$ mm.

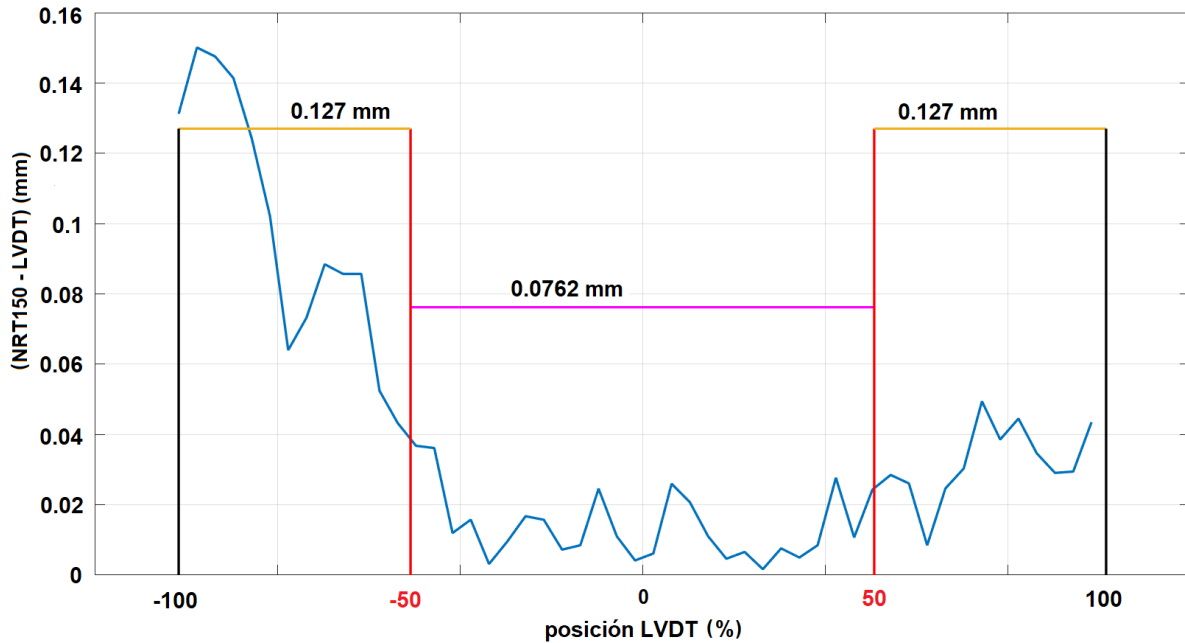


Figura 4.14: Curva de error entre desplazamientos medidos con el LVDT y valores determinados por el actuador de pasos NRT150. Las rectas horizontales demarcan los valores de error máximo de linealidad reportados por el fabricante del LVDT en cada tramo del rango. Dichos tramos se encuentran delimitados por las rectas verticales.

4.3. Ensayos y análisis

4.3.3. Ensayo de carga

Para evaluar el funcionamiento del dispositivo construido (LVDT-IIIE) en un ensayo real, se comparan sus medidas con las de un comparador analógico comercial del fabricante NEOteck, modelo NTK 248, el cual cuenta con una apreciación de $10\text{ }\mu\text{m}$.

Para esto se utiliza el montaje de un equipo de laboratorio SM1009, del fabricante TecQuipment. Este dispositivo proporciona 3 montajes para la medida de deformaciones. Uno de ellos es el de una barra de acero en voladizo (fija en uno de sus extremos), sobre la cual se apoyan los sensores bajo análisis. El equipo y el ensayo se ilustran en las figuras 4.15 y 4.16, respectivamente.

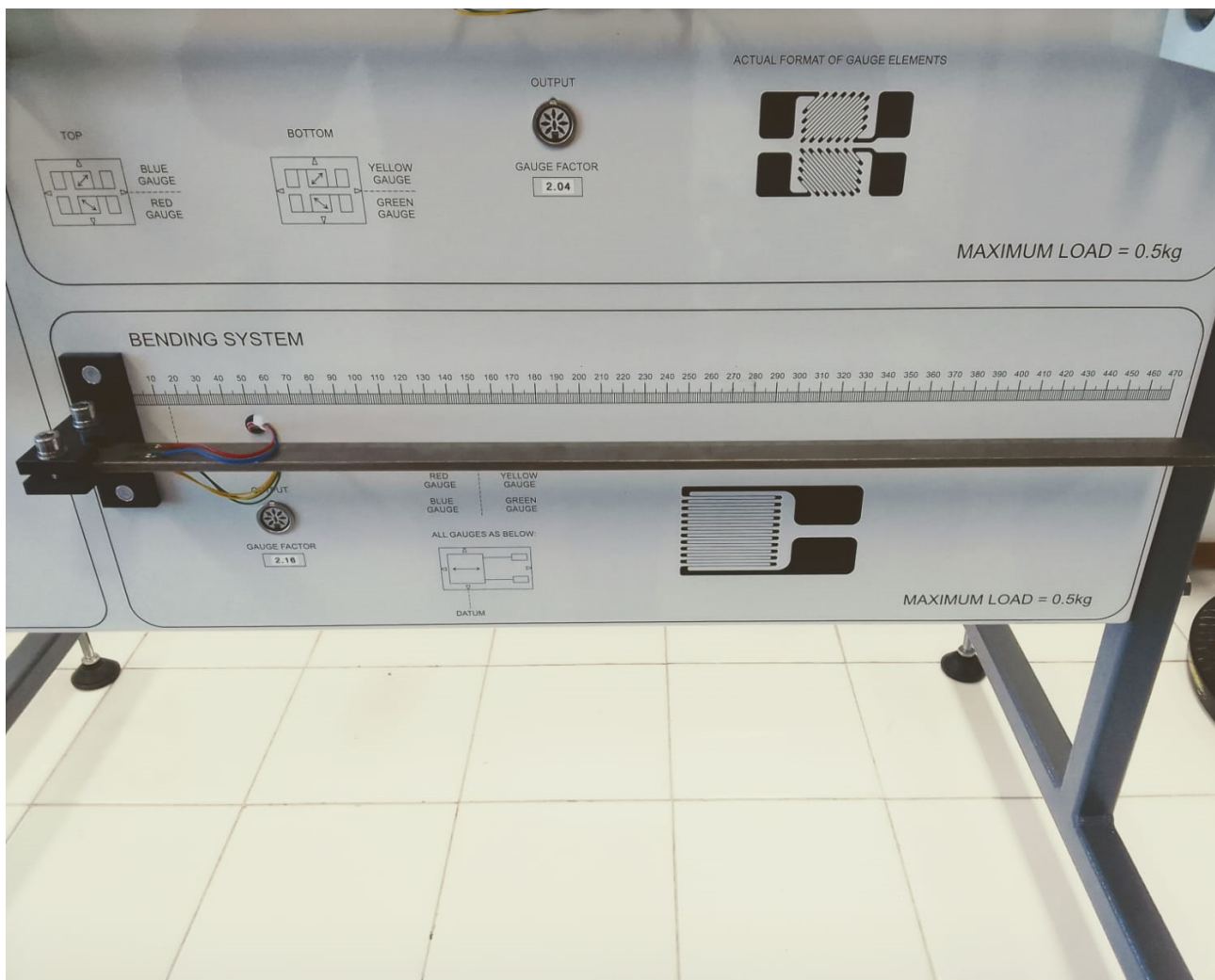


Figura 4.15: Setup de ensayo de carga para LVDT implementado y comparador analógico

4.3. Ensayos y análisis



Figura 4.16: Ensayo en barra de acero en voladizo, con LVDT-IIIE y un comparador analógico NEOteck

El ensayo consiste en cargar la viga con pesas, aumentando gradualmente su valor. Una vez que se alcanza la carga máxima, se continúa con el proceso de descarga. De esta manera se obtiene la curva del dispositivo para deflexiones positivas y negativas. Es importante colocar ambos instrumentos de medida alineados, es decir, a la misma distancia respecto al extremo de la barra para que midan una deflexión de igual magnitud.

La figura 4.17 muestra la contrastación de las medidas tomadas con el instrumento desarrollado (LVDT-IIIE) y el comparador analógico. En la mitad inferior de la figura se muestra la curva de error punto por punto entre ambos instrumentos. Como se puede observar la diferencia entre los desplazamientos medidos por ambos instrumentos se mantiene por debajo de los $20\ \mu\text{m}$ durante todo el ensayo. Esto representa un error relativo de 0.65% (tomando como referencia la medida del comparador) en el peor caso.

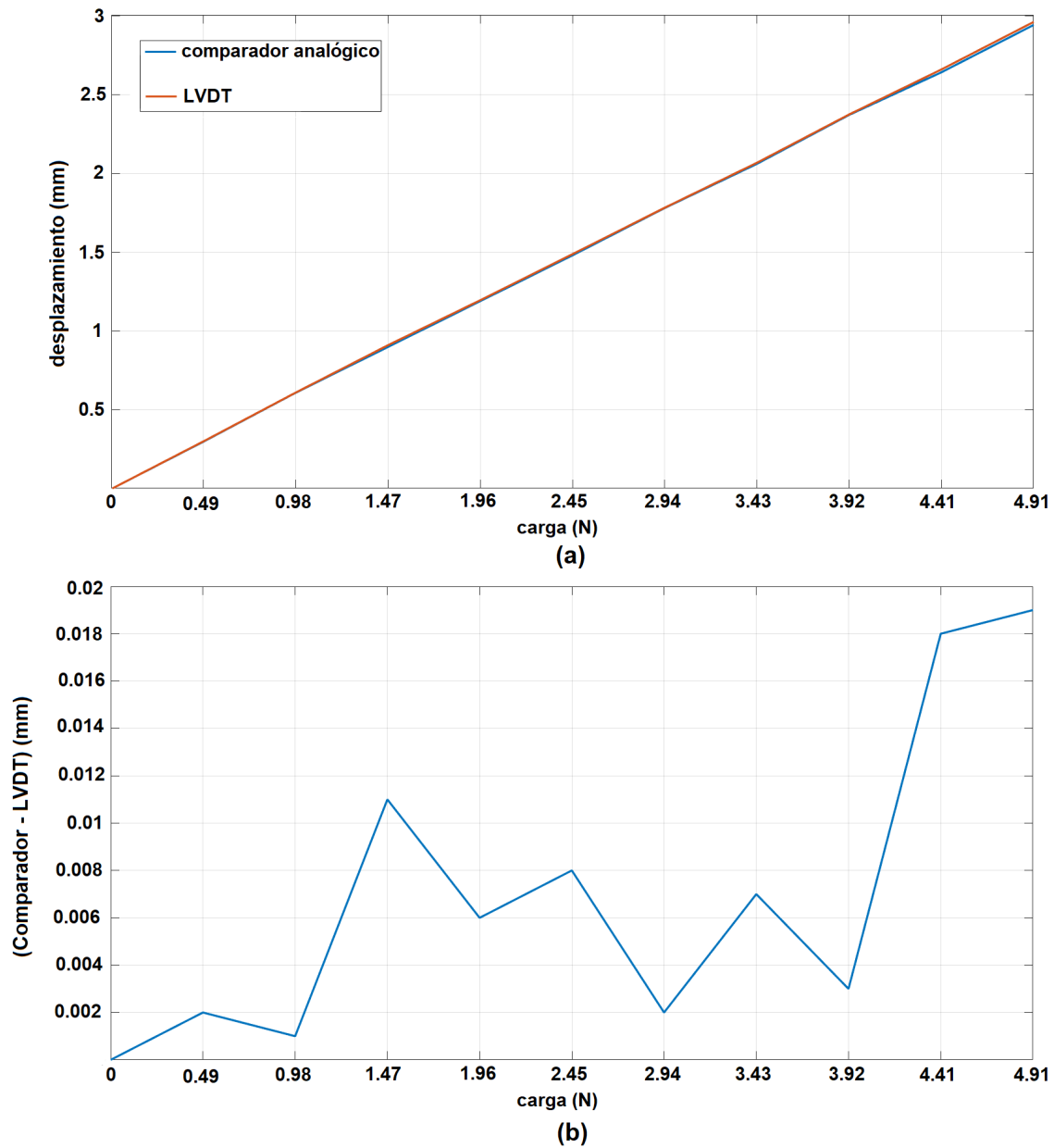


Figura 4.17: Contrastación de medidas tomadas con el instrumento LVDT-IIE y un comparador analógico NEOteck para una carga variable entre 0 y 4.91 N (Newton). En la gráfica (b) se muestra la diferencia entre las medidas tomadas con ambos instrumentos

Capítulo 5

Implementación de sensor de deformación - Galgas extensiométricas

Una de las técnicas clásicas para la medición de deformaciones en estructuras se basa en el uso de galgas extensiométricas metálicas.

La deformación unitaria de un material, representada por la letra griega ε , se define como el cambio relativo en su longitud respecto a la longitud original, es decir que $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$, donde $\Delta l = l - l_0$, siendo l_0 la longitud inicial y l la longitud final del elemento considerado. La deformación unitaria es una magnitud adimensional, aunque comúnmente se expresa en $\frac{m}{m}$ o en múltiplos más pequeños como el *micro-strain* ($\frac{\mu m}{\mu m} = \mu\varepsilon = 10^{-6}$).

En aplicaciones de instrumentación estructural, los valores típicos de deformación registrados se encuentran en el orden de los $\mu\varepsilon$.

5.1. Principio de Funcionamiento

Las galgas extensiométricas metálicas están constituidas por hilos metálicos, generalmente de alguna aleación como el constantán (60 % cobre, 40 % níquel). Poseen un valor de resistencia nominal o de reposo, que se denota como R_0 y corresponde al valor de resistencia que presenta la galga cuando no experimenta deformaciones mecánicas. En la figura 5.1 se ilustra una galga uniaxial que solo responde a deformaciones según su eje longitudinal. La tabla 5.1 destaca las características constructivas relevantes de este sensor.

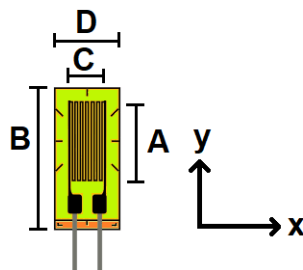


Figura 5.1: Galga de tipo LY1 (lineal, uniaxial, tipo de conexión 1 —terminales de soldadura debajo de los hilos metálicos—, del fabricante HBK) [77]

5.1. Principio de Funcionamiento

Tabla 5.1: Dimensiones de una galga uniaxial LY1, del fabricante HBK

Dimensión	Descripción breve	Descripción detallada
A	Longitud activa	Longitud que se deforma ante fuerzas de tracción o compresión
B	Longitud total	Incluye al elemento sensor y al material de soporte, formado por resina epoxi que brinda robustez mecánica
C	Ancho efectivo	Contiene el conjunto de hilos metálicos. Los tramos transversales son más anchos para disminuir la sensibilidad ante fuerzas según ese eje
D	Ancho total	Incluye al elemento sensor y al material de soporte

La resistencia de un hilo conductor metálico de largo l , sección A y resistividad ρ está dada por la ecuación $R = \rho \frac{l}{A}$. Un cambio en cualquiera de estas magnitudes produce una alteración en su resistencia eléctrica. Particularmente, al cambio de su resistividad por la acción de una deformación mecánica se le denomina “efecto piezorresistivo” [78].

Dado que una galga posee más de un hilo conductor dispuesto en paralelo para aumentar su valor nominal de resistencia (R_0), al deformarse existe otra ley actuante, la ley de Poisson [79]. Esta especifica que cualquier deformación en la dirección longitudinal del conductor está ligada a una deformación de carácter opuesto en la dirección transversal, $\mu = -\frac{dx/x}{dy/y}$, donde μ denota el coeficiente de Poisson (típicamente toma valores en el rango $0 < \mu < 0.5$), mientras que dx/x y dy/y representan las deformaciones unitarias en una y otra dirección.

Por lo tanto, cuando la galga se deforma experimenta un cambio en su resistencia, que viene dado por la expresión de su diferencial 5.1

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dA}{A} \quad (5.1)$$

Suponiendo que el elemento conductor es cilíndrico, con sección circular de diámetro D , entonces su área $A = \pi \frac{D^2}{4}$.

$$\frac{dA}{dD} = \frac{\pi D}{2} \implies \frac{dA}{A} = \frac{\pi D dD}{\pi \frac{D^2}{4}} \implies \quad (5.2)$$

$$\boxed{\frac{dA}{A} = 2 \frac{dD}{D} \text{ ley de Poisson } - 2\mu \frac{dl}{l}} \quad (5.3)$$

Por otra parte, el efecto piezorresistivo en un material isotrópico de volumen V establece que $\frac{d\rho}{\rho} = C \frac{dV}{V}$, siendo C la constante de proporcionalidad de Bridgman [80]. De esta manera, siguiendo con el modelo

5.1. Principio de Funcionamiento

cilíndrico del conductor metálico:

$$V = l \times \pi \frac{D^2}{4}, \frac{\partial V}{\partial l} = \pi \frac{D^2}{4}, \frac{\partial V}{\partial D} = \frac{\pi}{2} l D \quad (5.4)$$

$$dV = \frac{\partial V}{\partial l} dl + \frac{\partial V}{\partial D} dD \quad (5.5)$$

$$\boxed{\frac{d\rho}{\rho} = C \frac{dV}{V} = C(1 - 2\mu) \frac{dl}{l}} \quad (5.6)$$

$$(5.7)$$

Finalmente, se obtiene la siguiente expresión para una variación de resistencia del material por causa de una deformación mecánica:

$$\frac{dR}{R} = C(1 - 2\mu) \frac{dl}{l} + \frac{dl}{l} + 2\mu \frac{dl}{l} = (1 + 2\mu + C(1 - 2\mu)) \frac{dl}{l} \quad (5.8)$$

$$\frac{dR}{R} = K \times \varepsilon \text{ donde } K = (1 + 2\mu + C(1 - 2\mu)) \quad (5.9)$$

La constante K denota al factor de sensibilidad de la galga o “Factor de Galga” (en adelante “FG”), cuyo valor para galgas metálicas es ligeramente mayor que 2. Luego, el cambio de resistencia relativo a su valor de reposo es el que se expresa en la ecuación 5.10. Según Pallas Areny R. [80] la variación de R nunca excede del 2 %.

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \frac{(R - R_0)}{R_0} = FG\varepsilon \quad (5.10)$$

$$R = R_0(1 + FG\varepsilon) \quad (5.11)$$

5.2. Método de Medición

Para registrar una deformación en un material de magnitud igual a $1 \mu\epsilon$ utilizando una galga de $R_0 = 120 \Omega$ y asumiendo un $FG=2$, el circuito de medida debe ser capaz de detectar un cambio en la resistencia igual a $FG \times \epsilon = 2 \times (1 \times 10^{-6})$. Este valor representa un cambio porcentual de 0.0002% o $0.24 \text{ m}\Omega$.

La manera más sencilla de medir deformaciones con una galga es colocarla en un circuito divisor de tensión como el que ilustra (a) en la figura 5.2 y medir el voltaje de salida (V_{out}). El problema con este método es que dicho voltaje contiene un valor medio muy alto (igual a $\frac{V_{CC}}{2}$ si R_1 es igual a R_0), por lo cual las variaciones de voltaje producidas por deformaciones serán imperceptibles. En este punto se vuelve necesaria la utilización de un puente de medida o puente de Wheatstone. Este circuito permite realizar mediciones más precisas.

El funcionamiento de este circuito es simple: es el equivalente a dos divisores resistivos alimentados por la misma fuente de voltaje, la cual debe ser sumamente estable para no ocasionar fluctuaciones en el voltaje de salida. La salida (V_{out}) viene dada por el voltaje diferencial entre ambos divisores de tensión como se aprecia en el circuito (b) de la figura 5.2. Cuando no existen variaciones en las resistencias que conforman el puente, el voltaje V_{out} se mantiene igual a 0. Si la galga se deforma, esto produce un cambio en su resistencia rompiendo el equilibrio del puente y generando una variación en el voltaje diferencial. En forma general, cualquier variación en alguna de las resistencias del circuito producirá un desbalance en el voltaje de salida que será acusado. Al restar los voltajes de ambas ramas se elimina el valor medio de la señal, aunque la misma sigue dependiendo del voltaje de alimentación (V_{CC}). Para independizar al circuito de las fluctuaciones de la fuente, se pueden tomar medidas ratiométricas respecto a esta, es decir $V_o = \frac{V_{out}}{V_{CC}}$ [71].

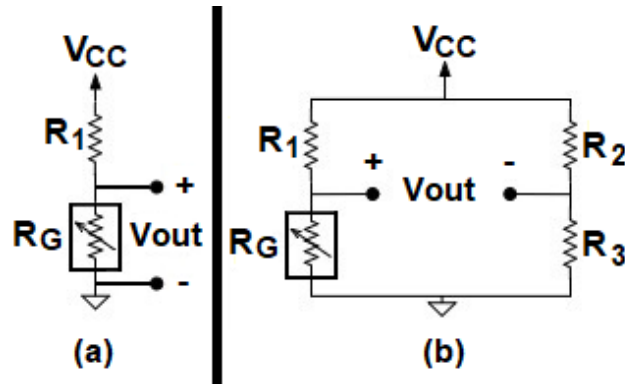


Figura 5.2: Circuitos para medir deformaciones - (a): divisor de tensión, (b): puente de Wheatstone en configuración $\frac{1}{4}$ -puente (una sola galga activa).

Para maximizar la sensibilidad del puente de Wheatstone ante variaciones en la resistencia de la galga se toma $R_1 = R_0$ (ver cálculo completo en el apéndice C), por lo tanto el voltaje de reposo a la salida de esta rama será igual a $\frac{V_{CC}}{2}$. Luego, la otra rama debe exhibir el mismo voltaje en condición de reposo para que se cancele el valor medio de V_{out} , por lo tanto $R_2 = R_3$. Finalmente, para que ambas ramas disipen la misma potencia (circule la misma corriente por ambas) se toma $R_2 = R_3 = R_0$. Para reducir el voltaje de offset al máximo en condiciones de reposo se utilizan resistencias SMD de precisión, de 120Ω al 0.1% , del fabricante SUSUMU [81].

5.2.1. Deformación real y aparente por variaciones de temperatura

Existen dos maneras de deformar un material: una es aplicarle una fuerza de tracción o compresión y la otra es someterlo a un gradiente de temperatura. Si se monta una galga sobre un material y este se calienta, la galga experimentará dos efectos. El primero es una deformación solidaria a la expansión térmica del sustrato o material al cual está adherida y el segundo es un aumento en su resistencia debido exclusivamente al cambio en el estado de movimiento de sus partículas. Los electrones libres que transportan la carga adquieren mayor energía y colisionan más entre ellos, generando un efecto de reducción de la densidad de corriente. Este efecto se conoce como “deformación aparente” y no es deseable ya que distorsiona la medida de deformación real sobre el objeto bajo estudio.

Incorporando la dependencia con la temperatura en la expresión 5.11 se tiene que $R(\varepsilon, T) = R_0(1 + K(T)\varepsilon)$. Por lo tanto, hallando el diferencial de esta función de dos variables se determina la contribución de cada magnitud a las variaciones en la resistencia de la galga (los cálculos se adjuntan en el apéndice C). La expresión final para la resistencia de la galga incorporando la deformación por dilatación/compresión térmica y la deformación aparente queda de la siguiente manera:

$$R = R_0(1 + FG\varepsilon + \alpha\Delta T) \quad (5.12)$$

El parámetro ΔT representa el cambio de temperatura al cual es sometido el conjunto formado por la galga y el sustrato, mientras que el coeficiente α está asociado al cambio en el valor de reposo de la resistencia de la galga (R_0) a causa de un cambio en la temperatura de operación.

Para mitigar el efecto de la deformación aparente es precisa la utilización de otras configuraciones de puente, como el $\frac{1}{2}$ -puente adyacente y el puente completo. Por otro lado, se debe tener claro que no todas las configuraciones de puente proporcionan compensación térmica (ver apéndice C).

Algunas alternativas adicionales para reducir o eliminar la deformación aparente son el uso de galgas autocompensadas¹ y la utilización de galgas montadas sobre otro material (*dummy*). Estas galgas serán sometidas al mismo cambio de temperatura pero no a la misma deformación experimentada por el elemento estructural o sustrato.

5.2.2. Configuración del puente de medida

El voltaje de salida del puente de medida depende del número de galgas activas utilizadas tal como se observa en la tabla 5.2 y de su disposición en el elemento estructural a medir.

Se considera que una galga es activa cuando está montada sobre un material de forma tal que experimenta la misma deformación que este cuando está sometido a fuerzas de tracción o compresión.

En la figura 5.3 se ilustran las configuraciones básicas para el montaje de galgas y su forma de conexión en el puente de medida. Estas se estiran ($+\varepsilon$) o se comprimen ($-\varepsilon$) de forma solidaria a la estructura sobre la cual se encuentran adheridas.

Tabla 5.2: Voltajes de salida para las distintas configuraciones de un puente de Wheatstone

Configuración	Galgas activas	$ V_{out} $
$\frac{1}{4}$ -puente	1	$\frac{GF \times V_{CC}}{4} \times \varepsilon$
$\frac{1}{2}$ -puente	2	$\frac{GF \times V_{CC}}{2} \times \varepsilon$
Puente completo	4	$GF \times V_{CC} \times \varepsilon$

¹Una galga autocompensada es aquella que es fabricada con un coeficiente de dilatación térmica muy similar al del material sobre el cual será montada

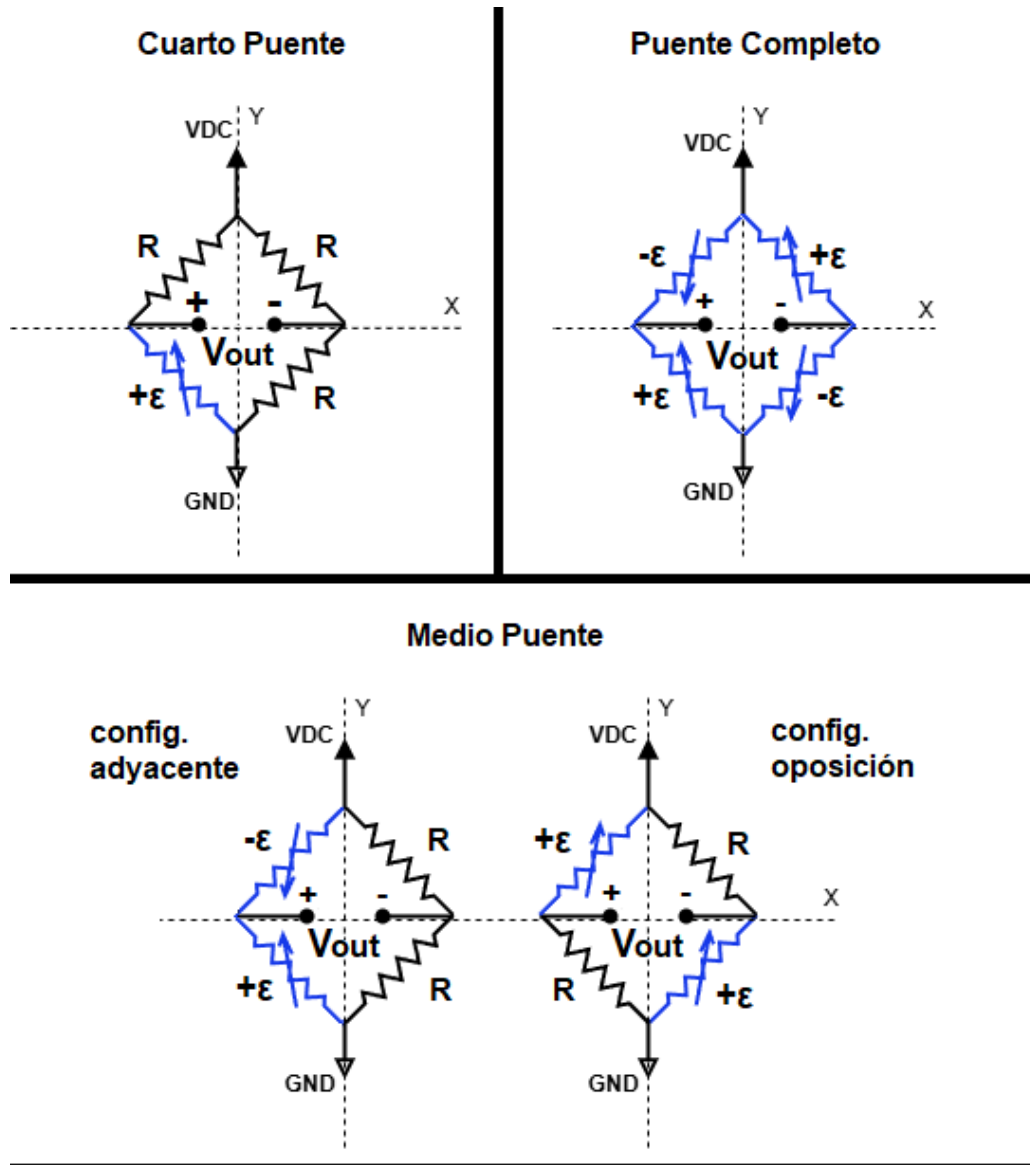


Figura 5.3: Configuraciones para medición de deformación usando el puente de Wheatstone.

5.3. Implementación del sistema de medida

El nodo a desarrollar debe contar con capacidad para medir deformaciones en el rango de 1-1000 $\mu\epsilon$ y debe ser capaz de tomar al menos una medida por segundo.

La figura 5.4 ilustra el diagrama del dispositivo. Este se encuentra constituido por un puente de medida o puente de Wheatstone, cuya configuración puede ajustarse por medio de interruptores montados sobre el circuito impreso, tal como se observa en la figura 5.5. El módulo HX711 filtra, amplifica y digitaliza los voltajes proporcionales a las deformaciones devolviendo un número entero con signo de 24 bits. Dado que la temperatura representa una variable relevante en la medición de deformaciones, es de interés monitorear su evolución en el tiempo. Para tal fin se incorpora un sensor DS18B20. Como etapa final la placa Arduino MKRWAN 1310 procesa las lecturas extraídas de cada sensor y los transmite a un *gateway* bajo una única trama cuando corresponde.

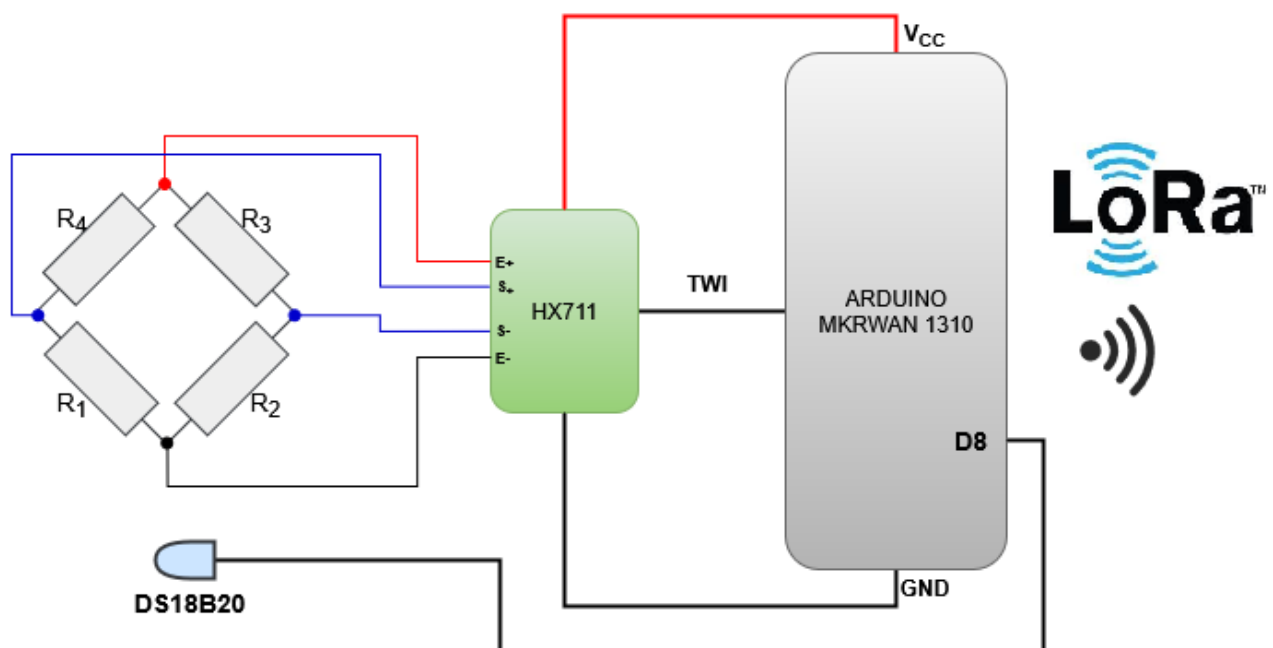


Figura 5.4: Nodo sensor de deformaciones.

5.3. Implementación del sistema de medida

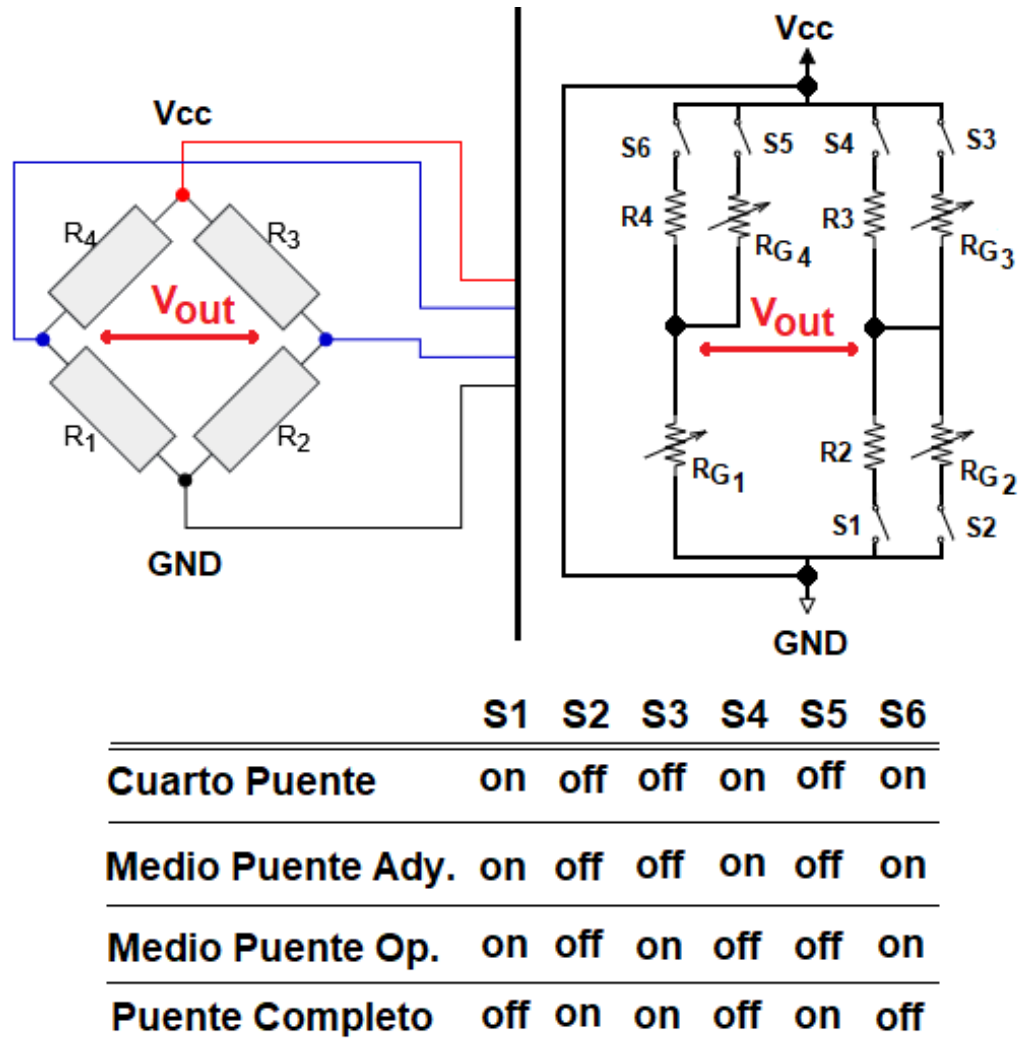


Figura 5.5: Estado de interruptores para las distintas configuraciones del puente de medida.

5.3.1. Módulo HX711

Este módulo proporciona un voltaje de alimentación regulado para el puente de medida ($E+$, $E-$), un amplificador de ganancia programable, dos canales de adquisición, cada uno con un filtro pasabajos cuya frecuencia de corte está situada en 1.6 kHz, y un conversor analógico/digital de 24 bits, suficiente para medir voltajes del orden de cientos de nanovoltios. El módulo tiene dos modos de operación: uno predeterminado, que permite tomar muestras con una cadencia de 10 SPS, y otro que le permite trabajar a 80 SPS, aunque al aumentar la frecuencia de muestreo se pierde precisión en las medidas. Para utilizar este último modo se debe completar el puente de soldadura marcado a la derecha, en la figura 5.6. Allí se ilustra el módulo junto con su diagrama de bloques.

El HX711 requiere que el voltaje de salida del puente tenga un valor medio situado entre $GND+1.2V$ y $AVCC-1.3V$, esto garantiza que su etapa amplificadora (PGA -programmable gain amplifier-) no saturate. El valor AVCC corresponde al voltaje de salida de un regulador de tensión integrado en el módulo que proporciona una tensión estable para el puente.

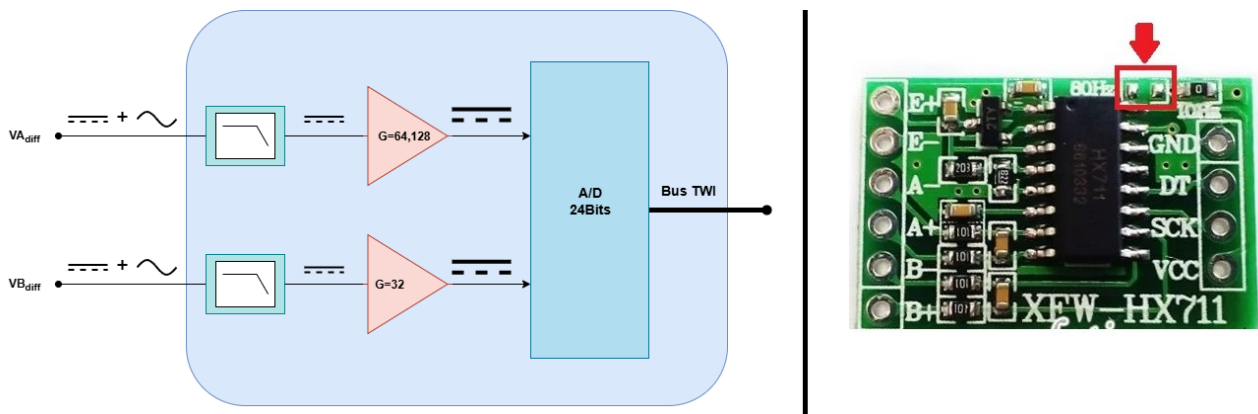


Figura 5.6: Conversor AD de 24 bits, HX711.

Interfaz de comunicación HX711 - Arduino MKRWAN 1310

La comunicación entre el módulo y la placa Arduino MKRWAN se lleva a cabo por medio de una interfaz de 2 cables (TWI -Two Wire Interface-) y un protocolo serial. La implementación del mismo se obtiene de una librería de acceso gratuito desarrollada por Rob Tillart [82], que se puede instalar desde el entorno de desarrollo “Arduino IDE”.

La interfaz es de tipo Maestro-Esclavo: consta de una línea de datos y una línea de reloj; esta última transporta la señal de sincronismo para el intercambio de datos. La placa de control (el Arduino MKR) actúa como el maestro y, por lo tanto, genera la señal de reloj.

El módulo también posee un modo de bajo consumo que se establece poniendo su pin PD_SCK en nivel alto durante al menos $60 \mu s$, y se vuelve al modo de operación normal poniendo a nivel bajo el mismo pin. Para esto la librería provee la función “power_down()”.

5.4. Análisis y Ensayos

Para estudiar el funcionamiento del dispositivo y los efectos antes mencionados se llevan a cabo tres ensayos.

1. **Respuesta de los sensores en estado de reposo** - Se montan cuatro galgas iguales en una barra de sección rectangular y se adquiere un conjunto de 1000 medidas para cada configuración del puente, con el sistema en reposo (sin deformación mecánica) y a una temperatura estable. Luego se realiza un procesamiento estadístico de los datos adquiridos para caracterizar la respuesta del instrumento.
2. **Efecto de deformación aparente sobre las galgas** - Se montan cuatro galgas iguales sobre una barra de acero de sección rectangular que será sometida a un gradiente de temperatura. Se mide la respuesta del dispositivo para distintas configuraciones del puente de medida (cuarto de puente y puente completo).
3. **Respuesta de los sensores ante esfuerzos controlados (respuesta estática)** - Se utiliza una barra de perfil rectangular en voladizo instrumentada con cuatro galgas de $350 \Omega^2$ para la evaluación de la respuesta del circuito de medición desarrollado ante deformaciones por deflexión de la barra. Las medidas son contrastadas contra otros dos puentes de medida comerciales: uno del fabricante TecQuipment, modelo SM1009 [83], y otro desarrollado por Micro-Measurements, modelo P3 [84].

El ensayo consiste en cargar gradualmente la barra en un punto de la misma con pesos conocidos y medir la respuesta con los distintos dispositivos (ver figura 5.7). Las medidas del puente SM1009 son tomadas como valores de referencia (instrumento patrón) y la respuesta es relevada para la configuración de puente completo.

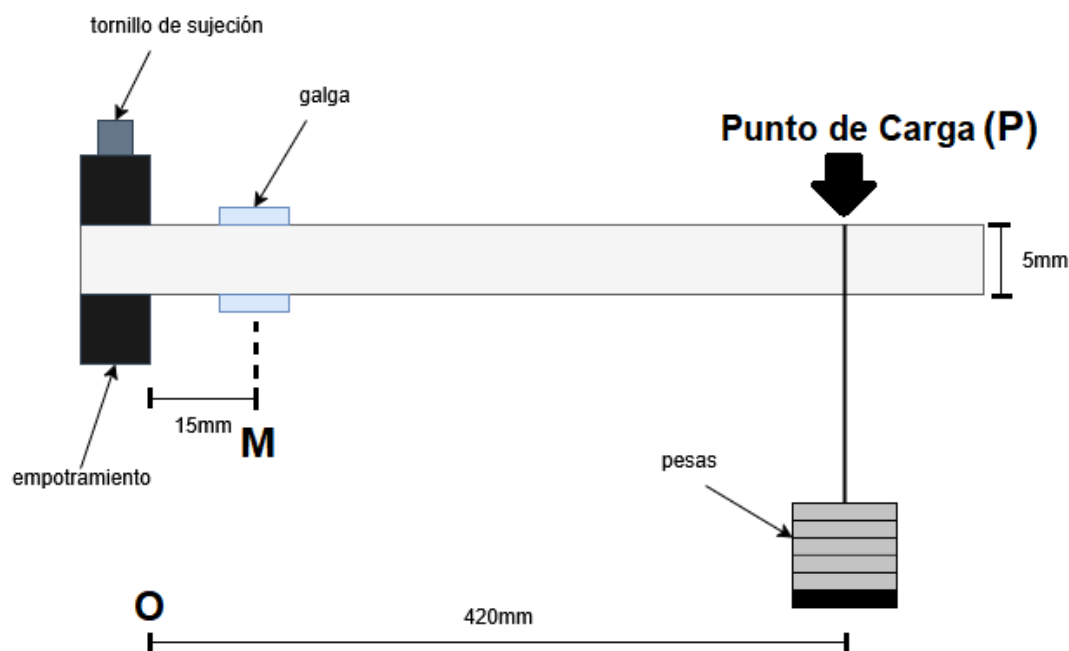


Figura 5.7: Instrumentación de barra en voladizo

²Estas galgas son las que integra el setup SM1009. Si bien el nodo fue desarrollado para trabajar con galgas de 120Ω este no es un requisito excluyente. Se pueden utilizar galgas de distintos valores nominales tomando los recaudos correspondientes. Dado que para el ensayo a realizar se utiliza una configuración de puente completo el valor nominal de las galgas es irrelevante. En el apéndice C.5 se encuentra el análisis que valida esta observación.

5.4. Análisis y Ensayos

Para los ensayos 1 y 2 se montan cuatro galgas iguales de $120\ \Omega$ nominales, marca KYOWA, modelo KFGS-10-120-C1-11, sobre una barra de acero de sección rectangular. Para el montaje se utiliza el adhesivo “»La gotita«”, adquirido en plaza. Este es un pegamento de curado rápido, cuyo componente activo es el cianoacrilato de etilo. Es una solución adecuada para mediciones específicas o ensayos de laboratorio. Para el caso de monitoreo estructural en intervalos prolongados es recomendable el uso de pegamentos epóxicos como el M-Bond 610 [85], ya que son más robustos frente a condiciones de operación en rangos amplios de temperatura. La disposición de las galgas montadas se muestra en la figura 5.8.

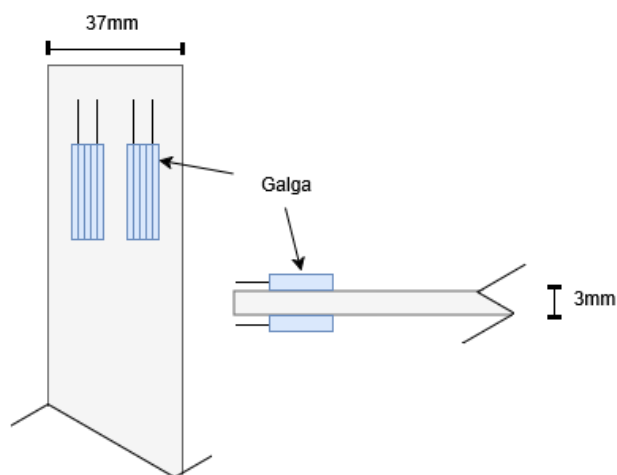


Figura 5.8: Montaje de galgas en barra de acero

5.4.1. Ensayo 1

En la figura 5.9 se muestra el resultado del ensayo para las tres configuraciones del puente de medida. Para cada configuración se toma una media móvil de N valores sobre la serie de lecturas, esto permite filtrar valores espurios o variaciones abruptas ($N = 1, 3, 5, 10, 20, 60$ y 120). De esta forma se puede reconocer la tendencia general de los datos adquiridos.

Como se observa en la figura 5.9 al aumentar el número de galgas activas en el puente las lecturas en condiciones de reposo presentan menor dispersión y valores más cercanos a $0\ \mu\varepsilon$ pues al utilizar un número par de galgas las fluctuaciones de resistencia por temperatura u otras causas se compensan mejor, como sucede en los casos del medio-puente y el puente completo. Además la configuración de puente completo presenta una variación total entre los valores adquiridos mucho menor ($\max(\mu\varepsilon) - \min(\mu\varepsilon)$). Esto tiene que ver con el hecho de que al utilizar 4 galgas del mismo fabricante, del mismo valor nominal y de la misma serie es esperable que no sufran cambios muy dispares de sus resistencias.

5.4.2. Ensayo 2

Al someter la barra de acero a un gradiente de temperatura se observan los efectos de la dilatación/contracción térmica del elemento bajo estudio y de la deformación aparente, ambos se manifiestan como un cambio en la resistencia de la galga. Los resultados se muestran en las figuras 5.10 y 5.11. Como se esperaba, la configuración de $\frac{1}{4}$ -puente se ve notablemente afectada. Al dilatarse la barra debido al aumento de temperatura también lo hace la galga que está adherida a ella, lo cual provoca

5.4. Análisis y Ensayos

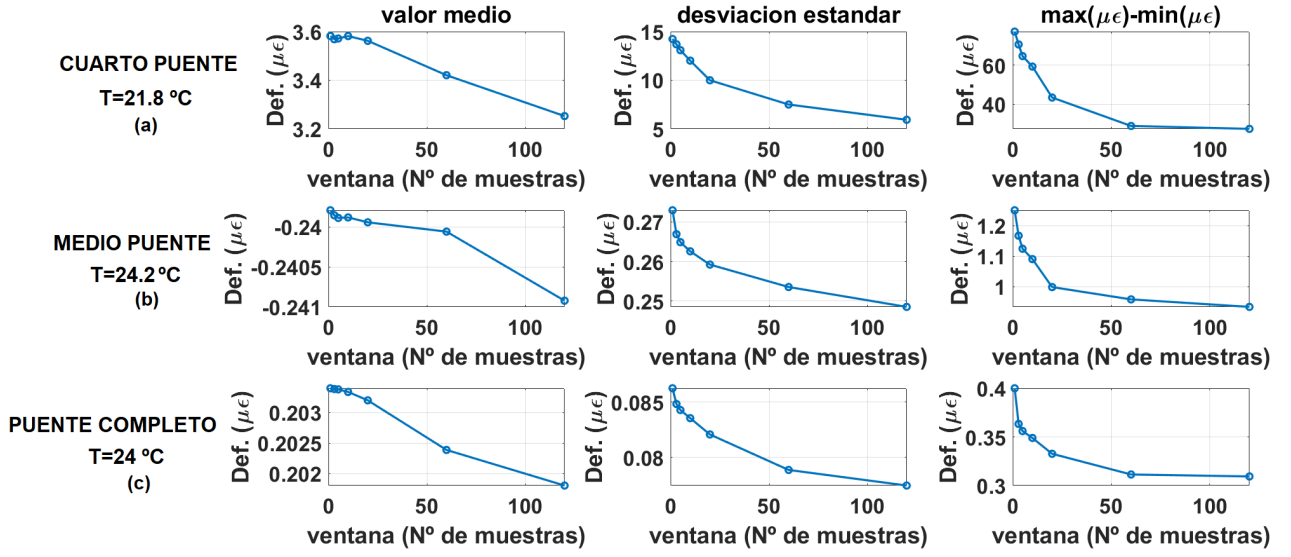


Figura 5.9: Análisis estadístico de las medidas tomadas con el dispositivo desarrollado en condiciones de reposo. (a): valor medio, desviación estándar y rango de medidas realizadas para la configuración $\frac{1}{4}$ -Puente. (b): valor medio, desviación estándar y rango de medidas realizadas para la configuración $\frac{1}{2}$ -Puente. (c): valor medio, desviación estándar y rango de medidas realizadas para la configuración Puente Completo.

un desequilibrio en el puente de medida. Sin embargo, se sabe que existe una contribución a la medida expresada en la gráfica 5.10 debida al efecto de la deformación aparente.

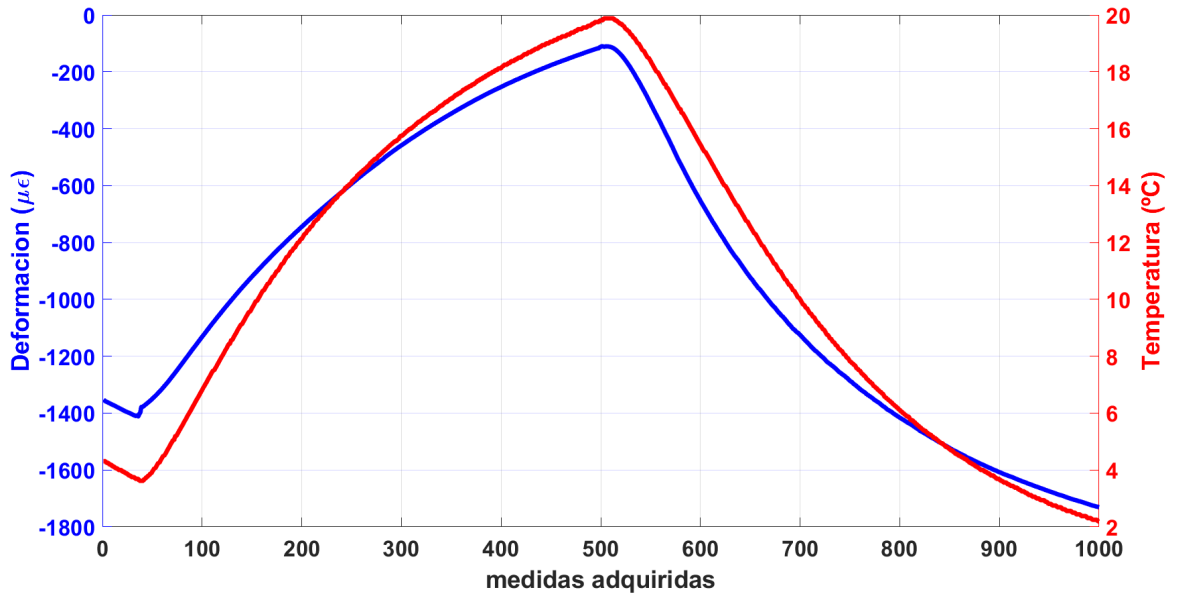


Figura 5.10: Deformación medida en la barra de acero cuando es sometida a un $\Delta T \simeq 20$ °C. La deformación se mide con un circuito en configuración de $\frac{1}{4}$ -puente, lo cual implica que hay una sola galga conectada y se completa el puente con resistencias auxiliares (incluidas en el módulo desarrollado).

En contraposición con el caso anterior, en una configuración de puente completo el cambio en la temperatura prácticamente no afecta las lecturas. La curva de deformación en la gráfica 5.11 no

5.4. Análisis y Ensayos

sigue a la de temperatura, ya que las dos ramas del puente de medida están conformadas por galgas montadas sobre el mismo sustrato, es decir que todas sufren la misma deformación por dilatación térmica. De igual forma, por ser galgas del mismo fabricante y extraídas de un mismo lote de fabricación, sus coeficientes de temperatura (α) y sus factores de galga son muy similares, por lo cual no habrá desequilibrio en el puente de medida y el voltaje medido será en primera aproximación igual a 0.

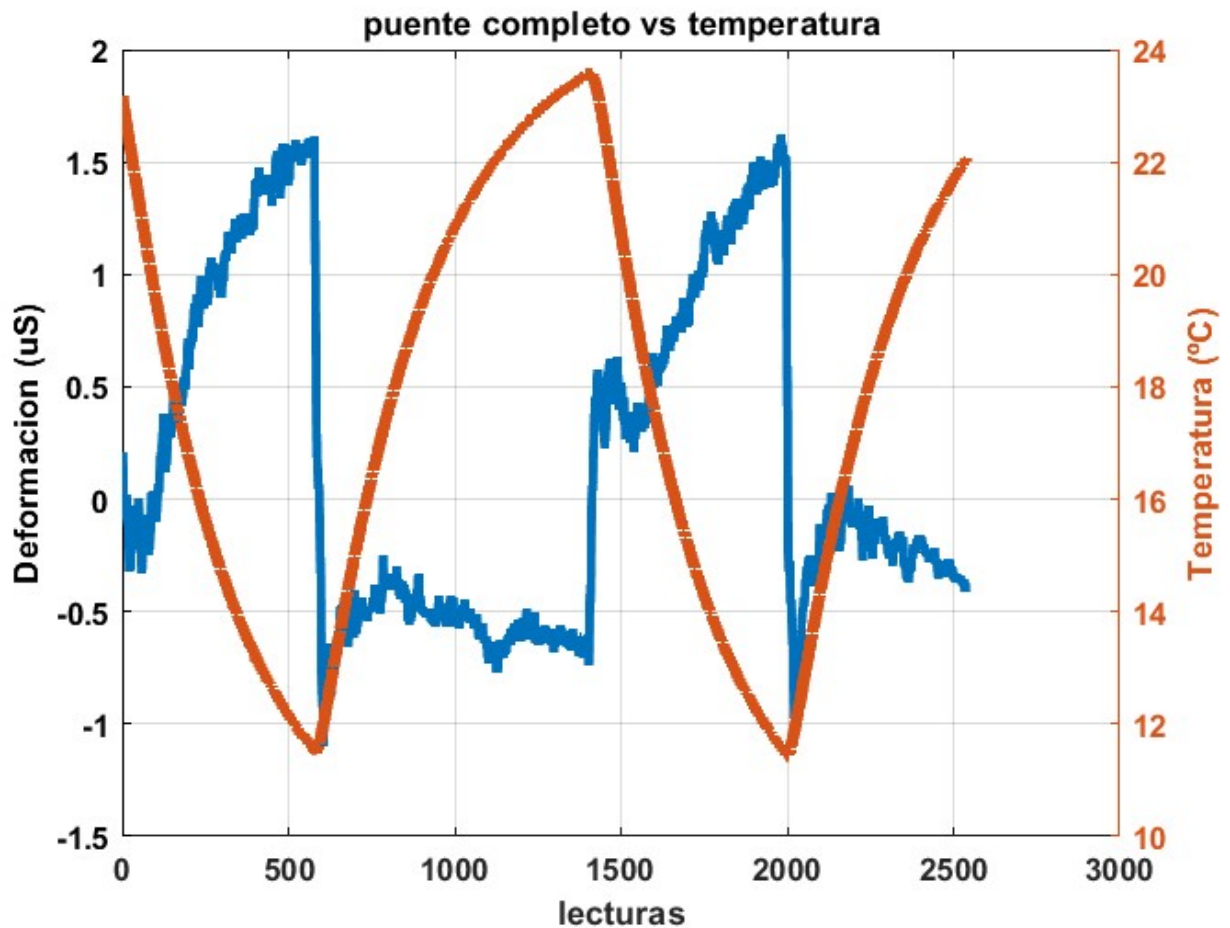


Figura 5.11: Fluctuación de la deformación en función de la temperatura cuando el sistema de medida se somete a un $\Delta T \simeq 10$ °C y no se aplica carga sobre el mismo (sin esfuerzo mecánico).

No es necesario analizar la configuración de $\frac{1}{2}$ -puente, ya que la situación está representada en los dos casos anteriores. Si las galgas se conectan como $\frac{1}{2}$ -puente adyacente, cuando la barra dilate ambas galgas se estirarán en igual magnitud, por lo cual el voltaje en esa rama del puente será $\frac{V_{CC}}{2}$, mientras que en la otra rama las resistencias se mantendrán incambiadas y, como poseen el mismo valor (por diseño), el voltaje en esa rama también será igual a la mitad de la fuente. Por lo tanto, el voltaje diferencial medido se mantendrá igual a 0.

Por otro lado, si se utiliza una conexión de $\frac{1}{2}$ -puente en oposición, el resultado será similar al caso del $\frac{1}{4}$ -puente, con la salvedad de que la deformación medida será del doble de magnitud. Esto se puede deducir del cálculo del voltaje de salida del puente correspondiente a esta configuración (ver anexo C, sección C.3).

5.4.3. Ensayo 3

Instrumentación de una barra en voladizo

El resultado del ensayo se ilustra en la figura 5.12. Allí se observan las respuestas de todos los instrumentos. El instrumento desarrollado presenta una respuesta lineal con una sensibilidad de $28.6 \mu\epsilon/N$ (donde N denota la unidad de fuerza en el SI, el “Newton”) y un valor de $R^2=0.999977$, siendo este el mayor de los tres. Por otro lado la respuesta de los otros dos instrumentos, el P3MM y el SM1009 presentan valores de R^2 iguales a 0.999969 y 0.999913 respectivamente. El error máximo que arroja el nodo desarrollado relativo a la curva determinada por los puentes SM1009 y P3MM es igual a 4.4 % y 1.4 % respectivamente, y se obtiene en el punto correspondiente a la carga máxima en la figura 5.12.

En la figura 5.13 se aprecia la histéresis que presenta el nodo cuando se realiza el ensayo de carga y descarga sobre la barra. La medida parte inicialmente de deformación 0 y en el proceso de descarga termina con una deformación remanente de $-2.6 \mu\epsilon$.

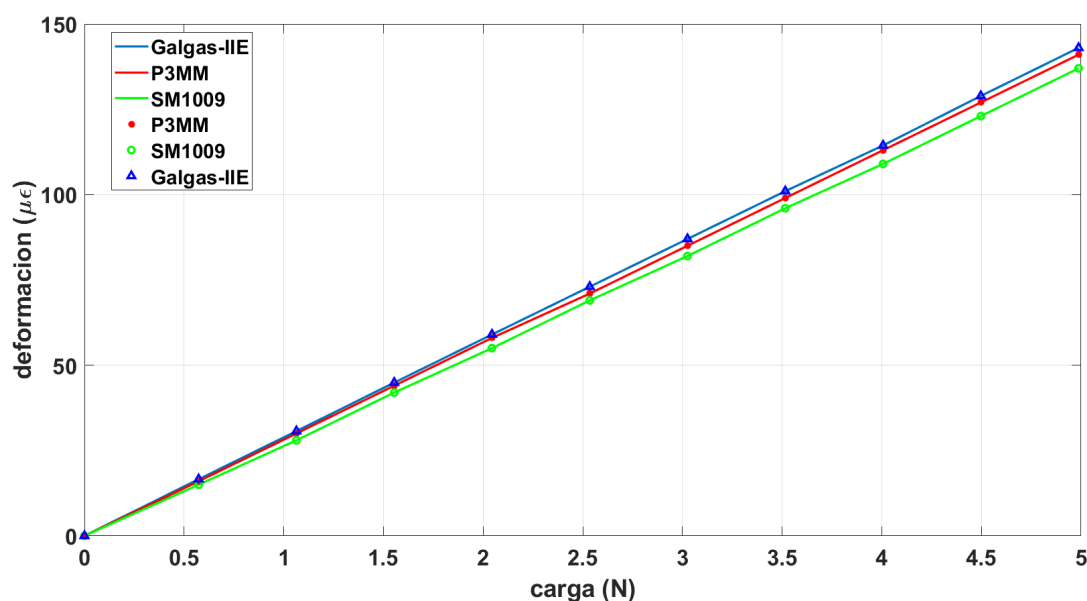


Figura 5.12: Curva de respuesta del instrumento en configuración de puente completo ante esfuerzos controlados.

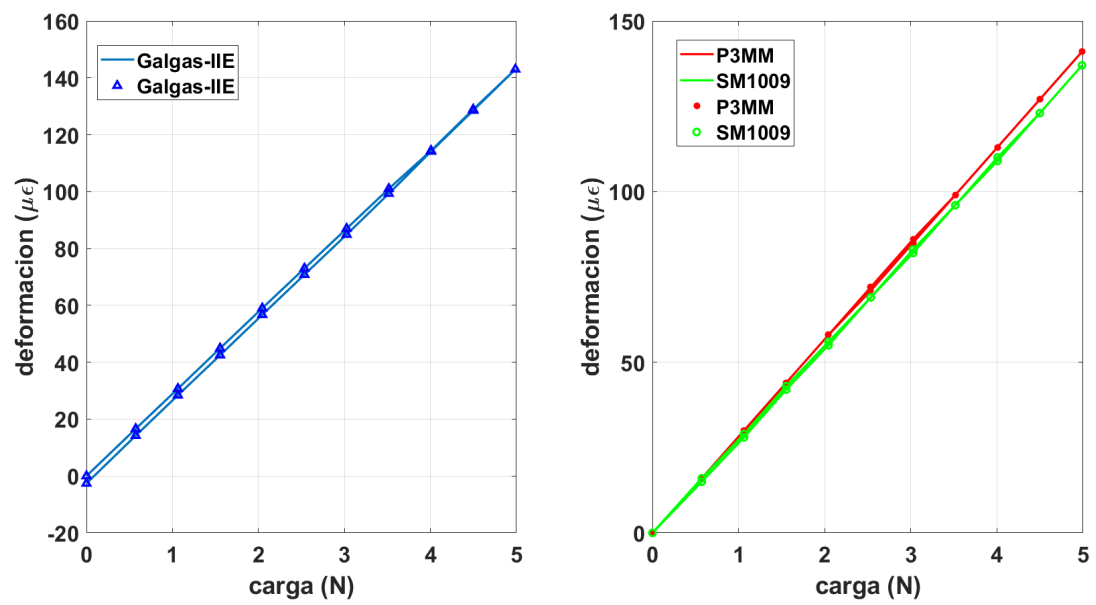


Figura 5.13: Histéresis de la curva de respuesta del instrumento para la configuración Puente Completo ante una fuerza de flexión.

Capítulo 6

Análisis de costos

6.1. Despliegue de la red

Los costos asociados al despliegue de la red implican la adquisición de un gateway y el desarrollo de los nodos.

6.1.1. Gateway

En cuanto al gateway su costo depende principalmente de sus prestaciones (potencia de transmisión, sensibilidad de recepción, flexibilidad de programación). Los hay de dos tipos: de exteriores y de interior. Para el presente trabajo se utilizó el gateway de interior TTIG desarrollado por *The Thing Industries*. Como se puede observar en la tabla 6.1 se trata de un dispositivo con un costo muy bajo en comparación a los demás modelos expuestos. Es importante tener en cuenta que algunos de los *gateways* listados son programables y otros no. Además Algunos también poseen la capacidad de ejecutar un servidor de red internamente que permite desarrollar redes privadas locales. Este no es el caso del dispositivo utilizado.

Tabla 6.1: Datos comparativos sobre gateways LoRaWAN

<i>gateway</i>	Entorno	Fabricante	Distribuidor	Costo (USD)
TTOG	Exterior	TTI	Connected Things	697
MTCDTIP-L4G1-266A-915.R3	Exterior	MultiTech Systems	DigiKey	1353
Wirnet iStation	Exterior	KerLink	Digikey	892
Wise 6610	Exterior	Advantech	Mouser Electronics	1005
MTCDT-247A-915.R3-WW	Interior	MultiTech Systems	DigiKey	593
TTIG	Interior	TTI	Connected Things	101
TTIG Pro	Interior	TTI	Connected Things	108
Laird Sentrius RG1xx	Interior	Laird	Connected Things	279

6.1.2. Nodos

En cuanto a los nodos su costo es más personalizado y puede dividirse en 2 partes. Como se estableció en el capítulo 2 estos dispositivos centralizan su inteligencia en una placa de desarrollo

6.1. Despliegue de la red

Arduino MKRWAN 1310. Esta a su vez integra un módulo de radio LoRaWAN que se encarga de la transacción de datos hacia y desde el usuario final. Esta placa de desarrollo tiene un costo de USD 49 tomando como referencia el distribuidor Mouser Electronics (sin contar costos de envío). Por otro lado, cada nodo cuenta con un circuito de acondicionamiento de señal específico lo que provoca que los costos sean distintos en cada caso.

Nodo de desplazamiento

La tabla 6.2 ilustra los costos asociados al circuito de acondicionamiento del transductor. Concluyendo que dicho circuito presenta un costo total de 14.53 USD. Por lo tanto el costo global del nodo se establece en 63.53 USD.

Tabla 6.2: Circuito de acondicionamiento para nodo de desplazamientos

componente	valor	cantidad	fabricante	distribuidor	costo unitario (USD)
C	2.2 nF	3	KYOCERA AVX	Mouser Electronics	0.28
C	330 uF	1	Wurth Elektronik	Mouser Electronics	0.67
R	470 k Ω	1	YAGEO	Mouser Electronics	0.1
R	27 k Ω	3	YAGEO	Mouser Electronics	0.15
R	68 k Ω	1	YAGEO	Mouser Electronics	0.1
R	100 k Ω	1	YAGEO	Mouser Electronics	0.14
R _V	50 k Ω	2	Vishay	Mouser Electronics	1.86
C	220 μ F	2	Nichicon	Mouser Electronics	0.89
R	10k Ω	4	Vishay	Mouser Electronics	0.1
R	560 Ω	2	Vishay	Mouser Electronics	0.1
D	1N4007	4	Rectron	Mouser Electronics	0.16
AO	LM324 ¹	2	Texas Instruments	Mouser Electronics	0.46
PCB	CIR_A ²	1	PCBWay	—	4.57

Nodo de deformación

La tabla 6.3 expone los componentes utilizados en el nodo los cuales totalizan un valor de 12.54 USD con lo cual el costo total del nodo es de 61.54 USD.

Tabla 6.3: Circuito de acondicionamiento para nodo de deformaciones

componente	valor	cantidad	fabricante	distribuidor	costo unitario (USD)
R ₁₂₀	120 $\Omega \pm 0.1\%$	4	SUSUMU	Mouser Electronics	0.26
Sensor-Temperatura	DS18B20	1	DALLAS Semi	Electronica.uy	4.75
Módulo	HX711	1	AVIA Semi	Electronica.uy	3
Dip-Switch	módulo x8	1	Metaltex	Electronica.uy	3.75
PCB	CIR_A	1	PCBWay	—	4.57

¹cada chip integra 4 amplificadores operacionales

²CIR_A - circuito de acondicionamiento

Comparación de costos

Una vez que se desglozan los costos de cada nodo se procede a realizar una comparación entre estos y circuitos de acondicionamiento comerciales. Las tablas 6.4 y 6.5 exponen este análisis.

Tabla 6.4: Comparación de costos de circuitos comerciales vs. prototipo desarrollado para la medición de desplazamientos

Dispositivo	Fabricante	Distribuidor	Connectividad	Costo (USD)
PGA970EVM ³	Texas Instruments	Worldway Electronics	USB	215
EVAL-CN0288-SDPZ ⁴	Analog Devices	Mouser Electronics	USB	140
Nodo-desplazamiento	Custom	Mouser Electronics	LoRaWAN	63.53

Tabla 6.5: Comparación de costos de circuitos comerciales vs. prototipo desarrollado para la medición de deformaciones mecánicas

Dispositivo	Fabricante	Distribuidor	Conectividad	Costo (USD)
FD-11637 ⁵	National Instruments	Digikey	Ethernet	4331
Student DAQ MM01-350 ⁶	Micro-Measurements	Digikey	USB	459
Nodo-deformación	Custom	—	LoRaWAN	61.54

Es importante hacer algunas consideraciones: Los nodos desarrollados son prototipos por lo cual su costo final será mayor a lo especificado en las tablas 6.4 y 6.5. Además la comparación con los dispositivos comerciales debe hacerse con mucho cuidado y sabiendo que las prestaciones de los dispositivos son muy dispares. Por ejemplo: el dispositivo FD-11637 es capaz de trabajar a una cadencia de 100 kS/s mientras que el nodo desarrollado para medir deformaciones funciona a razón de 10 S/s. Esta diferencia no es gratis y se ve claramente reflejada en el precio del instrumento desarrollado por National Instruments. También hay que considerar que los dispositivos comerciales son productos terminados mientras que los costos asociados a los nodos desarrollados solo involucran a los componentes electrónicos dejando por fuera la carcasa, las baterías, los cables y los conectores. Será responsabilidad de cada diseñador o desarrollador evaluar las distintas características de cada instrumento presentado para poder realizar un análisis de costo más fiel teniendo en cuenta lo que requiera cada aplicación en particular.

³PGA970EVM

⁴EVAL-CN0288-SDPZ

⁵FD-11637

⁶MM01-350

Capítulo 7

Conclusiones

En el presente trabajo se abordó el problema de desarrollar una red de sensores con acceso remoto para monitoreo estructural. En esencia, el trabajo busca responder 3 preguntas:

¿Cuál es la tecnología de red más adecuada para una red de pequeño o mediano porte dedicada a relevar datos estructurales?

¿Es posible implementar un nodo de medición de desplazamientos (LVDT) basado en componentes de bajo costo que se integre a esta red?

¿Es posible implementar un módulo de medición de deformaciones mecánicas basado en componentes de bajo costo que se integre a esta red?

Las respuestas se dan con el desarrollo de un prototipo de red basado en LoRaWAN y dos módulos sensores desarrollados y operativos.

Tecnología de Red LoRaWAN

Tanto la tecnología LoRaWAN como la red comunitaria global de dispositivos gestionados a través de la interfaz de *The Things Network* proporcionan una solución de gran facilidad al momento de desplegar una red de IoT desde cero. El administrador solo debe registrar los nodos y los gateways utilizados en la interfaz para habilitar la transferencia de datos. El hecho de que el plan regional que involucra a Uruguay, el AU915, no imponga limitaciones en el ToA o en el Duty-Cycle representa una ventaja adicional. Por lo cual la tasa de envío de datos solo será limitada por la interacción de los nodos sobre la red. Para regular este aspecto *The Things Network* proporciona la funcionalidad de *Data Rate* adaptativo (ADR) que gestiona los parámetros de transmisión de los nodos (SF y la potencia de transmisión) para que la red no se sobrecargue.

Nodo LVDT

Se desarrolló un acondicionador de señal para un sensor de desplazamientos LVDT de 6 hilos. El circuito posee una sensibilidad de $94.7 \mu\text{m}/\sqrt{\text{V}}$ y una apreciación tal que permite medir desplazamientos del orden de $10 \mu\text{m}$ con una incertidumbre expandida máxima de $\pm 0.26 \text{ mm}$ en todo el rango nominal de movimiento ($\pm 25.4 \text{ mm}$). Aunque este valor de incertidumbre parece muy elevado no refleja con certeza los resultados ya que en gran parte del rango de operación del transductor la incertidumbre es aproximadamente cuatro veces menor. El factor determinante en la incertidumbre es la componente de no linealidad que viene dada por los parámetros constructivos del sensor, tal como lo especifica el fabricante. Esto quiere decir que para obtener mediciones más precisas será necesario trabajar en un

rango de movimiento más pequeño en torno a la posición central del transductor, que como se mostró en un capítulo anterior es altamente repetible, presentando una desviación estándar de $1.5 \mu\text{m}$. Otra alternativa es realizar curvas de calibración en distintos tramos del rango de operación, ajustando el factor de escala para cada tramo. De esta manera se logra reducir aún más el error.

Se concluye que es posible desarrollar instrumentos de precisión en base a componentes de bajo costo y disponibles en el medio local. En contrapartida, es necesario contar con un instrumento patrón muy preciso, lo cual es costoso pero representa una inversión de largo plazo y permite calibrar un gran número de instrumentos.

Nodo Galgas Extensiométricas

Se desarrolló un circuito de acondicionamiento y adquisición de medidas de deformación mecánica basado en el módulo de bajo costo HX711. Este proporciona un voltaje estable, una etapa de filtrado y amplificación de señal y un conversor AD de 24 bits que permite medir variaciones de resistencia muy pequeñas asociadas a deformaciones mecánicas en un material. Específicamente, el circuito desarrollado presenta una sensibilidad de $28.6 \mu\epsilon/\text{N}$. Su funcionamiento fue contrastado frente al de dos puentes de medida comerciales: el P3MM del fabricante Micro-Measurements y el SM1009 de TEQuipment, arrojando un error máximo de 1.4 % y 4.4 % frente a los respectivos dispositivos.

Finalmente, en base a los ensayos realizados se puede concluir que la temperatura es una variable muy relevante en la medición de las deformaciones, pues ocasiona el efecto de “deformación aparente” que debe ser compensado utilizando una configuración de puente adecuada ($\frac{1}{2}$ -puente adyacente o puente completo), galgas “dummy” o galgas autocompensadas para el material a tratar. Teniendo esto en cuenta, el módulo integra un sensor de temperatura DS18B20 cuyo valor es transmitido a la red junto con la medida de la deformación.

Costos asociados al despliegue de la red

En el capítulo 6 se realizó un análisis acerca de los costos implicados en el desarrollo de la red de sensores que implica la elección de uno o varios gateways y el desarrollo de los nodos de medición. En base a esto y a una comparación realizada entre los costos asociados a cada nodo y dispositivos comerciales se puede concluir que los prototipos logrados son de bajo costo relativo frente a los dispositivos existentes en el mercado sin dejar de lado que estos últimos son productos finales y que poseen características técnicas muy superiores en ciertos aspectos. Sin embargo la realización de dispositivos de bajo costo es posible ajustando las especificaciones de los nodos a los requerimientos particulares de cada aplicación. De esta manera se logra optimizar el Hardware y el Firmware, lo cual permite en definitiva reducir costos. Adicionalmente, la placa de desarrollo que gobierna los nodos se encuentra sub-utilizada por lo cual también se podrían optimizar los costos de cada uno utilizando una placa más básica integrada a un módulo de radio LoRaWAN o por el contrario agregar complejidad a los nodos para sacarles mayor provecho. Un ejemplo claro sería aumentar la cantidad de sensores que gestiona cada placa, que en la red desplegada se traduciría en fusionar los dos nodos en uno solo utilizando un solo Arduino MKRWAN 1310.

7.0.1. Trabajos Futuros

Red LoRaWAN

Existe un tiempo de latencia en el proceso de conexión de los nodos a la red que podría reducirse utilizando el modo de activación ABP ya que en este modo los dispositivos se conectan a la red una

única vez, aunque esto volvería más vulnerable a la red ante amenazas, ya que las claves de autenticación permanecen fijas y solo pueden cambiarse accediendo físicamente al nodo. Otra opción sería instalar un servidor de red propio en la facultad o en un gateway adecuado (programable) para reducir esta latencia aunque esto aumentaría la complejidad de la red.

Para continuar evaluando el rendimiento de la red podría realizarse un ensayo disminuyendo gradualmente el intervalo de tiempo entre cada transmisión de paquetes para determinar el intervalo efectivo mínimo admitido.

Consumo energético

Optimizar el consumo energético de los nodos no constituye un objetivo principal de este trabajo, sin embargo algunos comentarios al respecto resultan pertinentes.

El consumo depende en gran medida de la distancia entre el nodo y el *gateway*: a mayor distancia, mayor será la potencia de transmisión requerida para garantizar la correcta recepción de los paquetes. Tanto el módulo HX711 como las placas de desarrollo Arduino MKR1310 cuentan con modos de bajo consumo. En el caso del Arduino, esta funcionalidad se encuentra implementada apagando únicamente los periféricos. No obstante, la librería utilizada “*ArduinoLowPower*” proporciona dos niveles adicionales de bajo consumo: modo “*sleep*” y modo “*deep-sleep*”. Estos modos desactivan el módulo LoRa, por lo cual al reactivar el sistema se debe restablecer la conexión del nodo a la red, lo cual generaría retardos en la toma de las medidas. Para implementarlos es necesario hacer pruebas de funcionamiento y verificar que el sistema sigue funcionando conforme a lo esperado.

Almacenamiento de datos

Como método de respaldo de datos podría incorporarse a cada nodo un módulo con zócalo para tarjeta microSD, de manera que antes de realizar una transmisión, las mediciones de los sensores se almacenen en la tarjeta. Esto podría complementarse con una opción en la interfaz de usuario que permita pedir a un nodo, junto con la medida correspondiente, una medida realizada anteriormente.

Nodo LVDT

Para obtener mediciones aún más precisas podría implementarse una calibración por tramos. Tomando como referencia las posiciones establecidas por el actuador NRT150/M se podrían hacer correcciones en distintos tramos del rango nominal de operación del sensor para ajustar sus medidas a las posiciones que marca el actuador.

La señal resultante del oscilador implementado presenta algunos picos que pueden deberse a la impedancia de entrada del LVDT a la frecuencia de excitación, ya que este representa una impedancia de tipo RLC. Para eliminar este efecto se debe relevar la respuesta en frecuencia del sensor y diseñar la etapa de salida del oscilador para que sea capaz de soportar la carga del sensor (brindar suficiente corriente).

La respuesta en frecuencia de los rectificadores puede mejorarse utilizando diodos de recuperación rápida como los diodos Schottky y amplificadores operacionales con mayor *Slew-Rate*.

La apreciación del instrumento puede aumentarse sin necesidad de promediar un mayor número de lecturas. Una forma de lograrlo sería reducir la referencia de tensión del conversor analógico-digital (ADC). Sin embargo, dado que los voltajes de cada bobina secundaria se digitalizan por separado, estos nunca toman valores cercanos a 0 V. Más aún, las tensiones de continua resultantes de los rectificadores se mantienen en un rango aproximado entre 1.5 V y 2.7 V. Por lo tanto, si se utilizara una

referencia de tensión más baja (por ejemplo, 1.65 V, que es uno de los valores internos que provee la placa de desarrollo utilizada), los voltajes adquiridos saturarían el conversor antes de que el núcleo alcanzara su recorrido máximo, limitando así el rango útil de medición. Por lo tanto, también se tendría que reducir el voltaje de entrada a los rectificadores y, por ende, el voltaje de excitación del devanado primario del LVDT.

Nodo de deformaciones

En el prototipo actual la configuración de puente se elige conmutando los interruptores de la placa y ajustando el factor de escala en la interfaz de usuario. Esta no es una solución muy práctica. Lo óptimo es utilizar interruptores programables como el TS3A4751 de Texas Instruments que proporciona 4 interruptores normalmente abiertos. Usando un chip por cada rama del puente se podría controlar totalmente en forma remota la configuración del puente. Esto permitiría, a su vez, colocar el máximo número de galgas en la estructura bajo estudio y luego variar la configuración de conexión a conveniencia desde una PC.

Actualmente el circuito implementado solo incorpora resistencias fijas de 120 Ω . Sería bueno agregar resistencias de 350 y hasta de 750 Ω , que son los valores estándar más utilizados para galgas. De esta manera se obtendría un dispositivo más flexible sin aumentar mucho el costo de fabricación. Cuando se utilizan configuraciones de $\frac{1}{2}$ -puente o puente completo el dispositivo puede trabajar indistintamente con galgas de diferente valor nominal no así cuando se utiliza una configuración de $\frac{1}{4}$ -puente pues en ausencia de deformaciones mecánicas el circuito produciría un voltaje de offset significativo que no sería eliminado con la resta de las señales de ambas ramas por lo tanto las variaciones de voltaje producidas por la acción de una deformación del sustrato sobre el cual se halla montada la galga serían imperceptibles.

Apéndice A

Configuración de red

A.0.1. Registro de Gateway en TTN

Para esto es necesario crear una cuenta de usuario en TTN, luego ingresar a la “consola” y allí seleccionar la pestaña “Gateways” y luego la pestaña “+ Register Gateway”. Hecho esto, solo se requiere el Gateway EUI (número de identificación que se encuentra impreso en el dispositivo) para completar el registro (esta operación se debe efectuar con el dispositivo desconectado de la red WiFi).

A.0.2. Registro de nodo en TTN

Para registrar un nuevo nodo en TTN se debe seguir el siguiente procedimiento:

1. Ingresar a la consola de nuestra cuenta en TTN.
2. Elegir la aplicación deseada (“rsi-maestria”).
3. Seleccionar “end-devices”.
4. Seleccionar “add new end device”.
5. Configurar dispositivo manualmente (“Enter end device specifics manually”):
 - a) Frequency Plan - Australia 915-928Hz, FSB 2 (Used by TTN).
 - b) LoRaWAN version - LoRaWAN Specification 1.0.2.
 - c) Regional Parameters version - RP001 Regional Parameters 1.0.2 revision B.
6. Establecer una JoinEUI (contraseña de 16 números). Puede ser la misma para todos los dispositivos de la red. Si no la sabemos, la podemos inventar (lo importante es que el par JoinEUI/-DevEUI sea único para todos los nodos de la red).
7. Establecer el DevEUI (se adquiere del propio nodo. En el caso de Arduino MKR se ejecuta el *sketch* de ejemplo “FirstConfiguration” de la librería “MKRWAN”).
8. Generar una AppKEY (se genera desde la plataforma).
9. Establecer un nombre para el nodo.

A.0.3. Configuración de los nodos de red

Para configurar los nodos solo se deben conocer la APP_EUI (identificador único de cada módulo LoRa) y la APP_KEY, que es generada por TTN al momento de registrar el nodo. A partir de estas se generan las demás claves de activación. Luego se elige el plan regional de la red, que en este caso es el AU915. Finalmente, se inicia el proceso de activación a través de uno de los dos modos: OTAA o ABP.

La implementación desarrollada en este trabajo tiene una lógica de bucle en la cual cada nodo intenta conectarse a la red un número predeterminado de veces. Si no lo logra, corta el proceso de conexión y vuelve al bucle principal del firmware donde espera un tiempo determinado y vuelve a intentar la conexión. El diagrama de flujo A.1 ilustra este proceso.

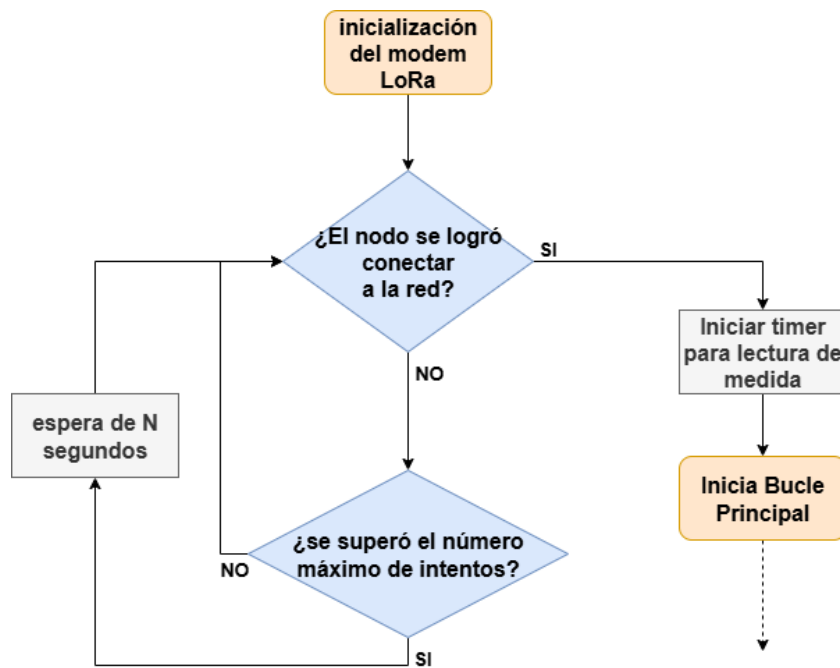


Figura A.1: Diagrama de flujo de firmware asociado a la conexión de un nodo a la red

A.0.4. Creación de una interfaz de usuario de TagoIO

TagoIO es una plataforma web que facilita la manipulación de datos y permite confeccionar dashboards para su visualización y el control de dispositivos a distancia. Para utilizar sus funcionalidades primero hay que crear un usuario y registrar los dispositivos desde donde se obtendrán los datos a gestionar. En este caso se cuenta con 2 nodos de red. Es necesario especificar que los datos van hacia el servidor de red y este es el encargado de enlazarlos con TagoIO. Para esto hay que realizar una "integración" desde la consola (interfaz) de TTN seleccionando en primer lugar la aplicación a la cual se desea realizar la integración. En el menú izquierdo seleccionar "*WebHooks/+ Add WebHooks/TagoIO*". Una vez que se crea el enlace de datos se procede a crear una cuenta en TagoIO y luego a la confección del dashboard para la visualización de los datos. Para acceder al dashboard el usuario debe ingresar a su cuenta y luego seleccionar en el panel lateral izquierdo el nombre del mismo, por ejemplo "Dashboard_Red_de_Sensores"

A.0.5. Descarga de datos desde la interfaz de usuario de Tagolo

Para descargar los datos desde el *dashboard* se debe presionar sobre el símbolo de los tres puntos verticales en la esquina superior derecha de la gráfica correspondiente a cada sensor 2.6. Luego hay que presionar el botón “*Export to*” y finalmente elegir el formato de descarga (CSV o XLSX).

A.0.6. Codificación de las tramas LoRaWAN en los nodos de red

Los datos relevados por los sensores integrados a los nodos se envían en formato serial, un byte a la vez, como caracteres ASCII. Primero se traducen al sistema binario y luego se codifican separando los 4 bits más significativos, los 4 menos significativos y representando cada paquete de 4 bits según el correspondiente número hexadecimal. Por ejemplo: para transmitir el número 128 el procedimiento es el siguiente:

1. Separar los dígitos: 1-2-8.
2. Tomar su código ASCII correspondiente: 1→49, 2→50, 8→56.
3. Convertir cada valor a binario: 49→00110001, 50→00110010, 56→00111000.
4. Agrupar 4 bits de cada valor en un dígito hexadecimal: 49→ $\overbrace{0011}^3 \overbrace{0001}^1 = 31$, 50→ $\overbrace{0011}^3 \overbrace{0010}^2 = 32$, 56→ $\overbrace{0011}^3 \overbrace{1000}^8 = 38$.
5. Por lo tanto, la trama de datos enviada será: 31 32 38.

Decodificación de payload LoRaWAN en TTN

Del lado del servidor, los datos serán decodificados por un *script* desarrollado en lenguaje JavaScript que les da formato, recuperando la información a partir de las tramas recibidas.

```
1 // Decoder function for uplink messages
2 function Decoder(bytes, port) {
3   // Decode an uplink message from a buffer
4   // (array) of bytes to an object of fields.
5   var galga = {};
6   var aux = {
7     "deformacion": "",
8     "temperatura": "",
9     "Npromedios": "",
10    "unidadTiempo": "",
11    "intervaloMedida": "",
12    "tipoPuente": "",
13  };
14  var datos = bytes;
15  let configParam = 0;
16
17  function Number2ASCII(_number){
18    return (String.fromCharCode(_number));
```

```

19 }
20
21 for (let i = 0; i < datos.length; i++) {
22     let caracter = Number2ASCII(datos[i]);
23     switch (configParam) {
24         case 0:
25             if (caracter !== ',') {
26                 aux.deformacion += caracter;
27             } else {
28                 configParam++;
29             }
30             break;
31         case 1:
32             if (caracter !== ',') {
33                 aux.temperatura += caracter;
34             } else {
35                 configParam++;
36             }
37             break;
38         case 2:
39             if (caracter !== ',') {
40                 aux.Npromedios += caracter;
41             } else {
42                 configParam++;
43             }
44             break;
45         case 3:
46             if (caracter !== ',') {
47                 aux.unidadTiempo += caracter;
48             } else {
49                 configParam++;
50             }
51             break;
52         case 4:
53             if (caracter !== ',') {
54                 aux.intervaloMedida += caracter;
55             } else {
56                 configParam++;
57             }
58             break;
59         case 5:
60             aux.tipoPuente += caracter;
61             break;
62     }
63 }
64
65 galga.deformacion = Number(aux.deformacion);

```

```

66     galga.temperatura = Number(aux.temperatura);
67     galga.Npromedios = Number(aux.Npromedios);
68     galga.unidadTiempo = aux.unidadTiempo;
69     galga.intervaloMedida = Number(aux.intervaloMedida);
70     galga.tipoPuente = Number(aux.tipoPuente);
71
72     return galga;
73 }

```

A.0.7. Descripción de tramas LoRaWAN

Las redes LoRaWAN que utilizan las versiones 1.0.x del protocolo trabajan con dos tipos de mensajes: *Uplink* y *Downlink*. Dentro de los mensajes de subida se encuentran dos subtipos: el *join-request*, utilizado cuando un nodo pretende iniciar una sesión o conectarse a la red, y los mensajes *Uplink-data message*, que un nodo envía a la aplicación final o integración que brinda la interfaz de usuario. Por el lado de los mensajes descendentes se encuentra el *join-accept*, que es la confirmación de conexión de un nodo a la red, y los *Downlink-data message*, enviados desde la aplicación final al nodo correspondiente.

- *join-request*
- *join-accept*
- *Uplink-data message*
- *Downlink-data message*

Cada mensaje o trama LoRa cuenta con cinco campos en su capa física: un preámbulo que indica que se enviará un nuevo mensaje, un encabezado que transmite información sobre la trama a enviar (largo, CR, etc.), un código de verificación del encabezado, la carga útil o *payload* de la trama y otro código de verificación (CRC) para el campo anterior.

Dentro de la carga útil se encuentra la información de subcapa MAC o la trama LoRaWAN propiamente: un encabezado (*MHDR*), la carga útil de capa MAC que contiene los datos útiles y un código de verificación (*MIC*) para el mensaje.

Finalmente, dentro de la carga útil de capa MAC se encuentra el mensaje específico LoRaWAN que contiene tres campos: un encabezado de trama (Frame-Header o FHDR), un puerto de trama (Frame-Port o FPort) cuyo valor indica el propósito del mensaje como se observa en la tabla A.1 y la información relativa a los sensores (carga útil).

Los mensajes que contienen únicamente comandos de control MAC son encriptados con la *NwkSKey*, mientras que los mensajes con datos específicos de aplicación se encriptan con la *AppSKey*. En la figura A.2 se puede observar la estructura de la trama LoRaWAN.

Tabla A.1: Puertos de trama (FPort) y su descripción en el protocolo LoRaWAN

FPort	Descripción
0	Comando de control MAC (ver [67])
1-223	Datos específicos de la aplicación (lectura de sensores, etc.)
224	Protocolo de prueba de la capa MAC de LoRaWAN
255	Reservado para uso futuro

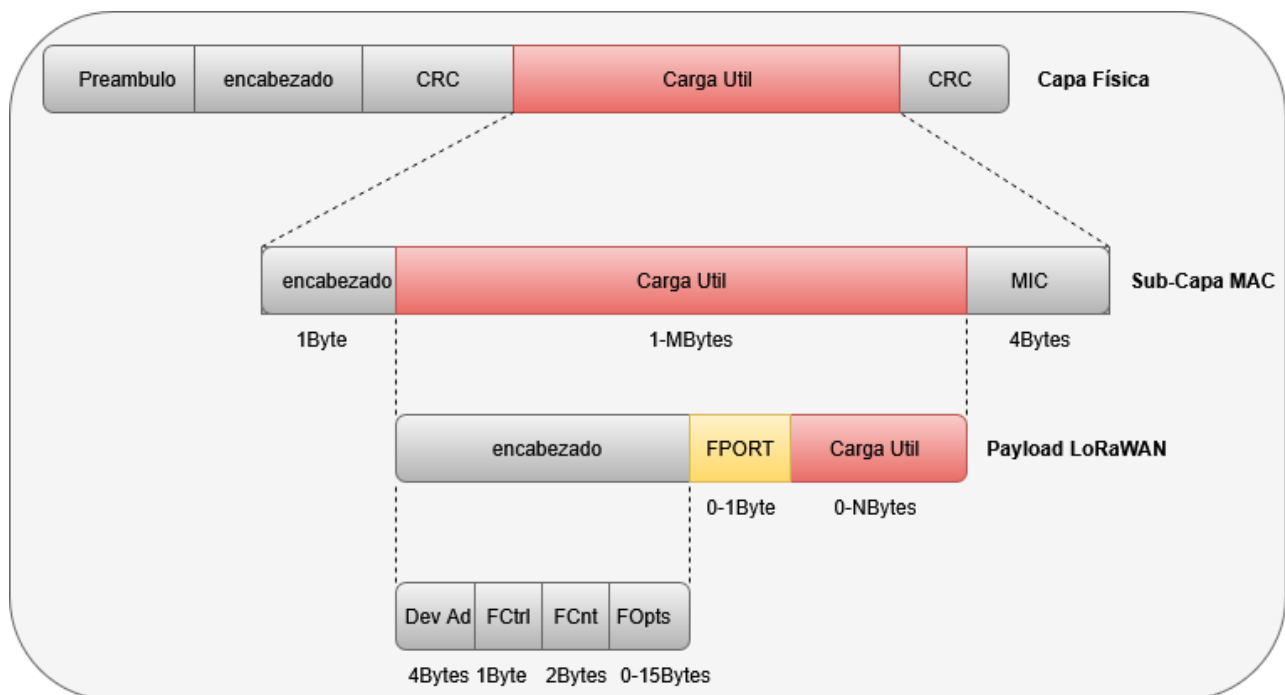


Figura A.2: Tramas LoRaWAN, figura extraída de [65]

Apéndice B

Parámetros de configuración de nodos de red

Existen 4 parámetros configurables para los nodos de la red:

1. la unidad de tiempo (“s” (segundos), “m” (minutos), “h” (horas))
2. el intervalo de tiempo entre lecturas (número entero entre 0 y 65535)
3. el número de lecturas de los sensores, promediadas por la placa de control (Arduino MKRWAN 1310) para calcular la medida de la magnitud de interés enviada al servidor (número entero entre 0 y 65535)
4. la configuración del puente de medida (CUARTO PUENTE, MEDIO PUENTE y PUENTE COMPLETO)

Como implementación a futuro, y teniendo en cuenta que la aplicación del sistema desarrollado puede implicar su instalación en sitios muy inhóspitos, en el nodo que mide deformación es deseable agregar un botón en la interfaz de usuario (*dashboard* de TagoIO) que permita “tarar” la medida del puente. Es decir, relevar un conjunto de medidas, promediarlas y tomar ese valor como nuevo valor de cero (análogo al caso de una balanza).

Apéndice C

Cálculos Analíticos

C.1. Modelo teórico de la deformación por deflexión de una barra en voladizo

En este apéndice se expone el cálculo de la deformación de una barra de acero en un punto M debido a la deflexión producida por una fuerza aplicada sobre otro punto P de la misma.

La deformación se mide en el punto medio de la zona activa de las galgas (dimensión A, descrita en la tabla 5.1). La deflexión de la barra por acción de una masa colgante en un punto P responde a la ecuación C.2. Las magnitudes requeridas para el cálculo son especificadas por el fabricante del set-up o relevadas experimentalmente (L y x), las mismas se muestran en la tabla C.1.

Tabla C.1: Magnitudes requeridas para el cálculo de la deflexión en una barra en voladizo

ancho sección transversal	b	0.037 m
espesor de la barra	h	0.003 m
módulo de Young del acero dulce	E	207 GPa
distancia OP	L	0.42 m
distancia OM	x	0.015 m
aceleración gravitatoria	g	9.81 m/s ²

$$\nu(P) = \frac{x^2}{6EI}(3L - x) P \quad (C.1)$$

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (C.2)$$

siendo ν el desplazamiento vertical del punto de interés e I el momento de inercia de una barra de perfil rectangular.

Luego, para calcular la deformación lineal del elemento estructural se consideran las siguientes relaciones:

C.1. Modelo teórico de la deformación por deflexión de una barra en voladizo

$$\sigma = E\varepsilon, \text{ ley de Hooke} \quad (\text{C.3})$$

$$\sigma = \frac{M \times \frac{h}{2}}{I} \quad (\text{C.4})$$

$$M(x) = P(L - x) \quad (\text{C.5})$$

donde σ es la tensión superficial sobre la barra y M representa el momento flector actuando sobre el punto de medida.

Sustituyendo C.5 en C.4 y luego en C.3 se obtiene la expresión de la deformación lineal en un punto x , en función de la fuerza aplicada.

$$\varepsilon_x(P) = \frac{(L - x)h}{2EI} P, \text{ } P \text{ en Newton} \quad (\text{C.6})$$

En las figuras C.1 y C.2 se pueden observar las respuestas de los instrumentos comparadas contra la respuesta arrojada por el modelo teórico.

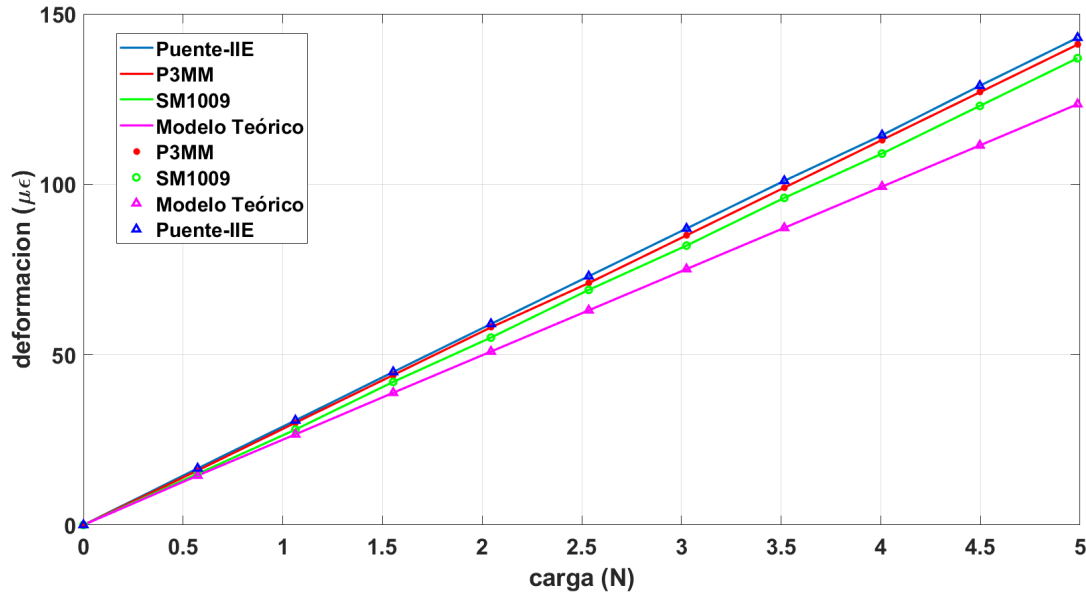


Figura C.1: Respuesta estática de un puente completo ante una carga variable aplicada sobre el punto P

El modelo analítico contra el cual se contrastan las mediciones predice una mayor rigidez del elemento estructural bajo estudio que la reportada por todos los instrumentos utilizados para medir la deformación en un punto. Entre las posibles fuentes de error se encuentran el módulo de elasticidad de la barra, que es provisto por el fabricante del set-up, pero debería medirse experimentalmente para reducir su incertidumbre. Las dimensiones de la barra también son reportadas por el fabricante, aunque fueron medidas con un calibre de tipo “pie de rey” para reducir su incertidumbre y validar sus valores, aunque esto no eliminó el error en las lecturas predichas por el modelo. Una fuente potencial de error se halla en el punto de empotramiento de la barra, ya que un muy pequeño giro puede ocasionar un desplazamiento vertical de la barra cuando es cargada, lo que modifica en gran medida las lecturas experimentales. Para poner en contexto lo anterior, se sabe que para ángulos pequeños el arco descrito por el punto en cuestión (sobre el cual se encuentran montadas las galgas) aproxima la

C.2. Maximización de la sensibilidad de un puente de medida

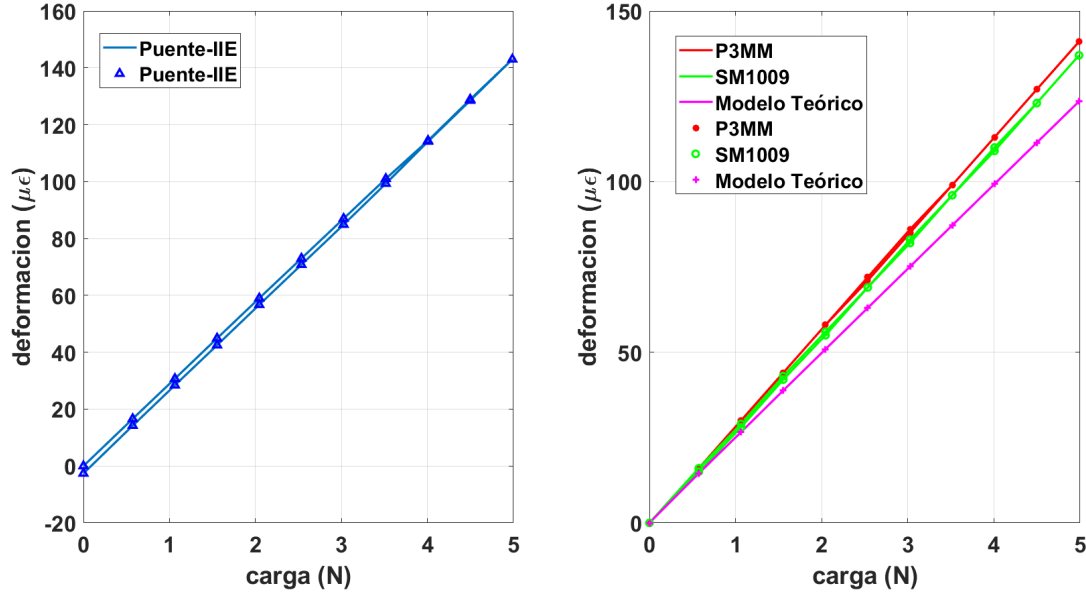


Figura C.2: Histéresis en la respuesta de los distintos dispositivos y en el modelo teórico

deflexión vertical del punto. Considerando el giro del punto x respecto al empotramiento se tiene que el arco descrito es $\delta_x \simeq \theta \times x$. Luego, para un ángulo de 0.1 grados expresado en radianes $\theta = 0,0017$ rad, y sabiendo que $x = 15$ mm, se tiene que $\delta_x \simeq 0,026$ mm mientras que el desplazamiento calculado según el modelo analítico para una carga de 5,0 N (máxima del ensayo) es de 0.0057 mm. De manera que un mínimo giro del punto de empotramiento puede modificar ampliamente las medidas, y este error no sería detectado por ninguno de los instrumentos utilizados.

C.2. Maximización de la sensibilidad de un puente de medida

La sensibilidad del puente respecto a las variaciones de la resistencia de la galga viene dada por la derivada del voltaje de salida.

$$S(R_G) = \frac{d(V_{out})}{dR_G} \quad (C.7)$$

$$\frac{dV_{out}}{dR_G} = \frac{d\left(\frac{R_G}{R_G + R_1} V_{CC} - \frac{R_3}{R_3 + R_2} V_{CC}\right)}{dR_G} = \frac{R_1 V_{CC}}{(R_G + R_1)^2} \quad (C.8)$$

Luego, se elige R_1 de tal forma que maximice la función de sensibilidad. Para esto es necesario derivar la función C.7 nuevamente, pero respecto a R_1 e igualar a 0.

C.3. Configuraciones de conexión de un puente de medida

$$\frac{dS(R_1)}{dR_1} = 0 \iff \quad (C.9)$$

$$\left(\frac{(R_G + R_1)^2 - 2(R_G + R_1)R_1}{(R_G + R_1)^4} \right) V_{CC} = 0 \iff \quad (C.10)$$

$$(R_G + R_1)^2 - 2(R_G + R_1)R_1 = 0 \iff \quad (C.11)$$

$$(R_G + R_1)^2 = 2(R_G + R_1)R_1 \iff \quad (C.12)$$

$$R_G^2 + R_1^2 + 2R_1R_G = 2R_1^2 + 2R_1R_G \iff \quad (C.13)$$

$$R_G^2 = R_1^2 \iff \boxed{R_1 = R_G} \quad (C.14)$$

C.3. Configuraciones de conexión de un puente de medida

No todas las configuraciones ofrecen compensación al efecto térmico de “deformación aparente”. Por ejemplo, en el caso del medio puente en oposición, se logra una amplificación $\times 2$ de la salida respecto a la conexión en $\frac{1}{4}$ -puente, pero los cálculos revelan que no suprime el efecto mencionado, como se observa en la expresión C.17.

$$V_{out} = \left(\frac{R_0(1 + FG\varepsilon + \alpha\Delta T)}{R_0(1 + FG\varepsilon + \alpha\Delta T) + R_0} - \frac{R_0}{R_0 + R_0(1 + FG\varepsilon + \alpha\Delta T)} \right) V_{DC} \simeq \quad (C.15)$$

$$\varepsilon \ll 1, \alpha \ll 1 \underset{\simeq}{\left(\frac{R_0(FG\varepsilon + \alpha\Delta T)}{2R_0} \right)} V_{DC} \quad (C.16)$$

$$= \frac{(FG\varepsilon + \alpha\Delta T)}{2} V_{DC} \quad (C.17)$$

C.4. Cálculo de la dependencia de la resistencia de la galga respecto a la temperatura

$$R(\varepsilon, T) = R_0(1 + FG(T)\varepsilon) \quad (C.18)$$

$$dR(\varepsilon, T) = R_0 \frac{\partial R(\varepsilon, T)}{\partial \varepsilon} \Big|_{T=T_0} + R_0 \frac{\partial R(\varepsilon, T)}{\partial T} \Big|_{\varepsilon=\varepsilon_0} = \quad (C.19)$$

$$R_0 FG(T_0)(\varepsilon - \varepsilon_0) + R_0 \frac{\partial R(\varepsilon, T)}{\partial T} \Big|_{\varepsilon=\varepsilon_0} (T - T_0) = \quad (C.20)$$

$$\stackrel{\varepsilon_0=0}{=} R_0 FG(T_0)\varepsilon + R_0 \frac{\partial R(\varepsilon, T)}{\partial T} \Big|_{\varepsilon=0} \Delta T = \quad (C.21)$$

$$= R_0 FG(T_0)\varepsilon + R_0 \alpha \Delta T, \quad \alpha = \frac{\partial R(\varepsilon, T)}{\partial T} \Big|_{\varepsilon=0} \implies \quad (C.22)$$

$$dR(\varepsilon, T) = R(\varepsilon, T) - R(\varepsilon_0, T_0) \implies \quad (C.23)$$

$$R(\varepsilon, T) = R(\varepsilon_0, T_0) + R_0 FG(T_0)\varepsilon + R_0 \alpha \Delta T = R_0(1 + FG\varepsilon + \alpha\Delta T) \quad (C.24)$$

C.5. Cálculo del voltaje de salida del puente de medida (Puente de Wheatstone) cuando se utilizan galgas con valor nominal que difiere con las resistencias fijas del circuito

Nótese que en la última expresión el término $FG\varepsilon$ contiene las contribuciones al valor de resistencia de la galga que derivan de la aplicación de una fuerza de tracción/compresión y al efecto de un calentamiento/enfriamiento del sustrato.

C.5. Cálculo del voltaje de salida del puente de medida (Puente de Wheatstone) cuando se utilizan galgas con valor nominal que difiere con las resistencias fijas del circuito

A partir de una configuración de $\frac{1}{4}$ -puente como la que se muestra en la figura 5.3, se deduce la expresión del voltaje de salida cuando se utiliza una galga de $R_0 = 350 \Omega$ a la que se denotará como R_{0350} y resistencias fijas de 120Ω a las que se denotará como R_{120} .

$$V_{out} = \left(\frac{R_{0350}(1 + FG\varepsilon + \alpha\Delta T)}{R_{0350}(1 + FG\varepsilon + \alpha\Delta T) + R_{120}} - \frac{R_{120}}{2R_{120}} \right) V_{DC} \quad (C.25)$$

$$\varepsilon \ll 1, \alpha \ll 1 \underset{\simeq}{\approx} \left(\frac{R_{0350}(1 + FG\varepsilon + \alpha\Delta T)}{R_{0350} + R_{120}} - \frac{R_{120}}{2R_{120}} \right) V_{DC} \quad (C.26)$$

$$= \left(\frac{2R_{120}R_{0350}(1 + FG\varepsilon + \alpha\Delta T) - R_{120}(R_{0350} + R_{120})}{2R_{120}(R_{0350} + R_{120})} \right) V_{DC} \quad (C.27)$$

$$= \left(\frac{R_{120}(R_{0350} - R_{120}) + 2R_{120}R_{0350}(FG\varepsilon + \alpha\Delta T)}{2R_{120}(R_{0350} + R_{120})} \right) V_{DC} \quad (C.28)$$

$$\varepsilon \ll 1, \alpha \ll 1 \underset{\simeq}{\approx} \frac{(R_{0350} - R_{120})}{2(R_{0350} + R_{120})} V_{DC} \quad (C.29)$$

Como se deduce de los cálculos anteriores en la configuración especificada las variaciones de resistencia asociadas a deformaciones mecánicas se vuelven imperceptibles frente al voltaje generado en estado de reposo. Sin embargo cuando se utilizan configuraciones de $\frac{1}{2}$ -puente o puente completo el resultado cambia, como se muestra a continuación.

Para la configuración de $\frac{1}{2}$ -puente adyacente, como la que se ilustra en la figura 5.3 se tiene el siguiente resultado:

$$V_{out} = \left(\frac{R_{0350}(1 + FG\varepsilon + \alpha\Delta T)}{R_{0350}(1 + FG\varepsilon + \alpha\Delta T) + R_{0350}(1 - FG\varepsilon + \alpha\Delta T)} - \frac{R_{120}}{2R_{120}} \right) V_{DC} \quad (C.30)$$

$$\varepsilon \ll 1, \alpha \ll 1 \underset{\simeq}{\approx} \left(\frac{R_{0350}(1 + FG\varepsilon + \alpha\Delta T)}{2R_{0350}} - \frac{R_{120}}{2R_{120}} \right) V_{DC} \quad (C.31)$$

$$= \left(\frac{FG\varepsilon + \alpha\Delta T}{2} \right) V_{DC} \quad (C.32)$$

Por otro lado si se toma la configuración de $\frac{1}{2}$ -puente en oposición se deduce lo siguiente:

C.5. Cálculo del voltaje de salida del puente de medida (Puente de Wheatstone) cuando se utilizan galgas con valor nominal que difiere con las resistencias fijas del circuito

$$V_{out} = \left(\frac{R_{120}}{R_{0350}(1 + FG\varepsilon + \alpha\Delta T) + R_{120}} - \frac{R_{0350}(1 + FG\varepsilon + \alpha\Delta T)}{R_{0350}(1 + FG\varepsilon + \alpha\Delta T) + R_{120}} \right) V_{DC} \quad (C.33)$$

$$\varepsilon \ll 1, \alpha \ll 1 \underset{\approx}{\left(\frac{R_{120}}{R_{0350} + R_{120}} - \frac{R_{0350}(1 + FG\varepsilon + \alpha\Delta T)}{R_{0350} + R_{120}} \right) V_{DC}} \quad (C.34)$$

$$= \left(\frac{(R_{120} - R_{0350}) - R_{0350}(FG\varepsilon + \alpha\Delta T)}{R_{0350} + R_{120}} \right) V_{DC} \quad (C.35)$$

$$= \left(\frac{R_{120} - R_{0350}}{R_{120} + R_{0350}} \right) V_{DC} \quad (C.36)$$

Se puede verificar con facilidad que el caso correspondiente al puente completo es análogo al del $\frac{1}{2}$ -puente adyacente, mientras que las configuraciones de $\frac{1}{4}$ -puente y $\frac{1}{2}$ -puente en oposición arrojan el mismo resultado y es que no son aptas para utilizar con galgas de valor nominal diferente a 120 Ω .

Referencias

- [1] Florelva Rozo-García. Revisión de las tecnologías presentes en la industria 4.0. *Revista UIS Ingenierías*, 19(2):177–191, 2020.
- [2] Valentina V. Rankovska. Review of open-source microcontroller and programmable logic development boards. In *2021 XXX International Scientific Conference Electronics (ET)*, 2021.
- [3] Abel Uzoka, Emmanuel Cadet, and Pascal Ugochukwu Ojukwu. The role of telecommunications in enabling internet of things (iot) connectivity and applications. *Comprehensive Research and Reviews in Science and Technology*, 2(02):055–073, 2024.
- [4] Laura Daniela González Guerrero. Control de nuestros datos personales en la era del big data: el caso del rastreo web de terceros. *Estudios Socio-Jurídicos*, 21(1):209–244, 2019.
- [5] Vahid Reza Gharehbaghi, Ehsan Noroozinejad Farsangi, Mohammad Noori, Tony Y Yang, Shao-fan Li, Andy Nguyen, Christian Málaga-Chuquitaype, Paolo Gardoni, and Seyedali Mirjalili. A critical review on structural health monitoring: Definitions, methods, and perspectives. *Archives of computational methods in engineering*, 29(4):2209–2235, 2022.
- [6] Anders Rytter. Vibrational based inspection of civil engineering structures. pages 3–4, 1993.
- [7] La Diaria. Informe técnico indica “peligro real” de derrumbe del puente de la barra. *La Diaria*, oct 2022. Accedido el 9 de enero de 2025.
- [8] Infobae. Punta del este: rehabilitarán el puente de la barra y aseguran que las obras realizadas dan “garantía de por vida”. *Infobae*, dec 2023. Accedido el 9 de enero de 2025.
- [9] Revista Construcción. Puentes: construir para conectar, 2023. Accedido el 17 de agosto de 2025.
- [10] IMPO. Decreto n° 326/986: Reglamento de límites de peso para vehículos que circulan por rutas nacionales, 1986. Promulgación: 25 de junio de 1986; Publicación: 5 de agosto de 1986.
- [11] IMPO. Decreto n° 177/021: Autorización de circulación por carretera con hasta 48 toneladas de peso bruto total, 2021. Promulgación: 24 de mayo de 2021; Publicación: 22 de junio de 2021.
- [12] Marcelo Barreiro, Fernando Arizmendi, Nicolas Díaz, and Romina Trinchin. Análisis del clima y escenarios de cambio y variabilidad climática en uruguay. *Montevideo, jun*, 2021.
- [13] NU CEPAL. La economía del cambio climático en el uruguay: síntesis. 2010.
- [14] R Boydell. Esto es lo que le sucederá a los edificios a medida que acelere el calentamiento global. Retrieved from *ONU Habitat*: <https://onuhabitat.org.mx/index.php/esto-es-lo-que-le-sucedera-a-los-edificios-a-medida-que-se-acelere-el-calentamiento-global>, 2019.

- [15] Ronaldo A. Medeiros-Junior and Thiago A. Reichert. 3 - impact of climate change on the service life of concrete structures. In F. Pacheco-Torgal, Robert E. Melchers, Xianming Shi, and Andrés Sáez, editors, *Eco-Efficient Repair and Rehabilitation of Concrete Infrastructures (Second Edition)*, Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, pages 47–84. Woodhead Publishing, second edition edition, 2024.
- [16] The ultimate guide to dial gauges - analog & digital. <https://www.lfc.com.sg/blog/detail/dial-gauge>, n.d. Accessed: 2025-10-07.
- [17] Charles R Farrar and Keith Worden. An introduction to structural health monitoring. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 365(1851):303–315, 2007.
- [18] Angel Alcaide, Eduardo Barrera, Mariano Ruiz, and Gerardo Aranguren. Damage detection on aerospace structures using pamela shm system. In *6th International Symposium on NDT in Aerospace, Madrid*, 2014.
- [19] Swagato Das and Purnachandra Saha. A review of some advanced sensors used for health diagnosis of civil engineering structures. *Measurement*, 129:68–90, 2018.
- [20] Fucai Li, Haikuo Peng, and Guang Meng. Quantitative damage image construction in plate structures using a circular pzt array and lamb waves. *Sensors and Actuators A: Physical*, 214:66–73, 2014.
- [21] Archana Nair and CS Cai. Acoustic emission monitoring of bridges: Review and case studies. *Engineering structures*, 32(6):1704–1714, 2010.
- [22] Kanji Ono. Application of acoustic emission for structure diagnosis. *Diagnostyka*, (2 (58):3–18, 2011.
- [23] V Arjun, B Sasi, B Purna Chandra Rao, CK Mukhopadhyay, and T Jayakumar. Optimisation of pulsed eddy current probe for detection of sub-surface defects in stainless steel plates. *Sensors and Actuators A: Physical*, 226:69–75, 2015.
- [24] Blanco Díaz Elena Cervero Ruiz Miguel. *Mecánica de Estructuras Libro I: Resistencia de Materiales*. Ediciones UPC, Barcelona, 2 edition, 2002.
- [25] Karl Hoffmann. An introduction to stress analysis and transducer design using strain gauges, 2012.
- [26] Venu Gopal Madhav Annamdas and Chee Kiong Soh. Application of electromechanical impedance technique for engineering structures: review and future issues. *Journal of Intelligent material systems and structures*, 21(1):41–59, 2010.
- [27] Grupo COFITEL. Fibra Óptica: Diferentes tipos y aplicaciones. <https://www.c3comunicaciones.es/fibra-optica-diferentes-tipos-y-aplicaciones/>, September 2019. Publicado el 20 de septiembre de 2019; consultado el 17 de agosto de 2025.
- [28] Joan R Casas and Paulo JS Cruz. Fiber optic sensors for bridge monitoring. *Journal of bridge engineering*, 8(6):362–373, 2003.
- [29] Honglei Guo, Gaozhi Xiao, Nezih Mrad, and Jianping Yao. Fiber optic sensors for structural health monitoring of air platforms. *Sensors*, 11(4):3687–3705, 2011.

- [30] HBM (Hottinger Brüel & Kjær). What is a fiber bragg grating?, 2025. Accessed: 2025-01-17.
- [31] SCAIME. Fibre bragg grating sensor technology. <https://scaime.com/fibre-bragg-grating-technology>, 2025. Consultado el 17 de agosto de 2025.
- [32] M. Tateda and T. Horiguchi. Advances in optical time domain reflectometry. *Journal of Lightwave Technology*, 7(8):1217–1224, 1989.
- [33] Jianjun Ma and Anand Asundi. Structural health monitoring using a fiber optic polarimetric sensor and a fiber optic curvature sensor-static and dynamic test. *Smart materials and structures*, 10(2):181, 2001.
- [34] Muneesh Maheshwari, Swee Chuan Tjin, and A Asundi. Efficient design of fiber optic polarimetric sensors for crack location and sizing. *Optics & Laser Technology*, 68:182–190, 2015.
- [35] Amalia Miliou. In-fiber interferometric-based sensors: Overview and recent advances. In *Photonics*, volume 8, page 265. MDPI, 2021.
- [36] Amalia Miliou. In-fiber interferometric-based sensors: Overview and recent advances. In *Photonics*, volume 8, page 265. MDPI, 2021.
- [37] Zhanxiong Ma, Jaemook Choi, and Hoon Sohn. Structural displacement sensing techniques for civil infrastructure: A review. *Journal of Infrastructure Intelligence and Resilience*, 2(3):100041, 2023.
- [38] Qingqing Zhang, Jian Zhang, Wenhui Duan, and Zhishen Wu. Deflection distribution estimation of tied-arch bridges using long-gauge strain measurements. *Structural Control and Health Monitoring*, 25(3):e2119, 2018.
- [39] Yang Liu, Yang Deng, and CS Cai. Deflection monitoring and assessment for a suspension bridge using a connected pipe system: a case study in china. *Structural Control and Health Monitoring*, 22(12):1408–1425, 2015.
- [40] Junyong Zhou, Zhuo Sun, Bin Wei, Liwen Zhang, and Pan Zeng. Deflection-based multilevel structural condition assessment of long-span prestressed concrete girder bridges using a connected pipe system. *Measurement*, 169:108352, 2021.
- [41] Chunbao Xiong, Meng Wang, and Wen Chen. Data analysis and dynamic characteristic investigation of large-scale civil structures monitored by rtk-gnss based on a hybrid filtering algorithm. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 12(4):857–874, 2022.
- [42] Bernhard Hofmann-Wellenhof, Herbert Lichtenegger, and James Collins. *Global positioning system: theory and practice*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [43] Shanshan Yu and Jian Zhang. Fast bridge deflection monitoring through an improved feature tracing algorithm. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 35(3):292–302, 2020.
- [44] Jianguo Zhou, Henglin Xiao, Weiwei Jiang, Wenfeng Bai, and Guanlan Liu. Automatic subway tunnel displacement monitoring using robotic total station. *Measurement*, 151:107251, 2020.
- [45] Shihua Cao and Jianqing Li. A survey on ambient energy sources and harvesting methods for structural health monitoring applications. *Advances in Mechanical Engineering*, 9(4):1687814017696210, 2017.

- [46] Sajad Javadinasab Hormozabad, Mariantonieta Gutierrez Soto, and Hojjat Adeli. Integrating structural control, health monitoring, and energy harvesting for smart cities. *Expert Systems*, 38(8):e12845, 2021.
- [47] Omar S Sonbul and Muhammad Rashid. Towards the structural health monitoring of bridges using wireless sensor networks: A systematic study. *Sensors*, 23(20):8468, 2023.
- [48] Hadi Salehi, Rigoberto Burgueño, Shantanu Chakrabartty, Nizar Lajnef, and Amir H Alavi. A comprehensive review of self-powered sensors in civil infrastructure: State-of-the-art and future research trends. *Engineering Structures*, 234:111963, 2021.
- [49] Francesco Lamonaca, Paolo F Sciammarella, Carmelo Scuro, Domenico Luca Carnì, and Renato S Olivito. Synchronization of iot layers for structural health monitoring. In *2018 Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT*, pages 89–94. IEEE, 2018.
- [50] Xia Zhao, Shenfang Yuan, Zhenhua Yu, Weisong Ye, and Jun Cao. Designing strategy for multi-agent system based large structural health monitoring. *Expert Systems with Applications*, 34(2):1154–1168, 2008.
- [51] Andres F Quintero-Parra, Jhonatan Camacho-Navarro, Marco Flórez, and JL Vázquez-González. Evaluation of multi-agent architecture for structural damage detection and location. 2017.
- [52] Arduino. Arduino - home. <https://www.arduino.cc/>, 2025. Accedido el 9 de octubre de 2025.
- [53] TE Connectivity. Te connectivity — home. <https://www.te.com/es/home.html>, 2025. Accedido el 9 de octubre de 2025.
- [54] Kyowa Electronic Instruments. Kyowa electronic instruments — home. <https://www.kyowa-ei.com/en>, 2025. Accedido el 9 de octubre de 2025.
- [55] SparkFun Electronics. Hx711 datasheet (english). https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/ForceFlex/hx711_english.pdf, —. Accedido el 9 de octubre de 2025.
- [56] Dave Evans. The internet of things. *How the Next Evolution of the Internet is Changing Everything, Whitepaper, Cisco Internet Business Solutions Group (IBSG)*, 1:1–12, 2011.
- [57] Abhaykumar Kumbhar. Overview of ism bands and software-defined radio experimentation. *Wireless Personal Communications*, 97(3):3743–3756, 2017.
- [58] Mohammad Istiak Hossain and Jan I Markendahl. Comparison of lpwan technologies: Cost structure and scalability. *Wireless Personal Communications*, 121(1):887–903, 2021.
- [59] J.D. Day and H. Zimmermann. The osi reference model. *Proceedings of the IEEE*, 71(12):1334–1340, 1983.
- [60] Ivo Bizon Franco De Almeida, Marwa Chafii, Ahmad Nimr, and Gerhard Fettweis. Alternative chirp spread spectrum techniques for lpwans. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 5(4):1846–1855, 2021.
- [61] Brecht Reynders and Sofie Pollin. Chirp spread spectrum as a modulation technique for long range communication. In *2016 Symposium on Communications and Vehicular Technologies (SCVT)*, pages 1–5. IEEE, 2016.

- [62] S.L. Sathiya Narayanan, B.C. Dhanush Devappa, Kalyani Pawar, Shreyas Jain, and Appala Venkata Ramana Murthy. Implementation of forward error correction for improved performance of free space optical communication channel in adverse atmospheric conditions. *Results in Optics*, 16:100689, 2024.
- [63] LoRa Alliance. *LoRaWAN 1.0.2 rvB Regional Parameters*, 2017. Accessed: 2025-01-30.
- [64] L. Alkama and L. Bouallouche-Medjkoune. Ieee 802.15.4 mac protocols designed for wireless sensor networks: a comparative study. *Wireless Networks*, 2025.
- [65] The Things Network. <https://www.thethingsindustries.com/docs/reference/ttn/>.
- [66] The Things Industries. Adaptive data rate (adr) in lorawan. <https://www.thethingsindustries.com/docs/concepts/features/lorawan/adr/>, 2025. Accedido el 4 de agosto de 2025.
- [67] LoRa Alliance. LoRaWAN 1.0.4 Specification. Technical report, LoRa Alliance, October 2020. Available at https://lora-alliance.org/resource_hub/lorawan-specification-v1-0-4/.
- [68] Albert Pötsch and Florian Hammer. Towards end-to-end latency of lorawan: Experimental analysis and iiot applicability. In *Proceedings of the IEEE 15th International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS)*, pages 1–4, 2019.
- [69] Adrian I. Petrariu, Alexandru Lavric, and Eugen Coca. Lorawan gateway: Design, implementation and testing in real environment. In *2019 IEEE 25th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*, pages 49–53, 2019.
- [70] Rida El Chall, Samer Lahoud, and Melhem El Helou. Lorawan network: Radio propagation models and performance evaluation in various environments in lebanon. *IEEE Internet of Things Journal*, 6(2):2366–2378, 2019.
- [71] Texas Instruments. Ratiometric measurement in the context of lvdt-sensor signal conditioning. Technical report, Texas Instruments, July 2016. Application note.
- [72] TE CONNECTIVITY. Lvdv selection, handling and installation guidelines, rev. 5. 2016.
- [73] TE CONNECTIVITY. Hr series general purpose lvdt (datasheet), rev. 7. 2017.
- [74] Mario Eduardo Carbone de la Rosa. Desarrollo de un método para la detección temprana de fallas en baterías de ion de litio. 2023.
- [75] Texas Instruments. Design of op amp sine wave oscillators. <https://www.ti.com/lit/an/slyt164/slyt164.pdf>, 2005. Application Report SLOA060.
- [76] Thorlabs, Inc. Thorlabs — photonics products & solutions. <https://www.thorlabs.com/>, 2025. Consultado el 17 de octubre de 2025.
- [77] HBM. Ly galgas extensométricas lineales con 1 rejilla de medición. https://www.hbm.com/es/4561/ly-galgas-extensometricas-lineales-con-1-rejilla-de-medicion/?product_type_no=LY%20Galgas%20extensom%C3%A9tricas%20lineales%20con%201%20rejilla%20de%20medici%C3%B3n. Accedido el 20 de octubre de 2025.

- [78] Hoang-Phuong Phan, Dzung Viet Dao, Koichi Nakamura, Sima Dimitrijevic, and Nam-Trung Nguyen. The piezoresistive effect of sic for mems sensors at high temperatures: A review. *Journal of Microelectromechanical systems*, 24(6):1663–1677, 2015.
- [79] Luis Alejandro Alcaraz-Caracheo, Luis G. Ramírez-Ruiz, Ramón Rodríguez-Castro, Roberto E. Arriaga-Medina, Alejandro I. Barranco-Gutiérrez, and José G. Zavala-Villalpando. Análisis experimental del coeficiente de Poisson en metamateriales fabricados con hojas plegadas de aluminio sometidos a compresión uniaxial. *Revista de Ingeniería Dyna*, 99(6):594–598, November 2024.
- [80] Ramón Pallàs Areny. *Sensores y acondicionadores de señal*. Marcombo, España, 4 edition, 2005.
- [81] Ltd. Susumu Co. Susumu. <https://www.susumu.co.jp/>, 2025. Accedido el 20 de octubre de 2025.
- [82] Arduino. Hx711 arduino library, 2025. Accessed: 2025-08-13.
- [83] TecQuipment Ltd. Strain gauge trainer. <https://www.tecquipment.com/es/strain-gauge-trainer>, n.d. Accedido el 20 de octubre de 2025.
- [84] Micro-Measurements. P3strain indicator and recorder. <https://www.micro-measurements.com/pca/detail/p3-strain-indicator-and-recorder>, n.d. Accedido el 20 de octubre de 2025.
- [85] Micro-Measurements. M-bond 610 adhesive kit, 2024. Accessed: 2025-07-29.

Índice de tablas

1.1. Tipos de galgas extensiométricas	4
1.2. Tipos de sensores de fibra óptica	7
1.3. Sensores de desplazamiento con contacto	8
1.4. Sensores de desplazamiento con contacto, continuación	9
1.5. Sensores de desplazamiento sin contacto	10
1.6. Sensores de desplazamiento sin contacto, continuación	11
3.1. LPWAN - características de cada tecnología. Tabla extraída de [58]	21
3.2. LPWAN - área de cobertura de cada tecnología. Tabla extraída de [58]	22
3.3. Clases de nodos	27
3.4. Ensayo de alcance de transmisión de nodos	31
4.1. Circuito de Excitación (circuito primario)	38
4.2. Circuito de Demodulación (circuito secundario)	40
5.1. Dimensiones de una galga uniaxial LY1, del fabricante HBK	51
5.2. Voltajes de salida para las distintas configuraciones de un puente de Wheatstone	54
6.1. Datos comparativos sobre gateways LoRaWAN	65
6.2. Circuito de acondicionamiento para nodo de desplazamientos	66
6.3. Circuito de acondicionamiento para nodo de deformaciones	66
6.4. Comparación de costos de circuitos comerciales vs. prototipo desarrollado para la medición de desplazamientos	67
6.5. Comparación de costos de circuitos comerciales vs. prototipo desarrollado para la medición de deformaciones mecánicas	67
A.1. Puertos de trama (FPort) y su descripción en el protocolo LoRaWAN	77
C.1. Magnitudes requeridas para el cálculo de la deflexión en una barra en voladizo	79

Índice de figuras

1.1. Sistema de monitoreo estructural (SME)	1
1.2. Curva de stress mecánico vs deformación de un material	3
1.3. Tipos de fibra óptica: Unimodal (arriba), Multimodal (abajo) [27]	5
1.4. Fiber Bragg Grating principio de funcionamiento [31]	6
1.5. (A) Sensores inalámbricos convencionales. (B) Sensores que adquieren energía de la señal de control. (C) Sensores que adquieren energía de la variación de la magnitud que deben medir.	12
1.6. Sistema de monitoreo estructural convencional.	13
2.1. Diagrama de bloques - sistema	14
2.2. Diagrama de bloques - Nodo de Red.	15
2.3. Antena omnidireccional, flexible Molex.	15
2.4. Arduino MKRWAN 1310.	16
2.5. Diagrama de flujo correspondiente al firmware ejecutado por Arduino MKRWAN 1310.	17
2.6. Interfaz de usuario	19
3.1. Banda de frecuencia AU915. En rojo y verde se ilustran los canales de <i>upstream</i> . En celeste se observan los canales de <i>downstream</i>	24
3.2. Arquitectura Red LoRa	25
3.3. Activación OTAA (On The Air Activation) [65]	28
3.4. Activación ABP (Activation By Personalization) [65]	29
3.5. Prueba de rendimiento de la red LoRaWAN desplegada	31
4.1. LVDT HR1000	32
4.2. Circuito esquemático - LVDT	33
4.3. LVDT HR1000, diagrama constructivo. Los círculos celestes y verdes denotan los bobinados secundarios mientras que los amarillos ilustran el devanado primario.	33
4.4. Diagrama de bloques correspondiente al módulo LVDT	36
4.5. Circuito de Alimentación	37
4.6. Circuito esquemático del oscilador	38
4.7. Circuito rectificador de precisión	39
4.8. Circuito de demodulación para LVDT	40
4.9. Formas de onda correspondientes a las distintas etapas del demodulador, con el núcleo del LVDT situado en el centro del cilindro. (a): Voltaje en el secundario “a”, (b): Voltaje en el secundario “a” rectificado, (c): Señal de salida del demodulador	41
4.10. Ensayo de respuesta estática para LVDT	42
4.11. Relevamiento experimental de la respuesta estática del LVDT	43

4.12. Se toma una serie de 1024 medidas (valores de D). La curva azul denota la dispersión de los datos según el valor de P. La curva roja denota el aumento en el tiempo de ejecución de una medida conforme aumenta P	44
4.13. Histograma en la posición 25.4 mm, para un conjunto de 2000 medidas	45
4.14. Curva de error entre desplazamientos medidos con el LVDT y valores determinados por el actuador de pasos NRT150. Las rectas horizontales demarcan los valores de error máximo de linealidad reportados por el fabricante del LVDT en cada tramo del rango. Dichos tramos se encuentran delimitados por las rectas verticales.	46
4.15. Setup de ensayo de carga para LVDT implementado y comparador analógico	47
4.16. Ensayo en barra de acero en voladizo, con LVDT-IIIE y un comparador analógico NEOteck	48
4.17. Contrastación de medidas tomadas con el instrumento LVDT-IIIE y un comparador analógico NEOteck para una carga variable entre 0 y 4.91 N (Newton). En la gráfica (b) se muestra la diferencia entre las medidas tomadas con ambos instrumentos	49
5.1. Galga de tipo LY1 (lineal, uniaxial, tipo de conexión 1 —terminales de soldadura debajo de los hilos metálicos—, del fabricante HBK) [77]	50
5.2. Circuitos para medir deformaciones - (a): divisor de tensión, (b): puente de Wheatstone en configuración $\frac{1}{4}$ -puente (una sola galga activa).	53
5.3. Configuraciones para medición de deformación usando el puente de Wheatstone.	55
5.4. Nodo sensor de deformaciones.	56
5.5. Estado de interruptores para las distintas configuraciones del puente de medida.	57
5.6. Conversor AD de 24 bits, HX711.	58
5.7. Instrumentación de barra en voladizo	59
5.8. Montaje de galgas en barra de acero	60
5.9. Análisis estadístico de las medidas tomadas con el dispositivo desarrollado en condiciones de reposo. (a): valor medio, desviación estándar y rango de medidas realizadas para la configuración $\frac{1}{4}$ -Puente. (b): valor medio, desviación estándar y rango de medidas realizadas para la configuración $\frac{1}{2}$ -Puente. (c): valor medio, desviación estándar y rango de medidas realizadas para la configuración Puente Completo.	61
5.10. Deformación medida en la barra de acero cuando es sometida a un $\Delta T \simeq 20$ °C. La deformación se mide con un circuito en configuración de $\frac{1}{4}$ -puente, lo cual implica que hay una sola galga conectada y se completa el puente con resistencias auxiliares (incluidas en el módulo desarrollado).	61
5.11. Fluctuación de la deformación en función de la temperatura cuando el sistema de medida se somete a un $\Delta T \simeq 10$ °C y no se aplica carga sobre el mismo (sin esfuerzo mecánico).	62
5.12. Curva de respuesta del instrumento en configuración de puente completo ante esfuerzos controlados.	63
5.13. Histéresis de la curva de respuesta del instrumento para la configuración Puente Completo ante una fuerza de flexión.	64
A.1. Diagrama de flujo de firmware asociado a la conexión de un nodo a la red	73
A.2. Tramas LoRaWAN, figura extraída de [65]	77
C.1. Respuesta estática de un puente completo ante una carga variable aplicada sobre el punto P	80
C.2. Histéresis en la respuesta de los distintos dispositivos y en el modelo teórico	81

Esta es la última página.
Compilado el jueves 26 febrero, 2026.
<http://iie.fing.edu.uy/>