



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE UN INSTRUMENTO DE MEDICIÓN QUE
DETERMINE LA POSICIÓN DEL HILO DE
CONTACTO EN SISTEMAS FERROVIARIOS**

INFORME DE ACTIVIDADES PROFESIONALES

Que para obtener el título de
Ingeniera Eléctrica Electrónica

P R E S E N T A

Cortés Sánchez Indira Citlalli

ASESORA DE INFORME

M.I. Mayverena Jurado Pineda



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017

OBJETIVO

Diseñar y desarrollar un instrumento de medición electrónico aplicando la teoría de microcontroladores de hardware libre con mando a distancia.

Se prevé que la herramienta en cuestión sea utilizada en sistemas ferroviarios con infraestructura de catenaria.

Su principal propósito radica en comprobar la geometría de los hilos aéreos de contacto a lo largo de la vía para proporcionar condiciones óptimas de operación en los trenes.

Así también se busca mejorar la precisión de las lecturas obtenidas, facilitar su almacenamiento y su visualización.

La geometría de la catenaria concibe una trayectoria en serpenteo a lo largo de un plano de dos dimensiones (x,z) . Donde "x" corresponde a la medición de descentramiento y "z" a la medición de altura de los hilos de contacto.

Además de estos parámetros fundamentales, dentro de los alcances y criterios del diseño se encuentra la obtención de la distancia del eje de vía al poste, mejor conocida como implantación, y la localización satelital de los sitios donde se realiza la comprobación de las condiciones físicas de la catenaria.

Finalmente, la planeación del proyecto deberá considerar tres rubros fundamentales: el sistema electrónico, la interfaz de usuario con comunicación inalámbrica y la manufactura del producto, cumpliendo de esta forma con las características mínimas que hoy en día un cliente busca obtener de un dispositivo electrónico: control remoto, manejo intuitivo, versatilidad y sustentabilidad.

El conjunto de estos requerimientos, busca generar un producto innovador y competitivo respecto a las características de otros instrumentos de medición existentes en el mercado.

MARCO TEÓRICO

Un sistema ferroviario tiene como objetivo la construcción, operación y explotación de un tren rápido para transporte de personas o mercancías; está constituido esencialmente por una vía férrea, material rodante y un suministro de energía tal como se muestra en la *Figura 1*.

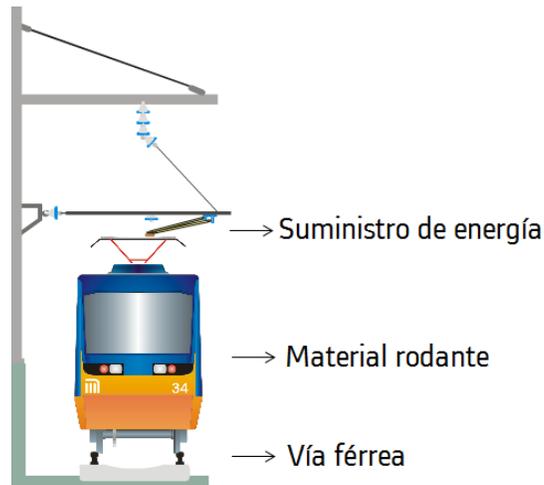


Figura 1. Elementos generales de un sistema ferroviario

La infraestructura de interés se basa en un sistema aéreo de alimentación denominado catenaria, el cual tiene como objetivo transportar la energía eléctrica desde los puestos de rectificación hasta los pantógrafos de las motrices de los trenes por medio de uno o dos hilos de contacto (*Figura 2*).

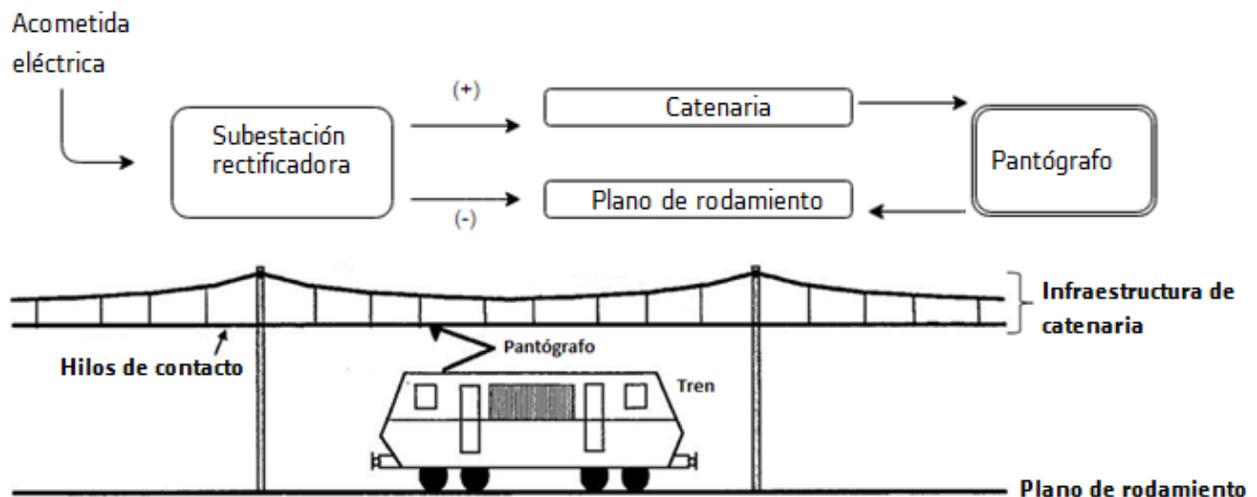


Figura 2. Sistema aéreo de alimentación por catenaria

El pantógrafo se abastece de la energía eléctrica proporcionada por la catenaria a través del frotamiento longitudinal de la pletina bajo el hilo de contacto, como se indica en la *Figura 3*. Este movimiento provoca un desgaste en los materiales y por consiguiente un desajuste en la geometría de la catenaria, por esta razón es necesario verificar periódicamente el estado de la instalación.

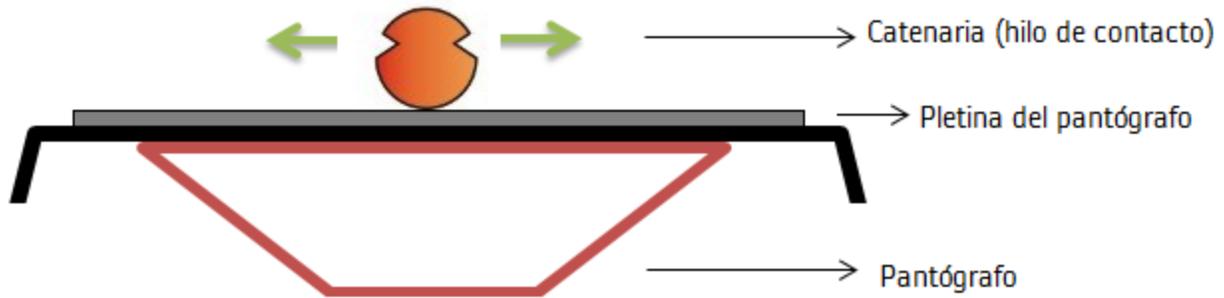


Figura 3. Frotamiento longitudinal entre el pantógrafo y la catenaria

A fin de comprobar que la catenaria se encuentra instalada en condiciones óptimas para interactuar con el pantógrafo, se ha diseñado un instrumento de medición capaz de obtener la posición de los cables que energizan al vehículo durante todo el trayecto.

ÍNDICE

- I. Antecedentes
 - a) Transporte ferroviario
 - b) Principio de funcionamiento del sistema de electrificación
 - c) Definición de catenaria
 - d) Ecuación de la curva catenaria
 - e) Tipos de catenarias
 - f) Elementos de la catenaria flexible
 - g) Tipos de catenaria flexible
 - h) Altura y descentramiento del hilo de contacto

- II. Definición del problema

- III. Análisis y metodología empleada
 - a) Investigación previa sobre los diferentes instrumentos de medición existentes en el mercado para la medición de altura y descentramiento del hilo de contacto
 - b) Análisis de los requerimientos mínimos del diseño en cuestión, basados en los parámetros de los instrumentos existentes en el mercado.
 - c) Descripción de los componentes seleccionados
 - Dispositivos para medición de distancias
 - Dispositivos para control de movimiento mecánico
 - Comunicación inalámbrica

IV. Participación profesional

- a) Descripción del prototipo diseñado para medición de altura y descentramiento del hilo de contacto
- b) Implementación del prototipo
 - Diagrama de conexión
 - Algoritmo de la plataforma de control
 - Algoritmo de la Interfaz de usuario
 - Proceso de construcción

V. Resultados obtenidos

- a) Proceso de calibración
- b) Estudio de repetibilidad y reproducibilidad
- c) Cotización de materiales

VI. Conclusiones

VII. Bibliografía

I. Antecedentes

a) Transporte ferroviario

El transporte ferroviario es un sistema de transporte de personas o mercancías guiado sobre una vía férrea.

Se entiende por vía férrea a la parte de la infraestructura ferroviaria que consta de carriles apoyados sobre durmientes, los cuales se disponen dentro de una capa de balasto como se observa en la *Figura 4*. Los durmientes, también conocidos como traviesas, son elementos transversales al eje de vía que permiten mantener los carriles unidos a una distancia fija. El balasto transmite y distribuye el peso del material rodante al suelo¹.

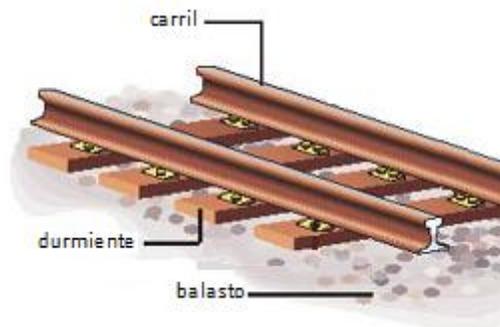


Figura 4. Vía férrea

Se le conoce como material rodante a todos los tipos de vehículos dotados de ruedas capaces de circular sobre una vía férrea. El esquema de la *Figura 5* muestra la clasificación de los mismos de acuerdo a la tracción que los acciona.

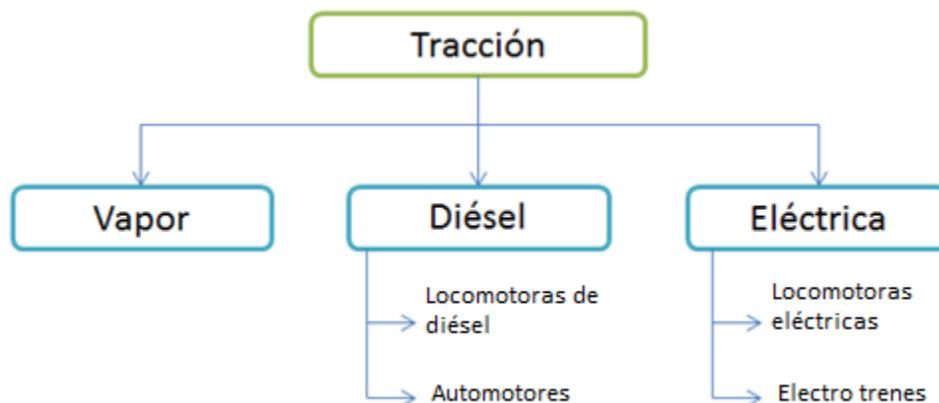


Figura 5. Clasificación de material rodante

¹ F. Kiessling; R.Puschmann; A. Schmieder. Contact Lines for Electric Railways, p.109.

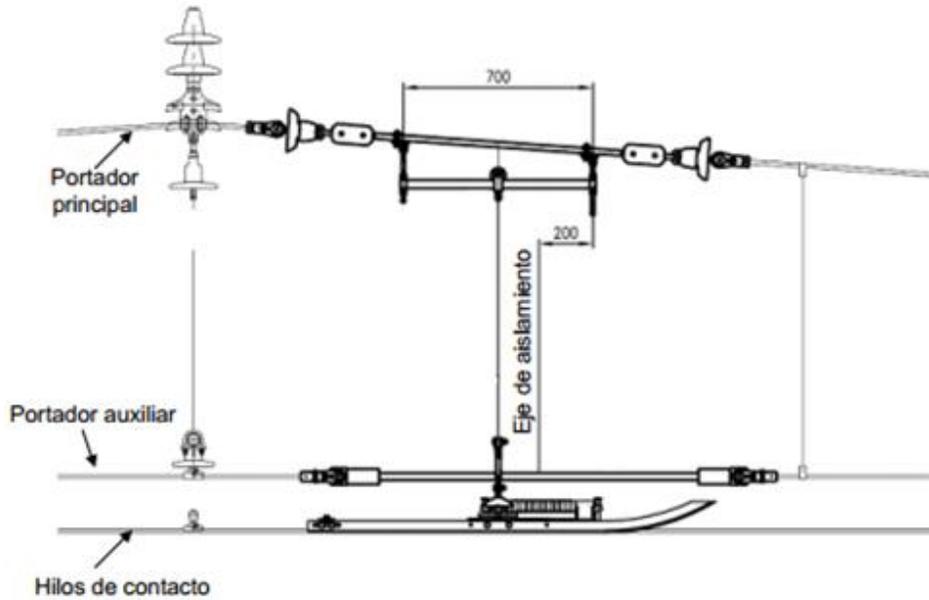


Figura 7. Sistema de electrificación por catenaria

b) Principio de funcionamiento del sistema de electrificación.

Los elementos principales del sistema de electrificación, como se muestra en la Figura 8, son:

- Generadores y líneas de transporte.
- Subestación de tracción.
- Circuito ferroviario.

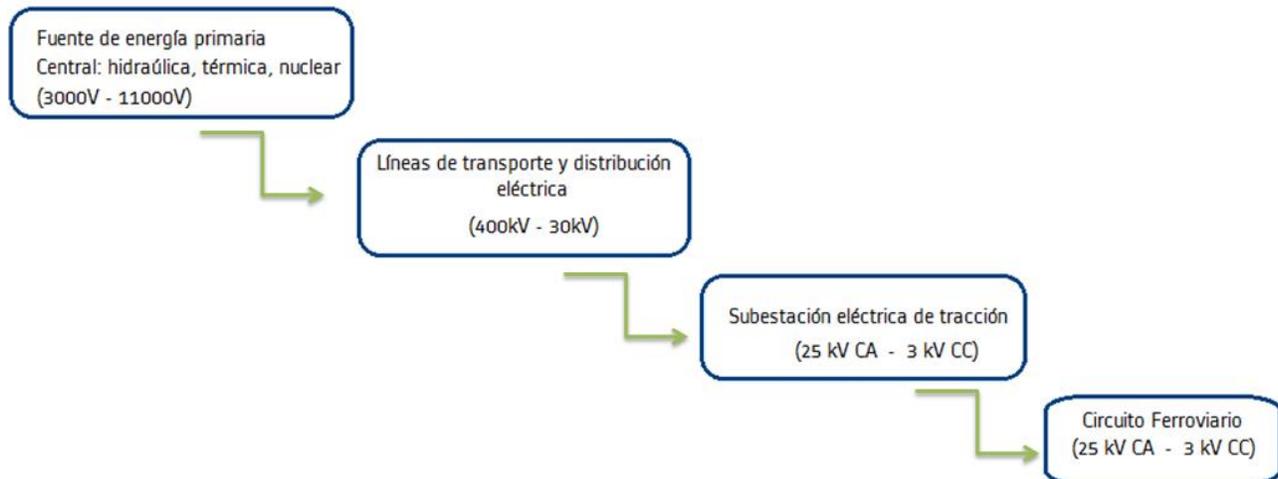
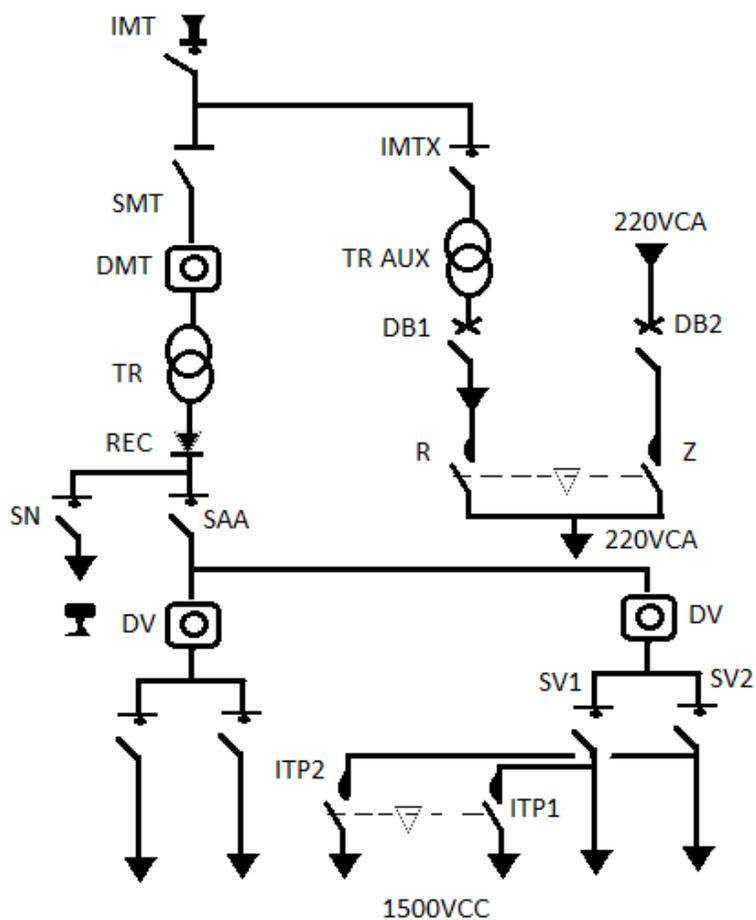


Figura 8. Sistema de electrificación

Las fuentes de energía primaria proporcionan una tensión en sistema trifásico a una frecuencia industrial de 60 Hz, esta energía es distribuida a las subestaciones de rectificación, donde la

corriente alterna se convierte en corriente continua tal como se muestra en la *Figura 9*, para finalmente alimentar las líneas aéreas de contacto del ferrocarril.



IMT: Interruptor de media tensión (23[kV])
 IMTX: Interruptor de media tensión auxiliar
 SMT: Seccionador de media tensión
 DMT: Disyuntor de media tensión
 SAA: Seccionador de aislamiento automático
 SN: Seccionador negativo
 SV1: Seccionador de vía 1
 DB1: Disyuntor de bus 1 (Tablero R)

DB2: Disyuntor de bus 1 (Tablero Z)
 TR: Transformador
 (4000[kW] @ 23[kV]-> 1182[V])
 REC: Rectificador (1500[V])
 DV: Disyuntor de vía
 ITP1: Interruptor de puenteo 1
 ITP2: Interruptor de puenteo 2

Figura 9. Subestación de rectificación

La *Tabla 1* muestra de manera general la relación entre las diferentes interfaces que constituyen al sistema ferroviario

Interfaz	Requerimientos
Obra civil	Infraestructura de vía.
Vía férrea	Trazo y perfil de la línea. Implantación de los aparatos de vía.
Material Rodante	Galibo dinámico envolvente (Espacio o área mínima necesaria para el libre paso del tren).
Sistema eléctrico	Diagrama de tracción en línea. Ubicación de subestaciones de rectificación. Conexión, alimentación y control de la alimentación eléctrica.
Señalización	Integración de los equipos de señalización a lo largo de la línea.

Tabla 1. Interfaces del sistema ferroviario

c) Definición de catenaria.

Catenaria es la curva que describe una cadena suspendida por sus extremos y que se encuentra sometida a un campo gravitatorio uniforme. La palabra deriva del latín *catenarius*, propio de la cadena.



Figura 10. Forma geométrica de una cadena suspendida en dos puntos

Para los sistemas de transporte eléctricos, la catenaria es el sistema utilizado para conducir la energía eléctrica desde las subestaciones de rectificación hasta el material rodante. El origen de este sistema surge como una solución a la infraestructura del riel conductor, el cual resulta peligroso por tener al alcance del usuario las terminales positiva y negativa del circuito.

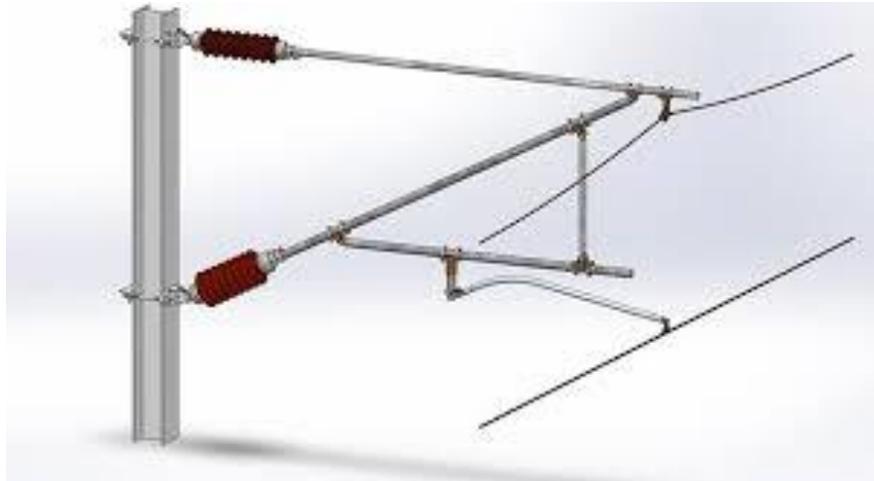


Figura 11. Línea aérea de contacto o catenaria

d) Ecuación de la curva catenaria

Los primeros matemáticos que abordaron el problema consideraron que la curva en cuestión, era una parábola. Sin embargo el matemático, astrónomo y físico holandés Christiaan Huygens demostró que no lo era.

La ecuación (1) fue obtenida por Leibniz, Huygens y Johann Bernoulli en 1691, la gráfica con distintos valores de “a” se muestra en la Figura 12.

$$f(x) = \frac{a}{2} \cosh\left(\frac{x}{a}\right) \quad \dots (1)$$

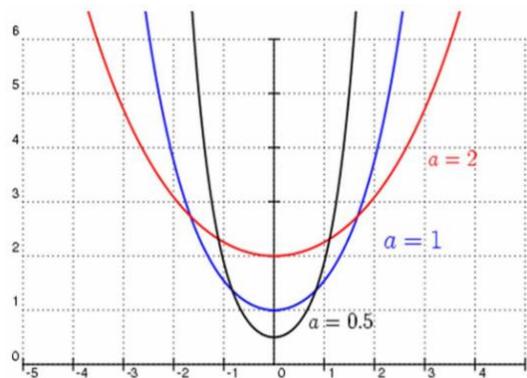


Figura 12. Curva catenaria

Donde “a” es la distancia del punto mínimo de la catenaria al eje horizontal de referencia.

Por otra parte, la ecuación de la parábola en su forma ordinaria es $x^2 = -4py$ y su gráfica se muestra en la Figura 13.

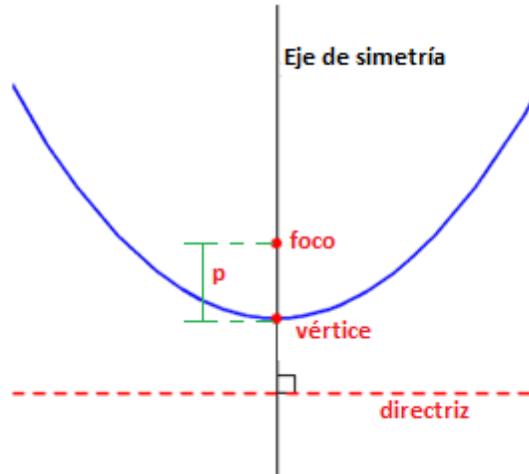


Figura 13. La parábola y sus elementos

Donde “ p ” es la distancia del vértice al foco

Si obtenemos los tres primeros términos de la serie de Taylor para el coseno hiperbólico llegamos a la expresión:

$$\cosh(x) = 1 + \frac{x^2}{2} + 0^4(x)$$

donde la ecuación,

$$y = 1 + \frac{x^2}{2}$$

hace referencia a una parábola y el término de cuarto orden que se obtiene del desarrollo de la serie de Taylor es lo único que hace diferente a la parábola de la catenaria.

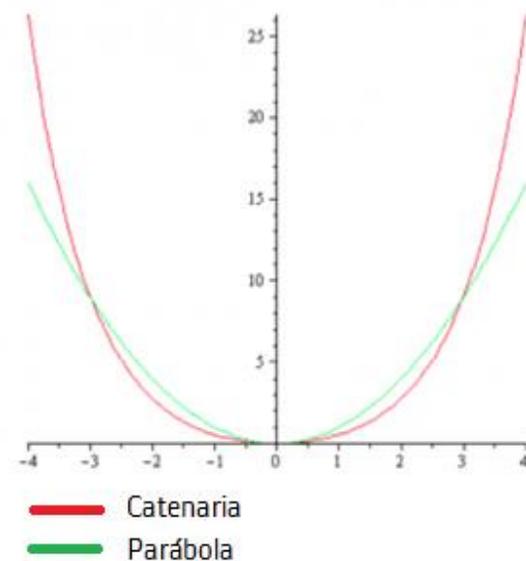


Figura 14. Similitud entre la catenaria y la parábola

e) Tipos de catenarias

La catenaria en cuestión de locomotoras de tracción se puede clasificar de manera general en catenaria rígida y catenaria flexible.

- Catenaria rígida

El sistema de catenaria rígida transmite la alimentación al material rodante por medio de un perfil de aluminio que soporta el hilo de contacto energizado, permitiendo así la captación de corriente por medio de un pantógrafo.

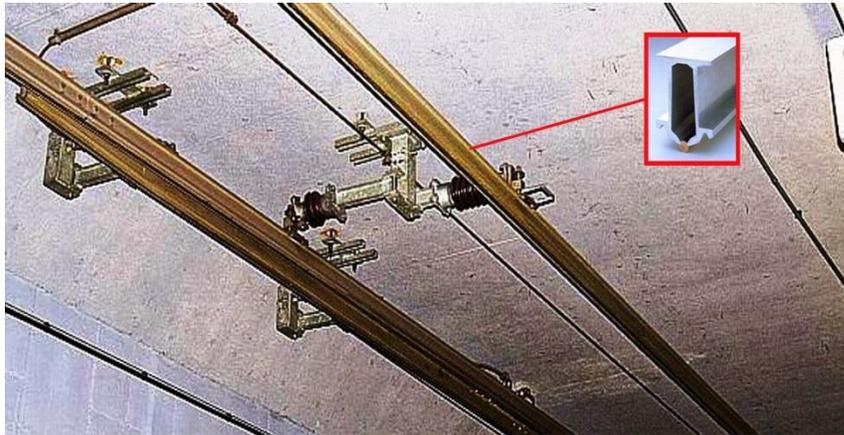


Figura 15. Catenaria rígida

El pantógrafo es un mecanismo articulado que sujeta una pletina presionándola contra el hilo de contacto. Su función principal es transmitir la energía eléctrica que proporciona la fuerza de tracción a los trenes ferroviarios. Se sitúa en el techo de la unidad tractora y es regulable en altura de forma automática.

Su principio de operación consiste en el deslizamiento del hilo de contacto sobre la pletina. Para evitar que la pletina se desgaste en un solo punto, la trayectoria del hilo de contacto se dispone en zigzag, de modo que va barriendo la mayor parte de la pletina provocando un desgaste uniforme en toda su superficie.

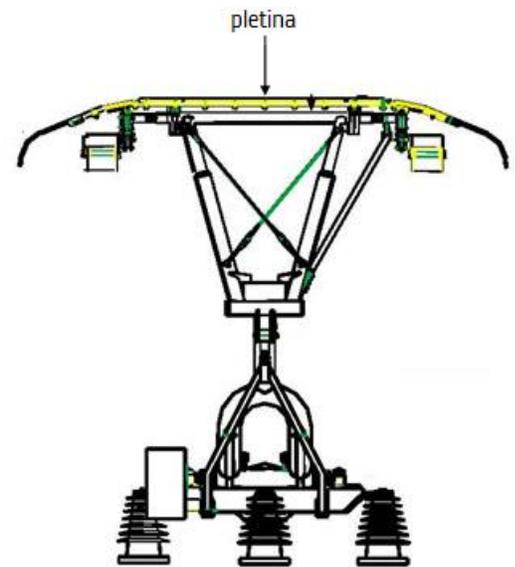


Figura 16. Pantógrafo

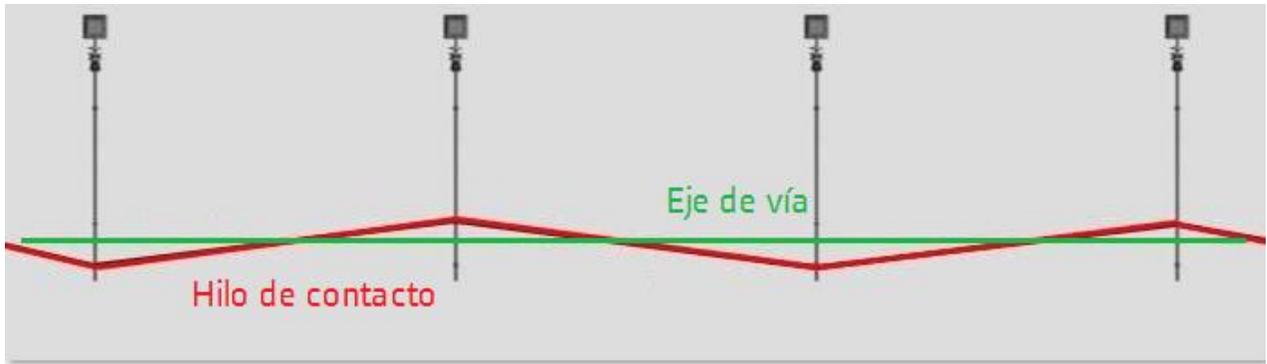


Figura 17. Trayectoria del hilo de contacto

- Catenaria flexible

La catenaria flexible es la línea aérea de alimentación soportada por un sistema de cables, ménsulas, péndolas, postes, entre otros, cuya función principal es transmitir la energía eléctrica a los trenes por medio del pantógrafo.

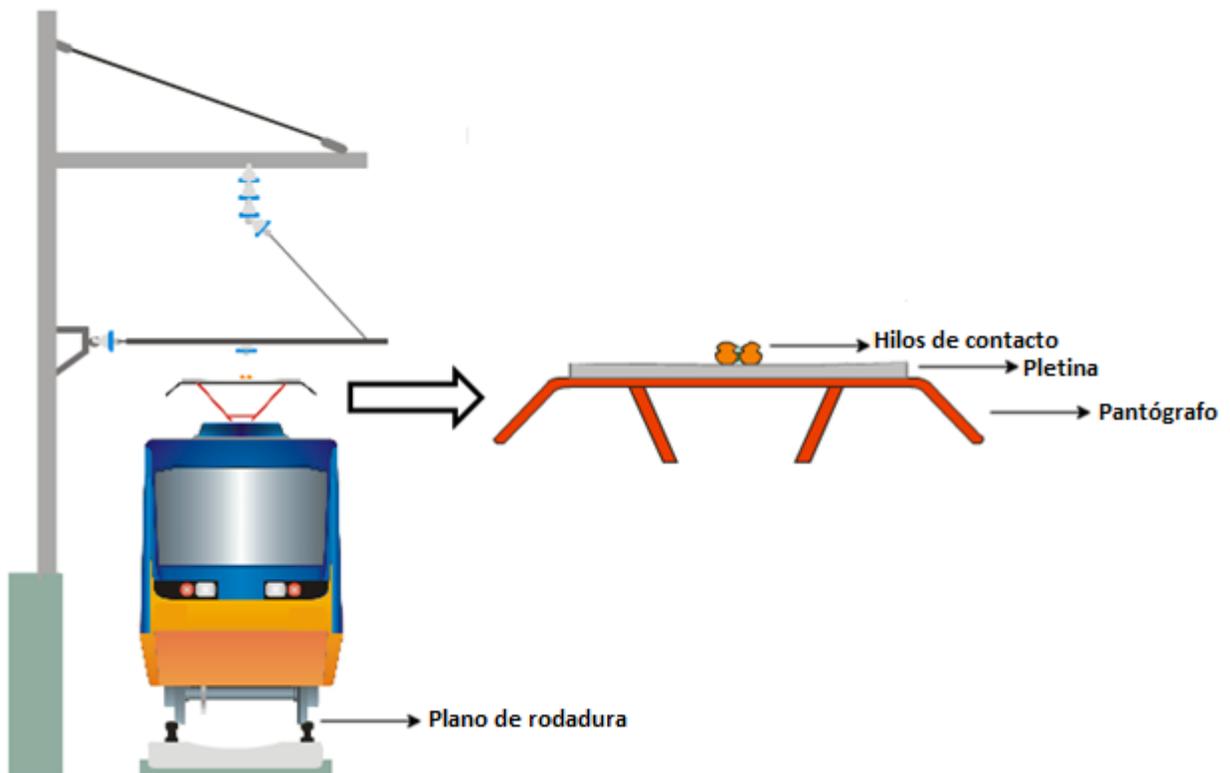


Figura 18. Catenaria flexible

La catenaria rígida tiene como desventaja el gran peso generado por el carril que transmite la corriente eléctrica, ya que se requiere un mayor número de apoyos para suspenderlo paralelamente a la vía en comparación con la catenaria flexible, es decir, que la catenaria rígida necesita un apoyo cada 10 o 12

metros, mientras que la catenaria flexible necesita un apoyo cada 50 o 60 metros. Por esta razón el sistema de alimentación ferroviaria de interés se enfocará a la catenaria flexible.

f) Elementos de la catenaria flexible

La catenaria flexible está compuesta principalmente por conductores eléctricos que sirven como portadores a diferentes alturas de los hilos de contacto, estos últimos sujetos mediante aisladores y soportes fijados en estructuras metálicas.

Los principales elementos que lo integran se enlistan a continuación:

- Accesorios metálicos: soportes, ménsulas, tubos, etc.
- Conductores eléctricos
- Aisladores
- Aparatos tensores
- Seccionadores
- Pararrayos

Aunque no son los únicos componentes, el sistema catenaria principalmente está formado por un portador (hilo mensajero) y uno o dos hilos de contacto, los cuales están suspendidos por elementos llamados péndolas (o péndulos).

A lo largo de la vía la catenaria se sostiene mediante postes o soportes, los postes se colocan a un costado de la vía.

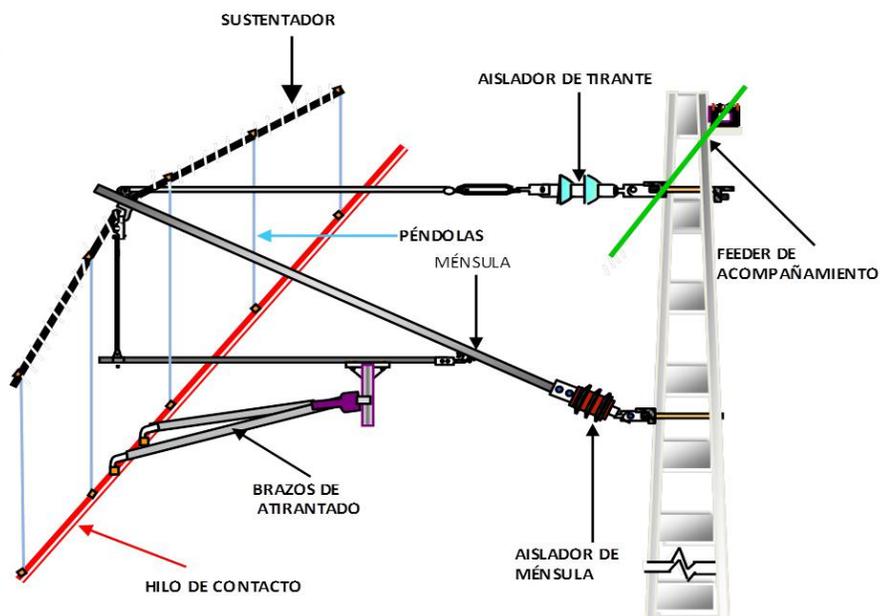


Figura 19. Elementos de *catenaria flexible*

g) Tipos de catenaria flexible

De acuerdo con la carga (material rodante) y la tensión de alimentación se calcula la sección transversal de la catenaria flexible, dando como resultado dos posibles configuraciones:

- *Catenaria simple*

Constituida por un portador principal y dos hilos de contacto cuyas especificaciones se muestran en la *Tabla 2*.

Características de los conductores	Portador principal	Hilo de contacto
Material	bronce	Cobre duro
Sección	116.18 mm ²	107mm ²
Diámetro	14 mm	12.24 mm
Composición	37 hilos de 2 mm	Hilo ranurado
Peso por metro lineal	1.08 kg	0.951 kg
Carga de ruptura	6720 kg	3830 kg
Coefficiente de dilatación	17 x 10 ⁻⁶	17 x 10 ⁻⁶
Coefficiente de alargamiento	118 x 10 ⁻⁶	83 x 10 ⁻⁶
Tensión a +25°C	1820 kg	1250 kg

Tabla 2. Características mecánicas de la catenaria simple³

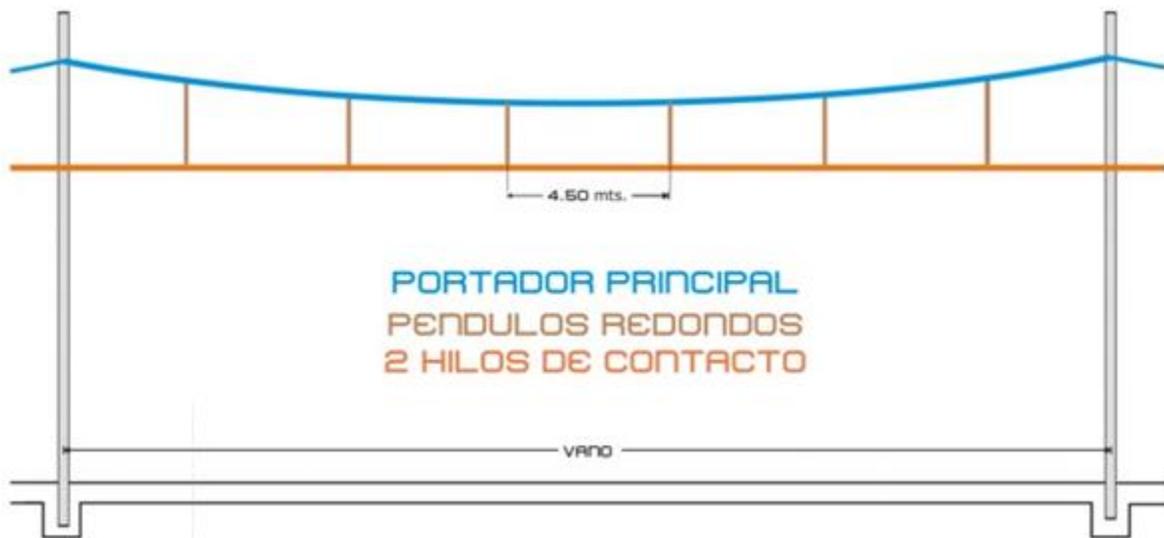


Figura 20. Catenaria simple

- *Catenaria normal*

Compuesta por un alimentador, un portador principal, un portador auxiliar y dos hilos de contacto cuyas especificaciones se muestran en la Tabla 3.

Características de los conductores	Portador principal	Portador auxiliar	Hilo de contacto	Alimentador
Material	bronce	cobre duro	cobre duro	cobre duro
Sección	116.18 mm ²	104 mm ²	107mm ²	261.53 mm ²
Diámetro	14 mm	11.5 mm	12.24 mm	21 mm
Composición	37 hilos de 2 mm	Hilo redondo	Hilo ranurado	37 hilos de 3mm
Peso por metro lineal	1.08 kg	0.925 kg	0.951 kg	2.375 kg
Carga de ruptura	6720 kg	3590 kg	3830 kg	9100 kg
Coefficiente de dilatación	17 x 10 ⁻⁶	17 x 10 ⁻⁶	17 x 10 ⁻⁶	17 x 10 ⁻⁶
Coefficiente de alargamiento	118 x 10 ⁻⁶	95 x 10 ⁻⁶	83 x 10 ⁻⁶	118 x 10 ⁻⁶
Tensión a +25°C	1820 kg	590 kg	1250 kg	1600 kg

Tabla 3. Características mecánicas de la catenaria normal³

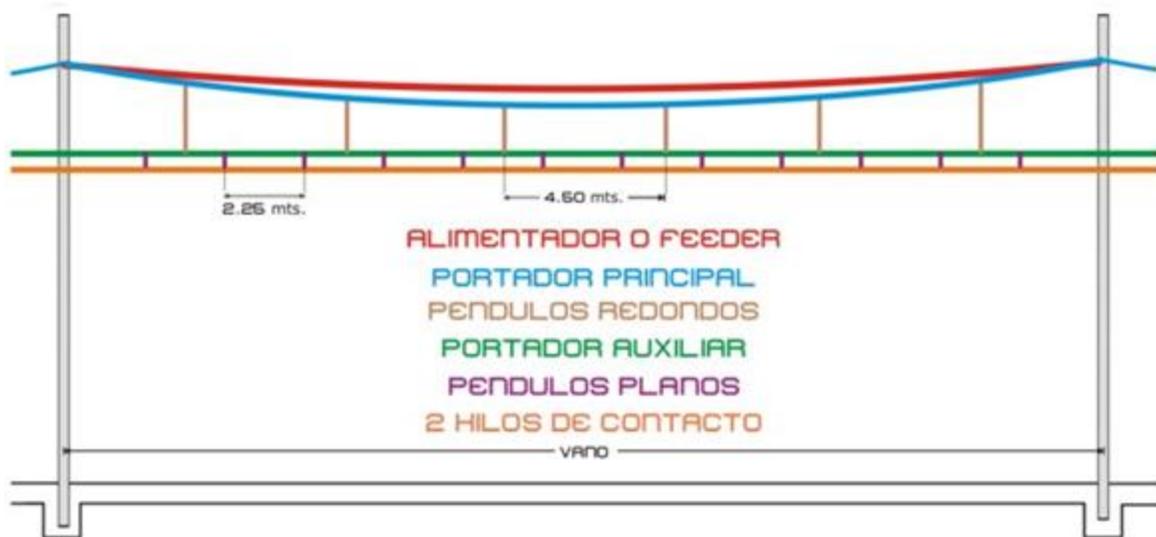


Figura 21. Catenaria normal

h) Altura y descentramiento del hilo de contacto

La regulación del sistema de catenaria consiste en verificar el cumplimiento de las medidas geométricas de la misma, de modo que se pueda asegurar un funcionamiento óptimo.

³ Octavio Lomelí Escobar, Ángel David Chávez González. Características mecánicas de la catenaria simple y normal, p.63.

- La altura del hilo de contacto será medido a partir del plano de rodamiento, tal como se muestra en la *Figura 22*.

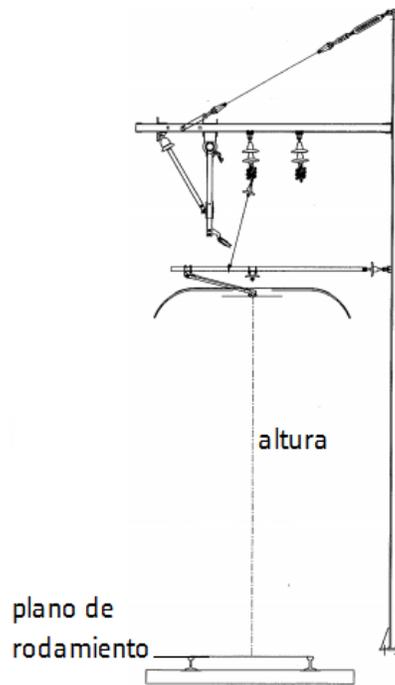


Figura 22. Altura del hilo de contacto

- El descentramiento del hilo de contacto tiene un rango de operación de -350mm a 350mm y debe ser medido en relación al eje de la vía (*Figura 23*).

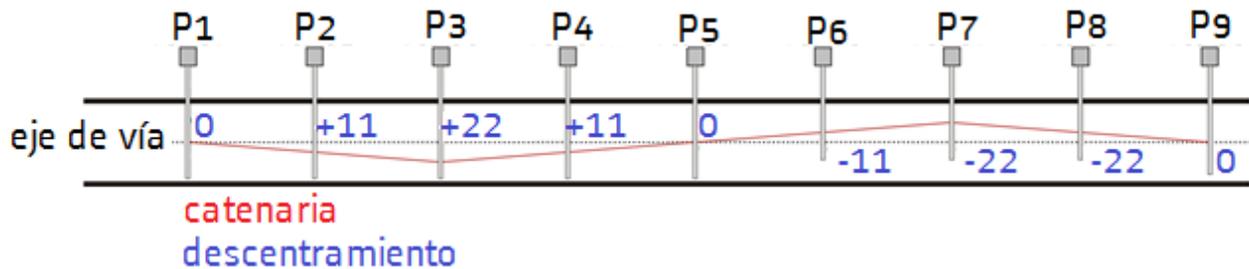


Figura 23. Descentramiento del hilo de contacto

II. Definición del problema

La instalación del sistema de catenaria requiere un proceso de mantenimiento preventivo, el cual consiste en verificar la posición de el o los hilos de contacto según el tipo de catenaria (*Tabla 4*).

Tipo de catenaria	Número de hilos de contacto
Simple	1
Normal	2

Tabla 4. Relación del número de hilos de contacto según el tipo de catenaria

Asegurar la geometría de la catenaria es fundamental para que el pantógrafo se deslice adecuadamente a lo largo de toda la trayectoria. El desempeño óptimo del mismo consiste en un buen contacto entre el área de la pletina y los cables de alimentación como se muestra en la *Figura 24*.



Figura 24. Deslizamiento de los hilos de contacto en la pletina del pantógrafo

El objetivo fundamental del instrumento de medición es determinar los parámetros que regulan la posición de la catenaria, los cuales se remiten a un plano de dos dimensiones (x,z). Donde “x” corresponde a la medición de descentramiento y “z” a la medición de altura.

Los alcances y criterios generales de diseño se enlistan a continuación:

- Medición de altura y descentramiento para dos hilos de contacto
- Localización satelital de los sitios de medición

- Medición de implantación: distancia del eje de vía al poste
- Control electrónico
- Fuente de alimentación recargable (4 horas de uso continuo)
- Iluminación (4 metros de distancia)
- Ergonomía
- Instalación intuitiva
- Precisión en la obtención y almacenamiento de lecturas
- Comunicación inalámbrica (menor a 10m)
- Visualización comprensible
- Optimización del procesamiento de lecturas obtenidas

La interconexión de los rubros que abarca el problema en cuestión se muestra en la *Figura 25*.

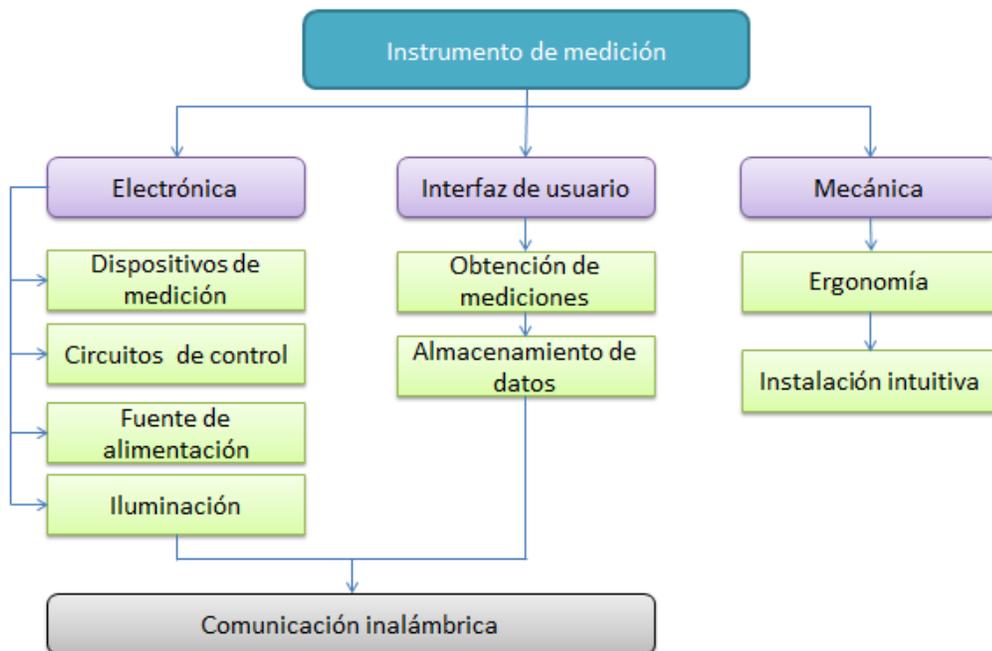


Figura 25. Esquema general de los criterios de diseño

III. Análisis y metodología empleada

La metodología empleada para el desarrollo del prototipo en cuestión, es una combinación del método analítico y el método sistémico.

Inicialmente se distinguieron y se analizaron por separado los diferentes elementos involucrados para conseguir las mediciones en la geometría del sistema de catenaria. Así mismo, se realizó el estudio de los criterios de diseño para lograr establecer una relación entre ellos.

El prototipo se modeló mediante la determinación de los componentes necesarios para conseguir la dinámica del sistema y su estructura física.

La investigación científica exploratoria con una técnica documental proporcionó una visión general del objeto de análisis y los conceptos implicados, de esta forma fue posible conocer los procesos de medición ya existentes, ordenar las etapas de investigación y estructurar un control de avances.

Los procedimientos de ingeniería realizados en la etapa profesional reportada se enlistan de manera general a continuación:

- Planeación, desarrollo, integración y puesta en marcha de un sistema electrónico.
 - Diseño y construcción de prototipo electrónico para medir, analizar, controlar y automatizar procesos con el uso de micro-controlares y sistemas digitales.
 - Análisis matemático del sistema de catenaria
 - Innovación, evaluación y selección de componentes electrónicos para la integración del sistema.
 - Dominio de métodos computacionales y de las tecnologías de información y la comunicación para la creación de una interfaz gráfica de usuario.
- a) Investigación previa sobre algunos instrumentos de medición existentes en el mercado para la medición de altura y descentramiento del hilo de contacto

o Calibrador láser de altura y descentramiento (Modelo 1)

Consiste esencialmente en un telémetro láser que permite al operador ubicar el hilo de contacto para obtener la medición de altura por medio de una mirilla integrada con un prisma de 90°. Por otra parte, la posición de descentramiento, se indica en una escala reflectante para facilidad de uso. Las mediciones se llevan a cabo mediante un sistema electrónico, sin embargo, a pesar de que los datos obtenidos se muestran en una pantalla LCD, el almacenamiento de lecturas debe ser realizado por el usuario.

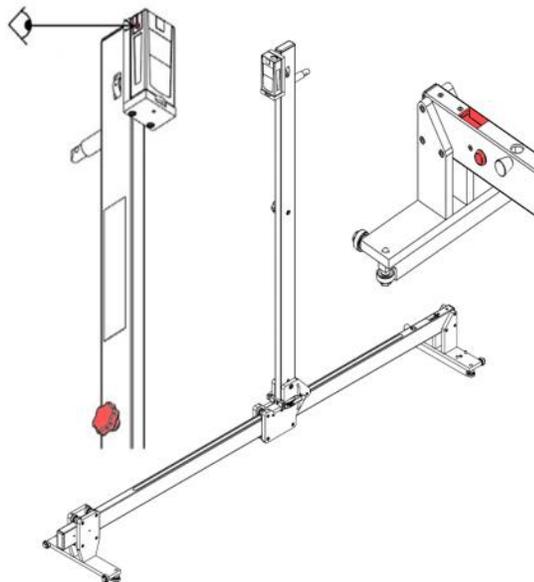


Figura 26. Calibrador láser de altura y descentramiento

o *Calibrador de fibra de vidrio para medición de altura y descentramiento del hilo de contacto (Modelo 2)*

Compuesto por dos reglas graduadas para realizar las mediciones de altura y descentramiento del hilo de contacto. La manipulación del instrumento es puramente mecánica, por lo que la precisión de las lecturas dependerá de la habilidad de cada operador. Los rodillos sobre los que está soportado el instrumento, permiten el deslizamiento del mismo sobre las vías.

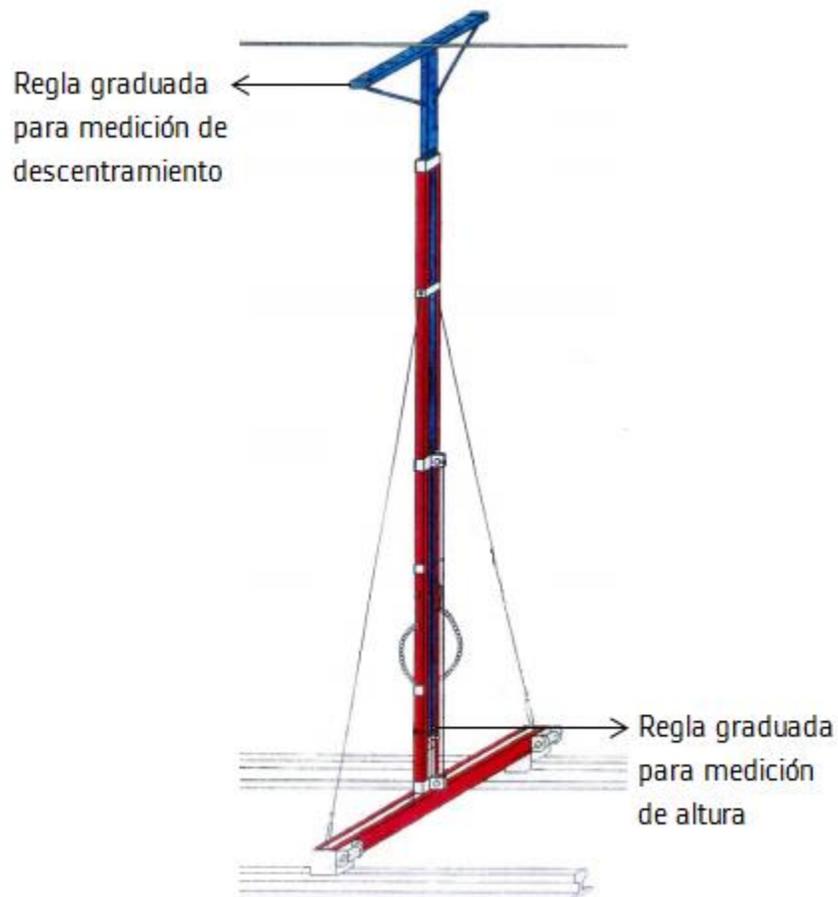


Figura 27. Calibrador de fibra de vidrio

o *Instrumento de medición mecánico y óptico para altura y descentramiento del hilo de contacto (Modelo 3)*

Está compuesto por un bloque de medición láser, el cual se desliza sobre una barra perpendicular a las vías para efectuar el posicionamiento del hilo de contacto. Cuenta con un asistente digital personal (PDA) para efectuar y almacenar las mediciones de altura y descentramiento. El control es electrónico, sin embargo el posicionamiento del hilo de contacto se debe realizar de forma manual.

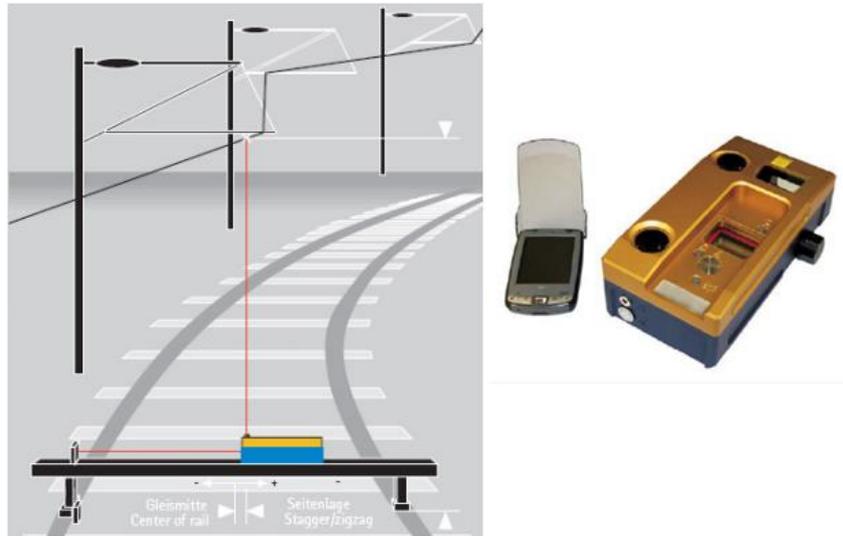


Figura 28. Instrumento de medición mecánico y óptico para altura y descentramiento del hilo de contacto

Las siguientes tablas muestran las especificaciones generales⁴ de los modelos descritos.

Modelo	Tamaño [m] en uso ancho x largo x alto	Tamaño [m] doblado ancho x largo x alto	Peso [kg]	Fuente de alimentación
1	0.265x1.620x1.450	0.265x1.620x0.280	6.1	9v (1 año)
2	-	-	14 a 17	-
3	0.37x1.8x0.35	0.2x0.2x0.97	17	3v

Tabla 5. Comparación de características físicas

Modelo	Descentramiento			Altura		
	Resolución	Exactitud	Rango	Resolución	Exactitud	Rango
1	1mm	+/- 10mm @ 5m	-43.5cm a 52.0cm	0.1mm	+/- 3mm	2m a 100m
2	1mm	Depende del operario	+/- 40cm	1mm	Depende del operario	4.4 a 6.4
3	-	+/- 5mm	+/- 70cm	-	+/- 1.5mm	50m

Tabla 6. Comparación de especificaciones técnicas

⁴ GEISMAR. Catenary tools, p.VIII-1.

- b) Análisis de los requerimientos mínimos del diseño en cuestión, basados en los parámetros de los instrumentos existentes en el mercado

La geometría del sistema catenaria normal³ cuenta con dos hilos de contacto, cada uno tiene una sección transversal de 107mm^2 , presentan una separación aproximadamente de 3cm entre sí. Su altura es normalmente de 4.30m a lo largo de la línea y de 5.50m en talleres. Su rango de descentramiento puede ir desde los $\pm 22\text{cm}$ hasta los $\pm 35\text{cm}$ tomando como cero el eje de vía. Evaluando los criterios anteriores se establecieron los rangos mínimos y máximos necesarios para el diseño (Tabla 7) y con ellos a su vez fue posible seleccionar los componentes electrónicos a utilizar⁵.

Parámetro	Rango	Valor
Altura	Mín.	4.30m
	Máx.	5.50m
Descentramiento	Mín.	$\pm 22\text{cm}$
	Máx.	$\pm 35\text{cm}$
Resolución para la medición del hilo de contacto	Mín.	0.1mm
	Máx.	4mm

Tabla 7. Rangos de medición

La Tabla 8 muestra la comparación entre las características de los instrumentos existentes en el mercado y las características del prototipo propuesto como solución.

PARÁMETROS MÁXIMOS DE INSTRUMENTOS EXISTENTES EN EL MERCADO		PROTOTIPO
Descentramiento	Resolución	1 mm
	Exactitud	+/- 5 mm
	Rango	+/- 70 cm
Altura	Resolución	0.1 mm
	Exactitud	+/- 1.5 mm
	Alcance	100 m
General	Tamaño en uso (ancho x largo x alto)	0.265x1.620x0.35 m
	Tamaño doblado (ancho x largo x alto)	0.19x1.70x0.178 m
	Dispositivo de medición	0.2x0.2x0.97 m
	Riel	0.265X1.620X0.280 m
	Peso	6.1kg
	Fuente de alimentación	3V (1 año)
		5V (1.5 años)

Tabla 8. Comparación de parámetros

⁵ Instrumentos WIKA. Tipos de Sensores para la medida de presión Cálculo de Precisiones, p.6.

c) Descripción de los componentes seleccionados

-Dispositivos para medición de distancias

○ *Sensor ultrasónico modelo HC-SR04*

El sensor ultrasónico HC-SR04, es un módulo que permite la medición de distancia por medio de dos transductores de ultrasonido que se utilizan conjuntamente.

El sensor tiene un disco piezoeléctrico montado en su superficie, el cual produce ondas de sonido de alta frecuencia. Estas ondas chocan con cierto objeto produciendo el eco de la señal transmitida.

Una vez conociendo el tiempo del viaje del sonido y la velocidad de propagación de la onda sonora, se puede calcular la distancia entre el sensor y el obstáculo mediante la siguiente expresión⁶:

$$distancia[cm] = \frac{ancho\ de\ pulsos\ [\mu s]}{58}$$

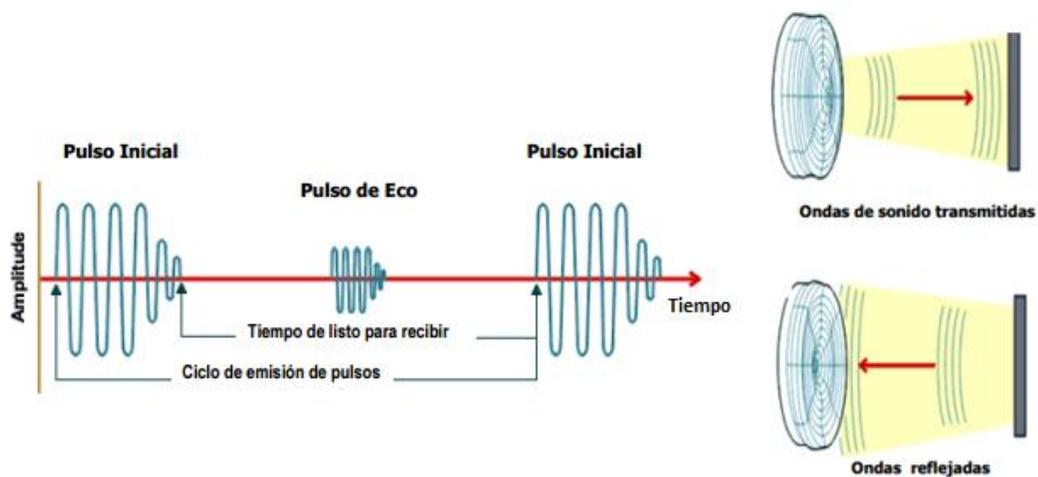


Figura 29. Funcionamiento del sensor ultrasónico HC-SR04

○ *Sensor laser LDK Model 2 Series*

Un medidor de distancia láser emite un pulso de luz de láser a un objetivo, el pulso se refleja en el objetivo y vuelve al dispositivo emisor.

Se basa en que el láser es un rayo enfocado e intenso de luz, generalmente de una sola frecuencia que viaja a grandes distancias sin perder intensidad.

La distancia entre el medidor y el objetivo está dada por⁷:

⁶ HERRAMIENTAS TECNOLÓGICAS PROFESIONALES. Sensor ultrasónico HC-SR04, <https://www.hetpro-store.com/TUTORIALES/sensor-de-distancia->

$$D = \frac{c * t}{2}$$

donde

$$c = \text{rapidez de la luz} = 3 \times 10^8 \frac{m}{s}$$

t = cantidad de tiempo en que el laser llega al objetivo y regresa al medidor

El sensor láser LDK Model2 Series está diseñado para recibir las mediciones obtenidas por medio de una computadora o un micro controlador estableciendo una comunicación RS232 (UART- TTL)

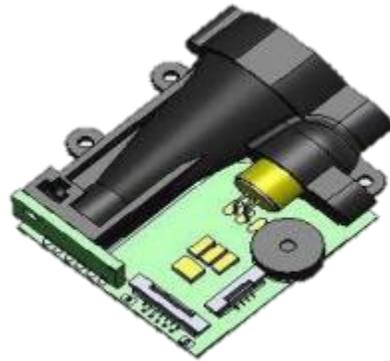


Figura 30. Sensor laser LDK Model2 Series

-Dispositivos para control de movimiento mecánico

- *Motor a pasos bipolar*

Un motor es un conjunto de mecanismos que producen energía mecánica a partir de otra forma de energía, ya sea calorífica, hidráulica o eléctrica. Para el motor bipolar a utilizar, la energía primaria será energía eléctrica.

De forma general las partes principales de un motor se muestran en la *Figura 31*:

⁷Egismos Opto Electronics. Laser Measuring & Optoelectronics, <http://www.egismos.com/laser-measuring-optoelectronics-module.html>

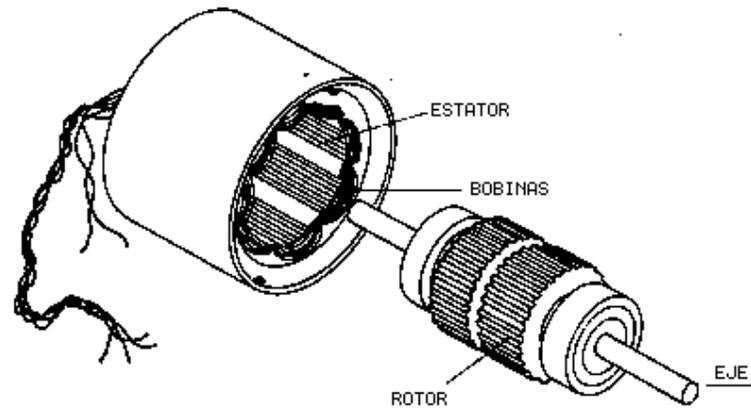


Figura 31. Partes de un motor

Un motor a pasos bipolar está constituido por cuatro bobinas en el estator y un imán permanente en el rotor. La conmutación o excitación de las bobinas se controla de forma externa⁸.

Las bobinas avanzan y retroceden un pequeño ángulo de giro, por cada combinación de voltaje aplicado en las bobinas, por lo que se requiere de una secuencia de pulsos para generar su movimiento.

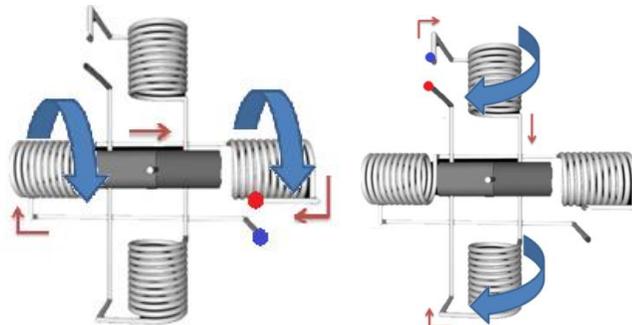


Figura 32. Movimiento de las bobinas de un motor bipolar

Los parámetros más importantes para seleccionar un motor son:

- ✓ Número de pasos por vuelta: se refiere a las posiciones en las que el rotor se detiene por cada paso

$$\frac{360^\circ}{\text{número de pasos}} = \text{grados por cada paso}$$

- ✓ Torque de retención: es la fuerza con la que el motor puede soportar determinado peso.

⁸ 330ohms. Motores a pasos... ¿unipolares o bipolares?, <https://www.330ohms.com/blogs/blog/112837444-que-son-los-servomotores>

Se puede calcular conociendo el diámetro de la polea que se coloca en el eje del rotor y el peso fijo que moverá el motor.

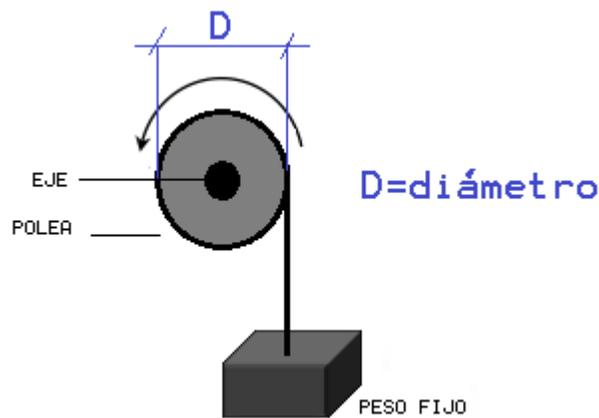


Figura 33. Diagrama para el cálculo del torque de retención

$$\text{Torque} = \frac{\text{Peso fijo [kg]} * \text{diámetro de la polea[cm]}}{2}$$

- ✓ Temperatura máxima a la que puede llegar el motor
- ✓ Corriente de consumo
- ✓ Resistencia de las bobinas

El funcionamiento del motor se describe de manera general en el diagrama de bloques de la Figura34:



Figura 34. Principio de funcionamiento del motor bipolar

El microcontrolador será el encargado de enviar una secuencia de pulsos al controlador para indicar el sentido del flujo de la corriente, que a su vez determinará sentido de giro del motor (Tabla 9).

Giro en sentido horario				
PASO	BOBINA A	BOBINA B	BOBINA C	BOBINA D
1	+V	-V	+V	-V
2	-V	+V	+V	-V
3	-V	+V	-V	+V
4	+V	-V	-V	+V

Giro en anti horario				
PASO	BOBINA A	BOBINA B	BOBINA C	BOBINA D
1	+V	-V	-V	+V
2	-V	+V	-V	+V
3	-V	+V	+V	-V
4	+V	-V	+V	-V

Tabla 9. Secuencias de giro para motor bipolar

○ *Puente H (LM298)*

El circuito integrado LM298 permite controlar el sentido de giro y velocidad de un motor mediante señales TTL.

Un puente H está constituido esencialmente por ocho transistores operando en las regiones corte y saturación, estos se interconectan en grupos de cuatro para controlar la excitación de bobinas diferentes⁹.

El funcionamiento general de cada conjunto de transistores, consiste en crear dos trayectorias que permitan el flujo de corriente en diferentes sentidos, con lo cual se modificará el giro del motor como se observa en la *Figura 35*.

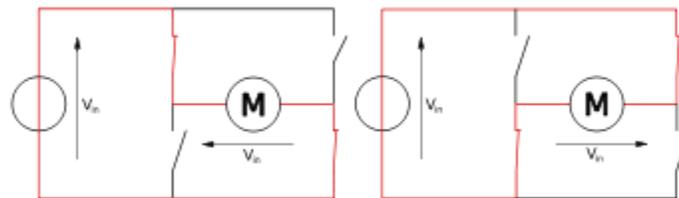


Figura 35. Estados básicos del circuito integrado L298

○ *Servomotor*

Un servomotor permite controlar la posición del eje en cierta cantidad de grados. Su principio de funcionamiento se basa en un sistema electromecánico – electrónico (*Figura 36*).

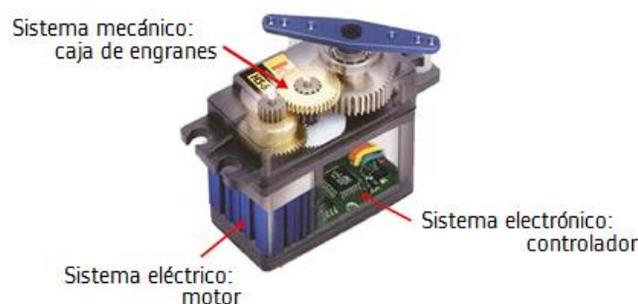


Figura 36. Partes del servomotor

⁹ HERRAMIENTAS TECNOLÓGICAS PROFESIONALES. Módulo Puente H L298, <https://hetpro-store.com/modulo-puente-h-l298n-para-control-de-motores/>

El eje del motor de DC se acopla a una caja de engranajes, la cual permite aumentar la potencia del torque y lograr mantener una posición fija cuando se requiera¹⁰. El circuito electrónico, es el encargado de manejar el movimiento y la posición por medio de una señal PWM (Figura 37 y Figura 38).

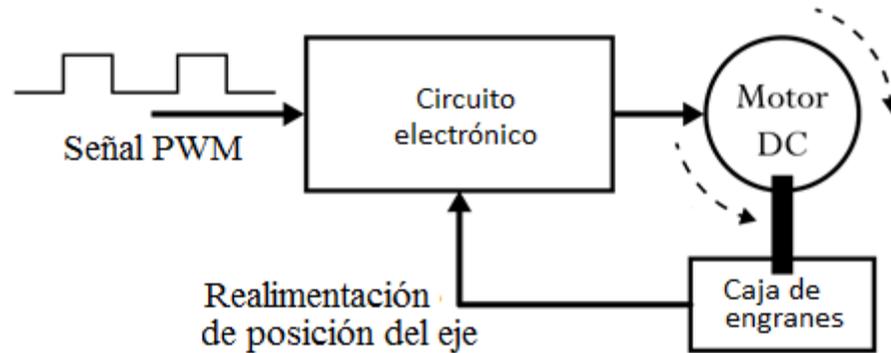


Figura 37. Diagrama de bloques del funcionamiento del servomotor

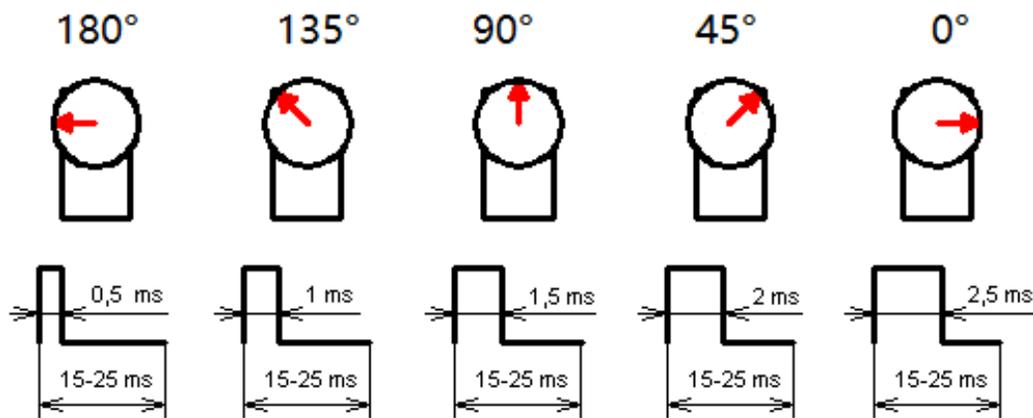


Figura 38. Señal PWM para diferentes posiciones del servomotor

-Comunicación inalámbrica

○ Módulo bluetooth HC-05

El módulo bluetooth HC-05 es un módulo maestro-esclavo capaz de recibir y generar conexiones con otros dispositivos¹¹. El principio de funcionamiento según su configuración, se muestra en la Figura 39.

¹⁰ 330ohms. ¿Qué son los servomotores?, <https://www.330ohms.com/blogs/blog/112837444-que-son-los-servomotores>

¹¹ Geek Factory. Bluetooth HC-05 y HC-06 Tutorial de Configuración, <http://www.geekfactory.mx/tutoriales/bluetooth-hc-05-y-hc-06-tutorial-de-configuracion/>

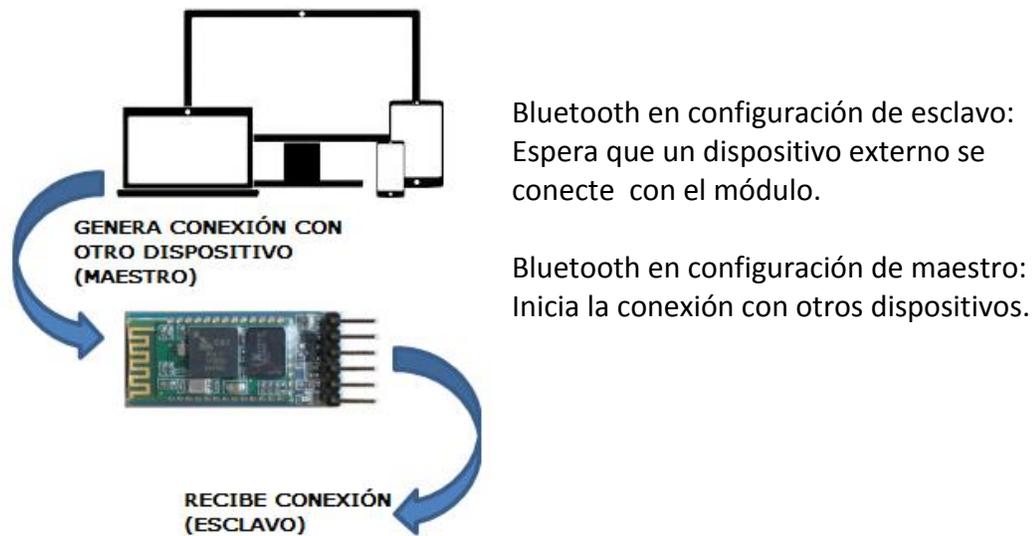


Figura 39. Funcionamiento de la comunicación inalámbrica vía bluetooth

Para establecer comunicación con el módulo HC-05, es necesario realizar la búsqueda del mismo desde una fuente externa a modo de emparejar ambos dispositivos.

Sus características más importantes se enlistan a continuación:

- Su núcleo consiste en un transmisor de radio, una banda base y una pila de protocolos. El sistema permite la conexión entre dispositivos y el intercambio de distintos tipos de datos entre ellos.
- Puede configurarse mediante comandos AT como maestro o esclavo. Trabaja como una línea de comunicación serial (TX/RX) con una velocidad de transmisión que esta entre 9600 y 115200 bps.
- Transmite datos a través de ondas de radio de baja potencia (4 dBm) a través de una antena incorporada al PCB con alcance de 5 a 10 metros (clase 2).
- Comunica en una frecuencia de 2.4 GHz, en la banda de frecuencias para el uso de dispositivos industriales, científicos y médicos (ISM) con un total de 79 canales. El espacio entre canales es de 1MHz; sin embargo, es necesario tener márgenes de protección respecto al ancho de banda, por lo que el límite inferior de protección es de 2MHz y el límite superior es de 3.5 MHz.
- Emplea la modulación por desplazamiento de frecuencia con filtrado gaussiano (GFSK), la cual permite un bajo coste y alcanza tasas de transmisión de 1Mbps. El índice de modulación debe estar entre 0.28 y 0.35. Un "1" binario se representa por una desviación positiva de frecuencia y un "0" binario como una desviación negativa. La desviación mínima no ha de ser menor de 115 kHz.
- En el dispositivo receptor bluetooth el nivel de sensibilidad es el aspecto más importante. Para lograr la medición de una tasa de error de bit, el dispositivo receptor envía de vuelta la información decodificada. Para una tasa de error o BER (Bit Error Rate) del 0.1% se define el nivel de sensibilidad de un receptor bluetooth mayor o igual a - 70dBm.

Con tantas tecnologías en la misma banda de frecuencia (2.402 GHz y 2.480 GHz) se pueden producir problemas de interferencia, por lo que la tecnología bluetooth utiliza un esquema de reconocimiento rápido y saltos de frecuencia cada 645 μ s para garantizar la potencia de enlace¹².

Con el fin de evitar perder la comunicación durante el proceso de medición y de esta forma asegurar la transferencia de los datos obtenidos por los sensores, la programación interna de la interfaz de usuario inicia y termina el enlace con el bluetooth cada vez que hay un cambio en la pantalla, enviando así una alerta si la conexión se ha perdido al inicio de cada procedimiento. De este modo, solo bastará reintentar acceder a la pantalla donde se perdió la conexión para restablecerla automáticamente, tal como se muestra en la *Figura 40*.

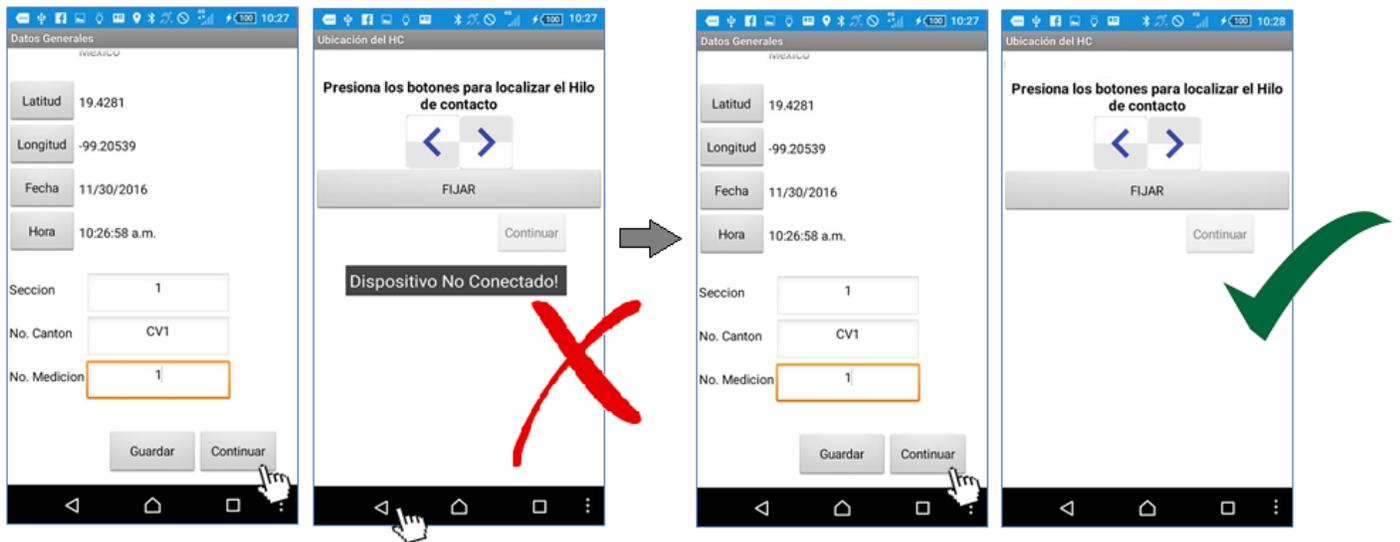


Figura 40. Solución al problema de interferencia en la conexión bluetooth

IV. Participación profesional

- a) Descripción del prototipo diseñado para medición de altura y descentramiento del hilo de contacto

El sistema electrónico permitirá llevar a cabo la medición de altura y descentramiento en la catenaria de uno o dos hilos de contacto por medio de un módulo laser y un sensor ultrasónico respectivamente. Debido a que la posición del hilo de contacto es aleatoria según el sitio donde se requiera la medición, se programaron los sensores de tal forma que se pudieran realizar los ajustes de calibración respectivos.

¹² Diana Franco Francisco Castillo, Universidad Tecnológica de Panamá-Facultad de Ingeniería. Comunicaciones Inalámbricas Bluetooth, <http://www.revistas.utp.ac.pa/index.php/prisma/article/view/412/html>

De acuerdo con los alcances y criterios generales mencionados en el apartado II de este documento, se establecieron los puntos de referencia mostrados en la *Figura 41* para efectuar las mediciones.

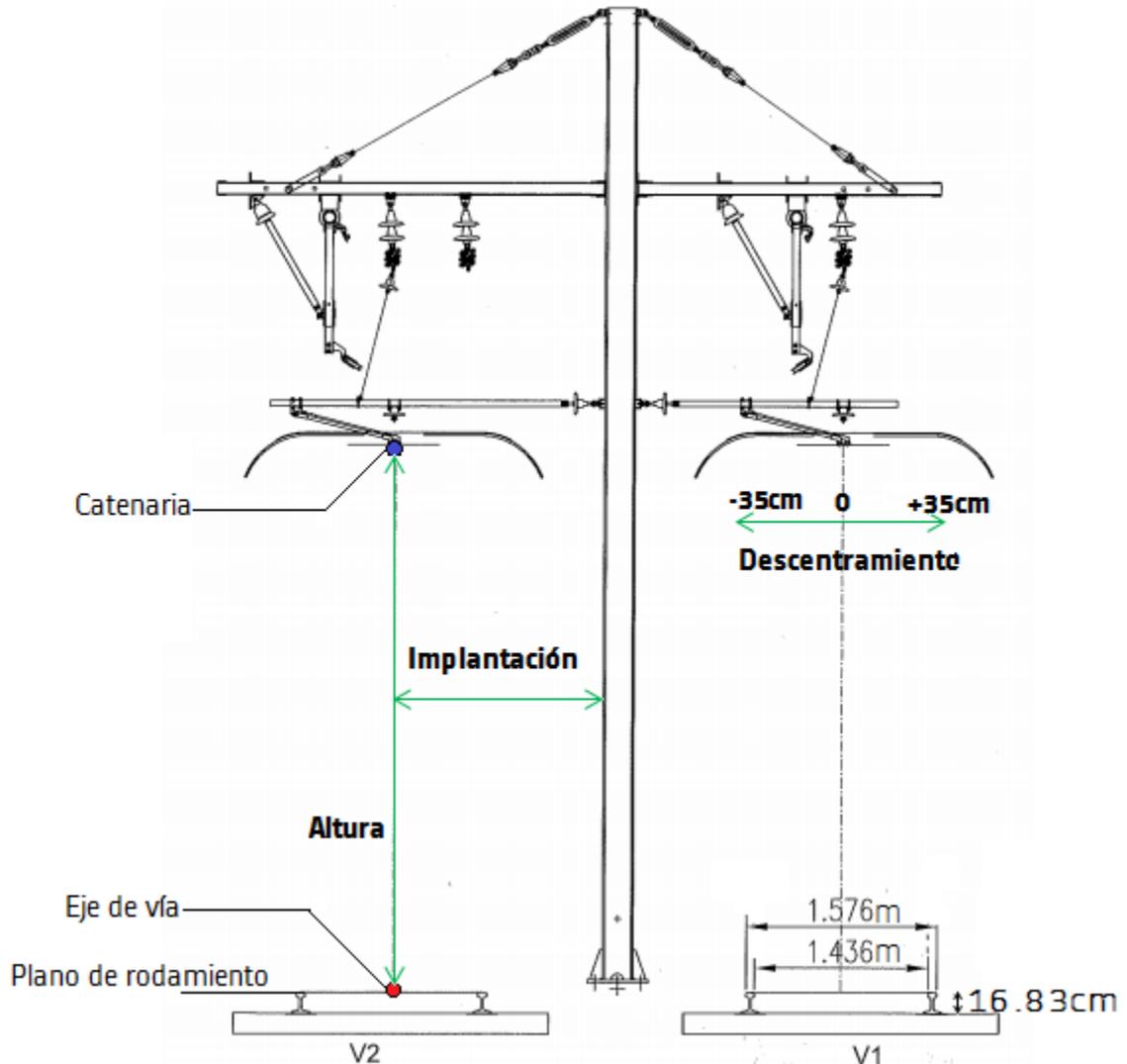


Figura 41. Referencias físicas del sistema catenario

El descentramiento es la amplitud horizontal tomada a partir del eje de vía hacia la derecha o hacia la izquierda según la posición del hilo de contacto, su rango máximo de $\pm 35\text{cm}$ considerando que la lectura negativa es la más próxima al poste. Por otra parte la altura es el largo que existe entre el plano de rodamiento y la catenaria, mientras que la implantación es la distancia entre el eje de vía y el poste.

Como se muestra en la *Figura 42*, el instrumento de medición está compuesto por un riel motorizado, el cual transmite el movimiento horizontal a una base móvil sobre la cual se instala el sistema electrónico. El riel permite determinar la posición del eje de vía para referenciar todas las mediciones, debido a que éste no se encuentra definido físicamente.

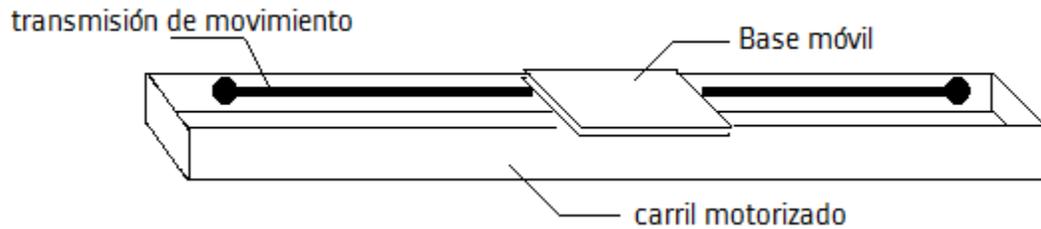


Figura 42. Estructura mecánica del instrumento de medición

El control del prototipo y la obtención de datos se llevarán a cabo a través de un microcontrolador¹³ y una interfaz gráfica para dispositivos Android¹⁴ mostrada en la Figura 43, esta última permitirá el almacenamiento y la transferencia de las mediciones realizadas.

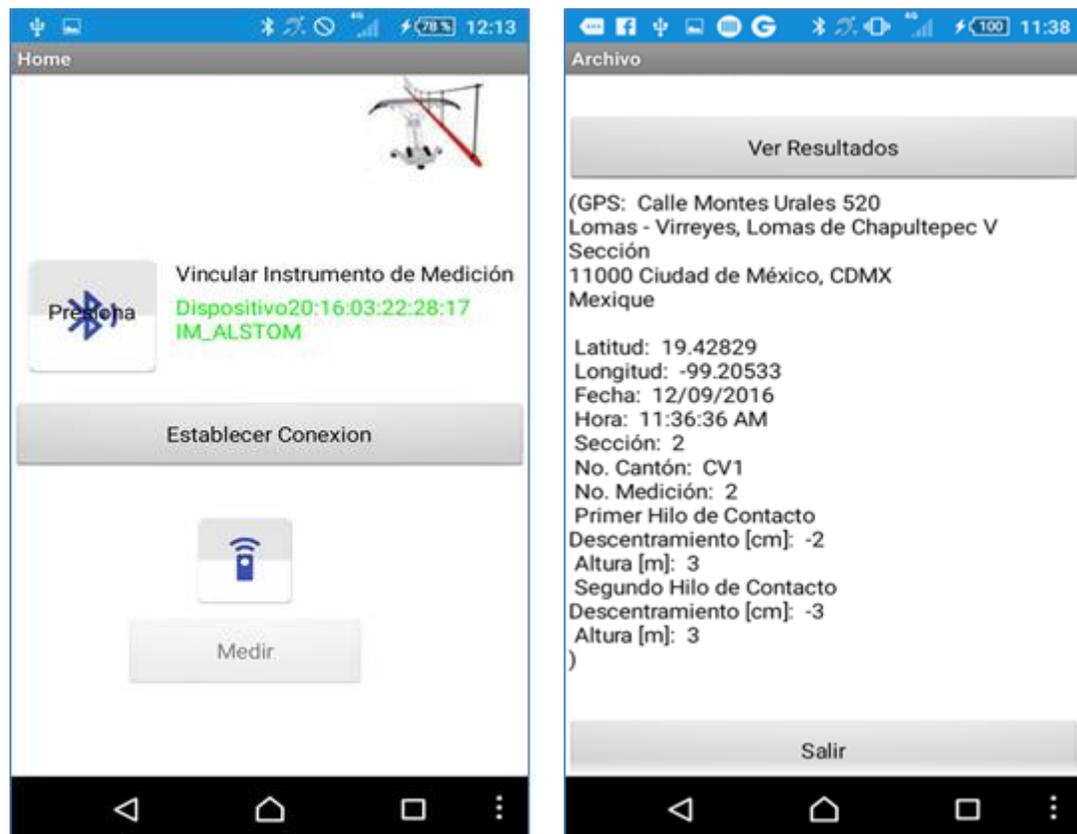


Figura 43. Interfaz gráfica para dispositivos Android

¹³ Arduino. From Arduino to a Microcontroller on a Breadboard, <https://www.arduino.cc/en/Tutorial/ArduinoToBreadboard>

¹⁴ MIT App Inventor. Tutorials for App Inventor <http://appinventor.mit.edu/explore/ai2/tutorials.html>

En la *Tabla 10* se menciona la dinámica del prototipo, la cual consiste en dos movimientos fundamentales considerados para los dispositivos de medición:

Tabla 10. Dinámica del prototipo		
Dispositivo	Movimiento	Función
Motor a pasos	Horizontal	Posicionar el prototipo de modo que se puedan tomar las lecturas de altura y descentramiento
Servomotor	Angular (0° a 90°)	Posicionar el prototipo para obtener la medición de la implantación

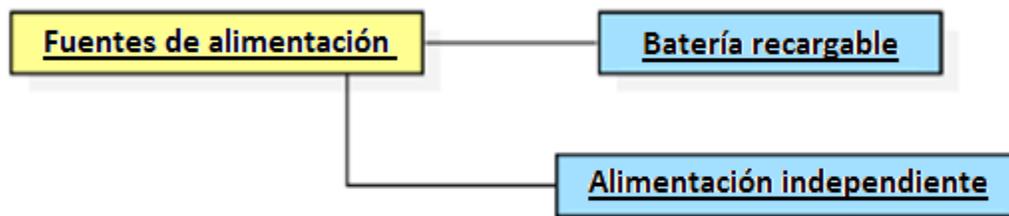
La comunicación remota entre la interfaz de usuario y el prototipo, se llevará a cabo por medio del módulo bluetooth HC-05 y el bluetooth del dispositivo Android a utilizar.

El o los hilos de contacto se localizarán por medio del sensor láser y un visor de tiempo real obtenido de una cámara con comunicación Wi-Fi.

La ubicación satelital del lugar donde se realice la medición se obtendrá por medio del dispositivo Android.

La distribución de energía de la fuente de alimentación del dispositivo, se muestra en la *Figura 44*.

I.



II.



III.

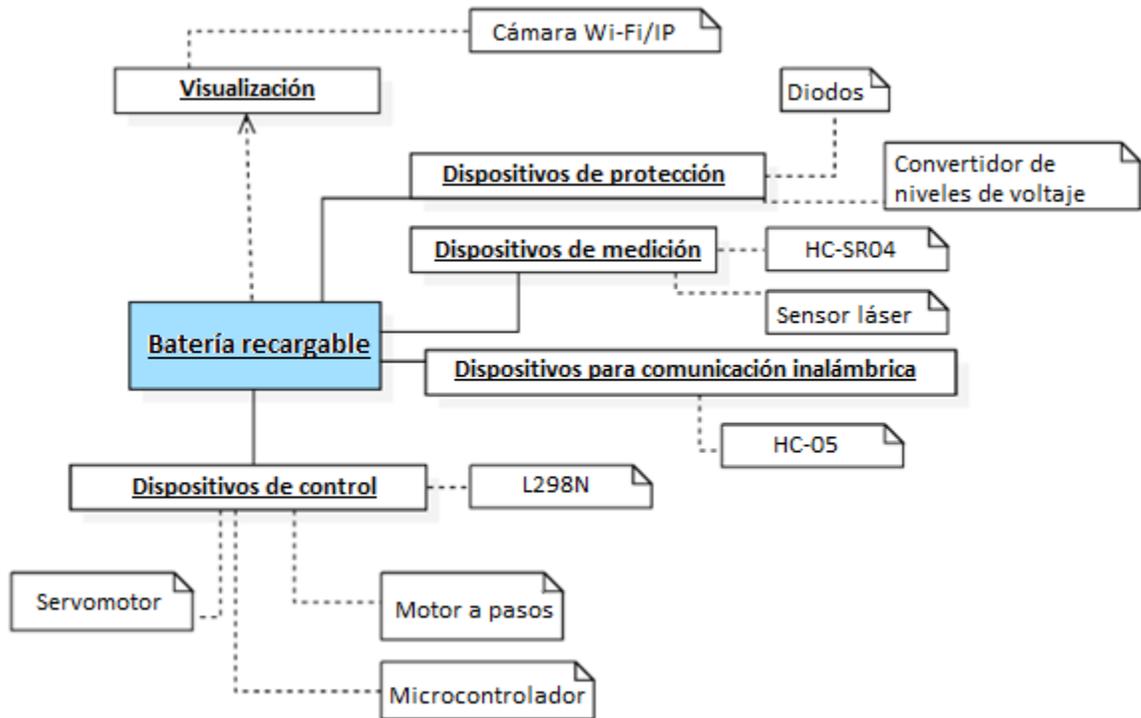


Figura 44. Fuente de alimentación del prototipo. I) Distribución general de energía. II) Dispositivos con fuente de alimentación independiente. III) Distribución de energía en la batería recargable.

El análisis teórico del consumo de corriente del prototipo se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11. Análisis del consumo de corriente	
Dispositivo	Consumo de corriente máxima [mA]
ATMEGA328P	0.2
Cámara Wi-Fi/IP	1000
Sensor ultrasónico HC-SR04	15
Sensor láser LDK Model 2 series (Convertidor de niveles de voltaje)	500
Motor a Pasos (Puente H L298N)	1000
Servomotor	200
Módulo Bluetooth HC-05	50
Total	2765.2

En la Figura 45 se muestra un esquema general del principio de funcionamiento del prototipo de medición, donde el usuario interactúa con este último por medio de una aplicación desarrollada en el sistema operativo de Android.

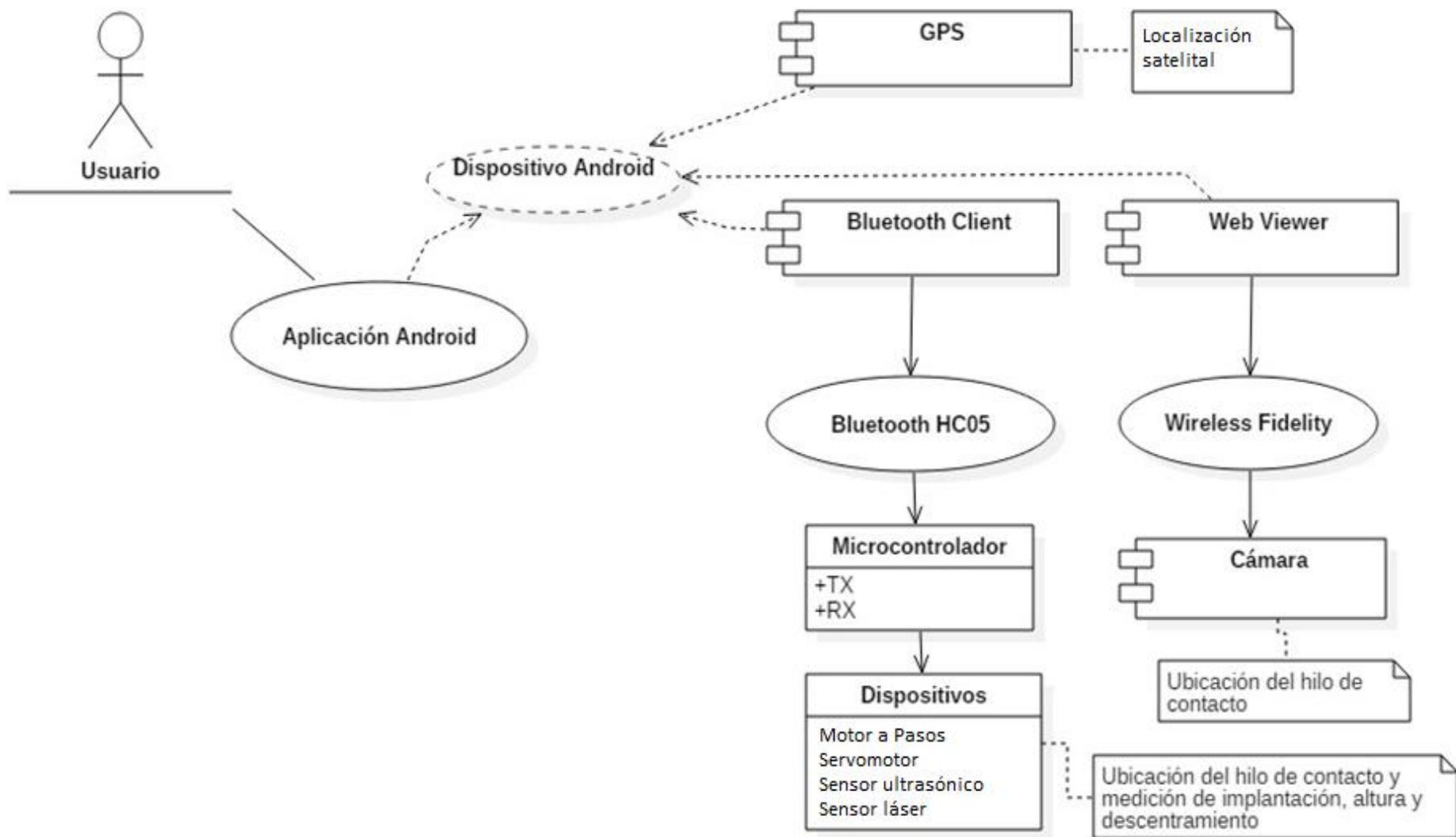


Figura 45. Principio de funcionamiento del prototipo de medición

b) Implementación del prototipo

Una vez programado el microcontrolador se realizó la manufactura del gabinete a modo de lograr que la disposición de los dispositivos fuera la óptima para los procesos de medición. En la *Figura 46*, se observa el diseño propuesto.

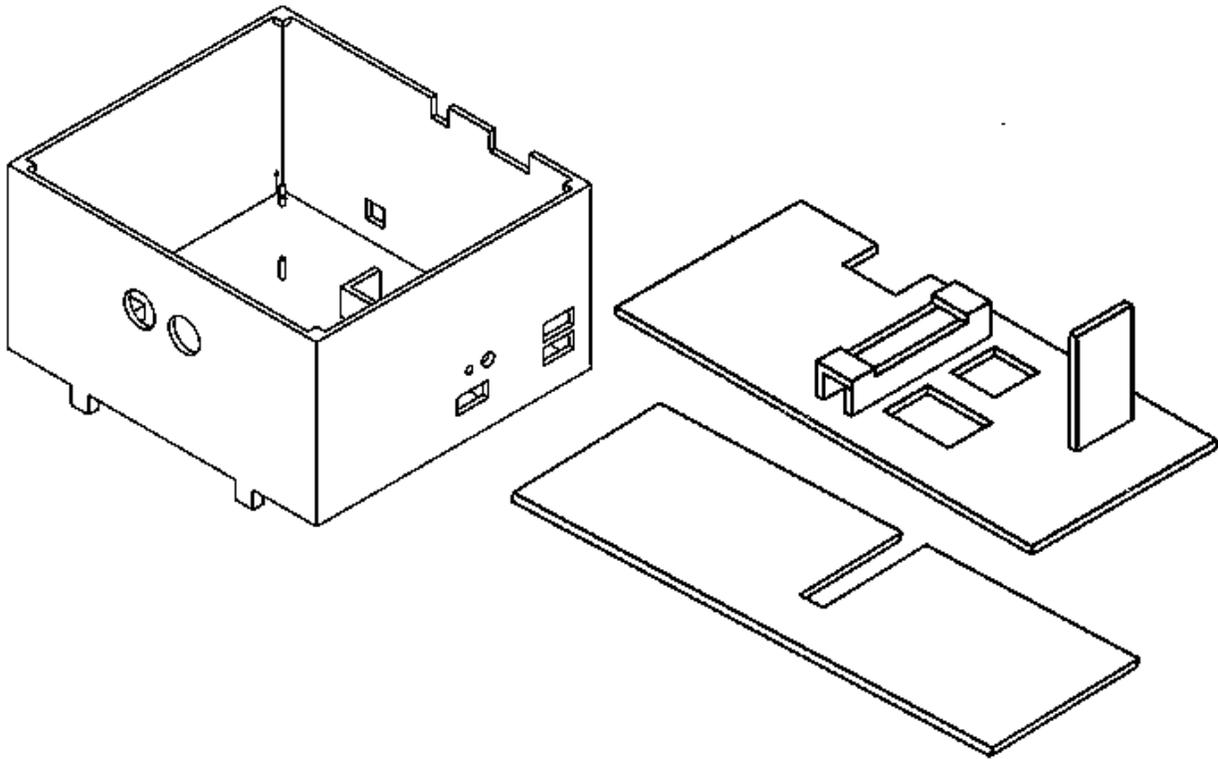


Figura 46. Diseño del gabinete

-Diagrama de conexión

En la *Figura 47* se muestra el diagrama de conexión del sistema electrónico basado en el microcontrolador ATMEGA328P y los dispositivos que se enlistan a continuación:

- Motor bipolar a pasos 28x45 4.5V.
- Puente H L298N.
- Servomotor.
- Sensor ultrasónico HC-SR04.
- Sensor láser.
- Convertidor de niveles de voltaje y diodos de protección.
- Módulo bluetooth HC-05

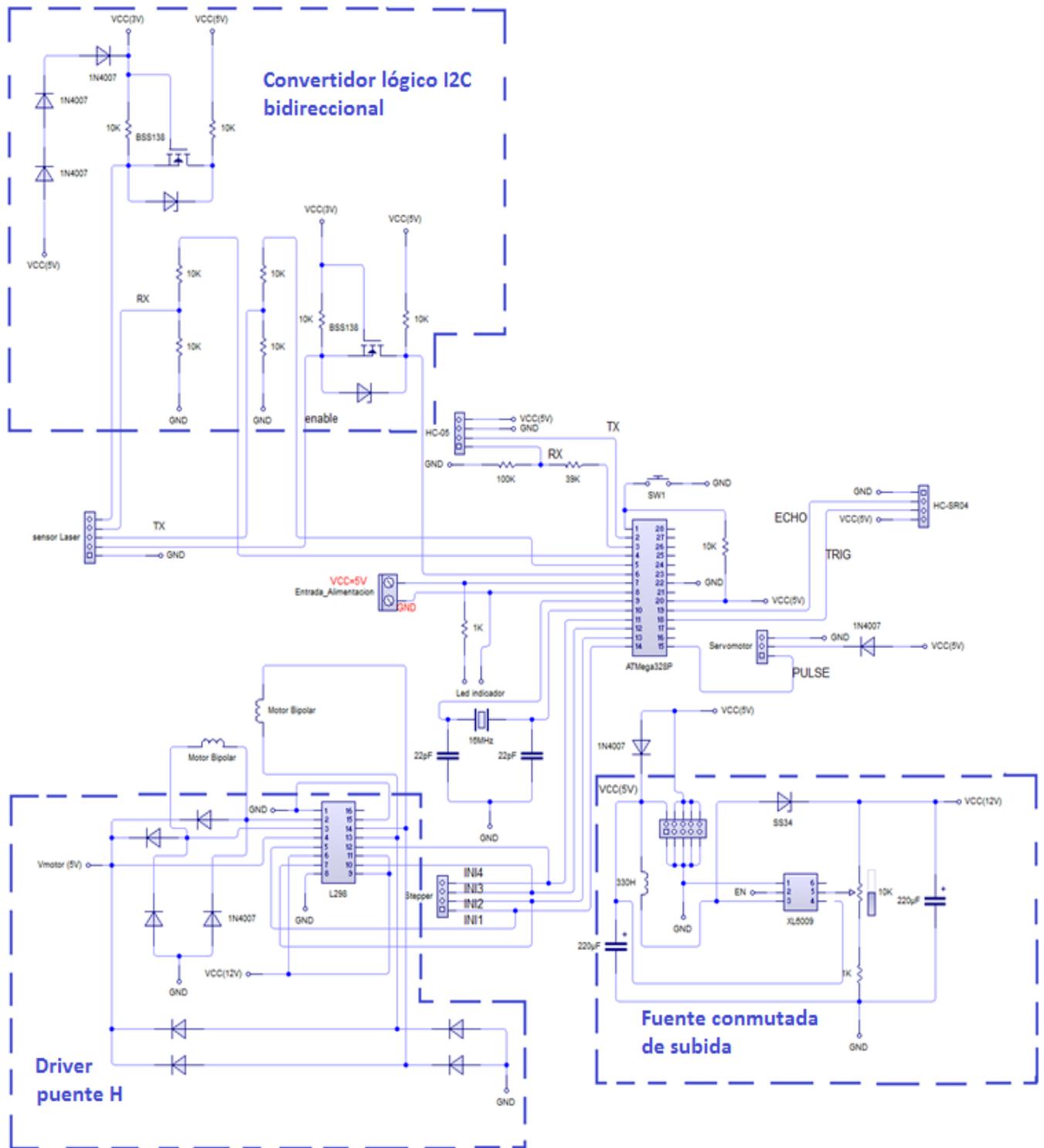
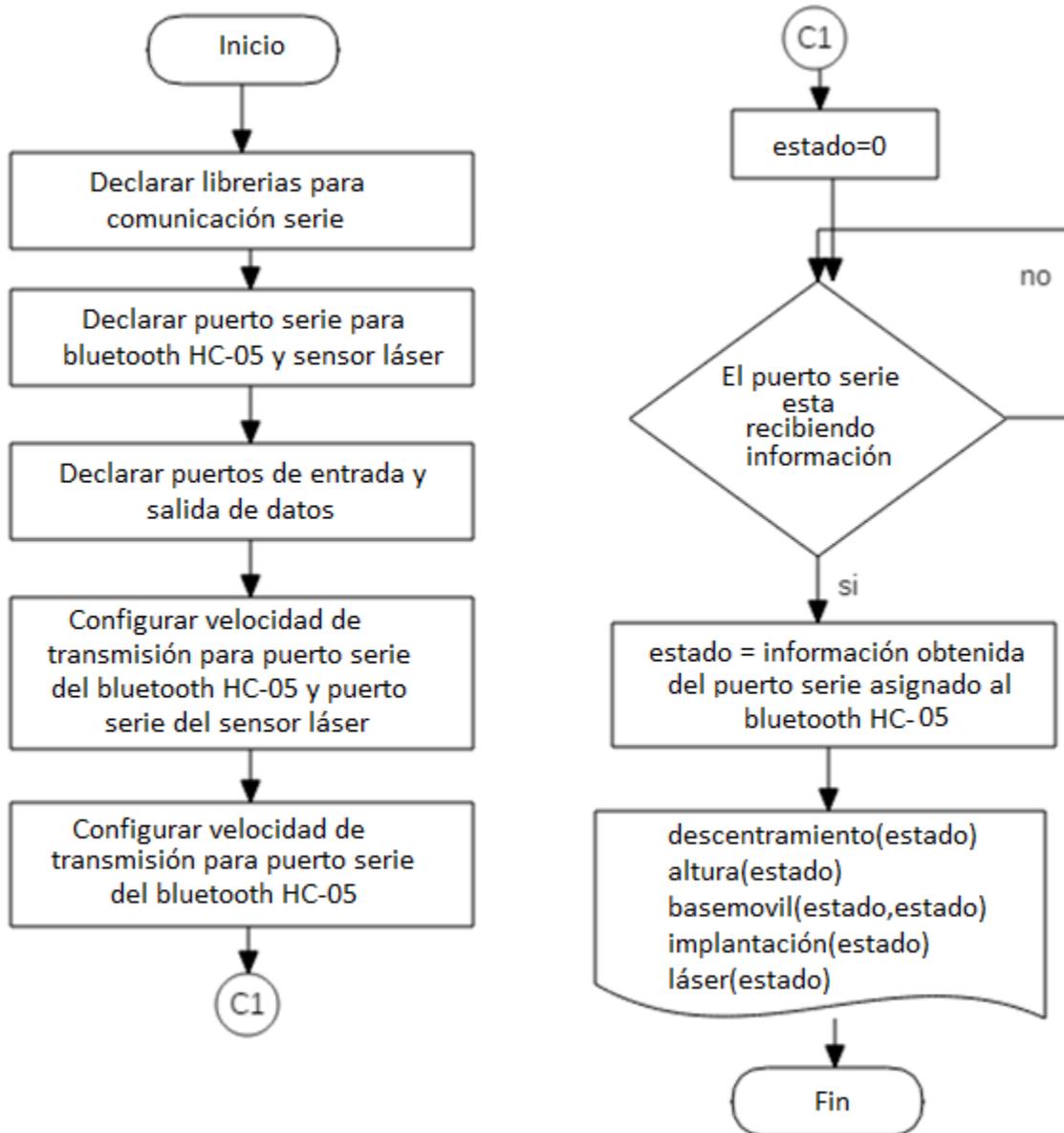


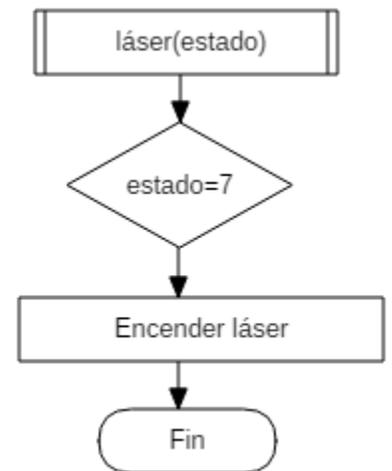
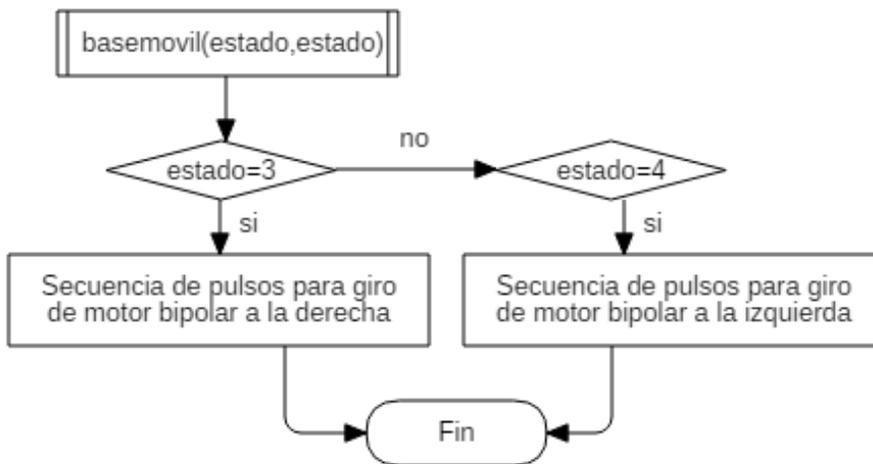
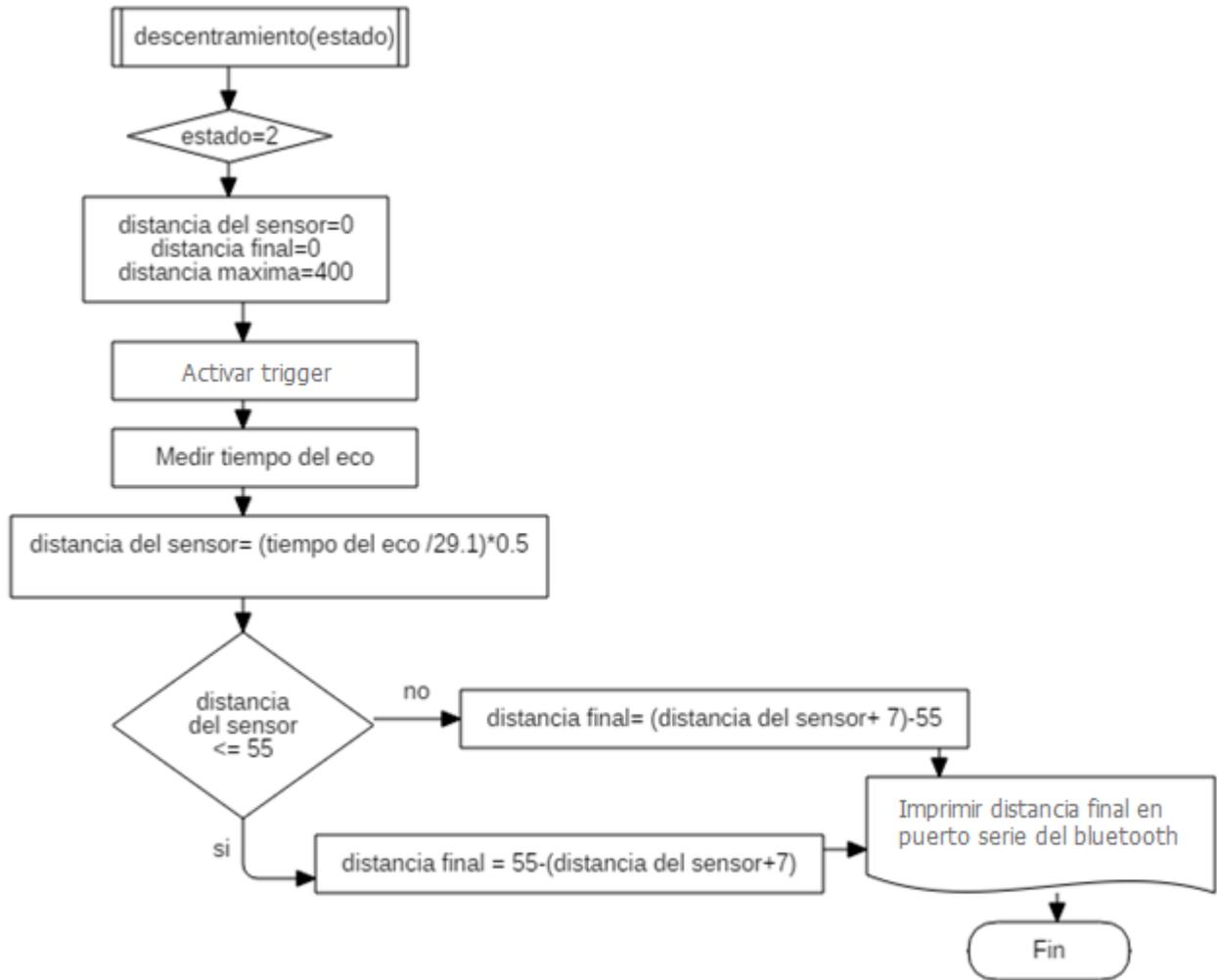
Figura 47. Diagrama de conexión

En los diagramas de flujo de las Figuras 48 y 49 se observa el algoritmo que siguen los dispositivos antes mencionados, así como la interconexión con la interfaz de usuario para lograr el enlace de la información obtenida de los sensores por medio de comunicación inalámbrica.

Es importante mencionar que tanto la medición de altura como la medición de implantación se obtienen por medio del sensor láser, por lo que el modo de operación está basado en el mismo algoritmo.

-Algoritmo de la plataforma de control





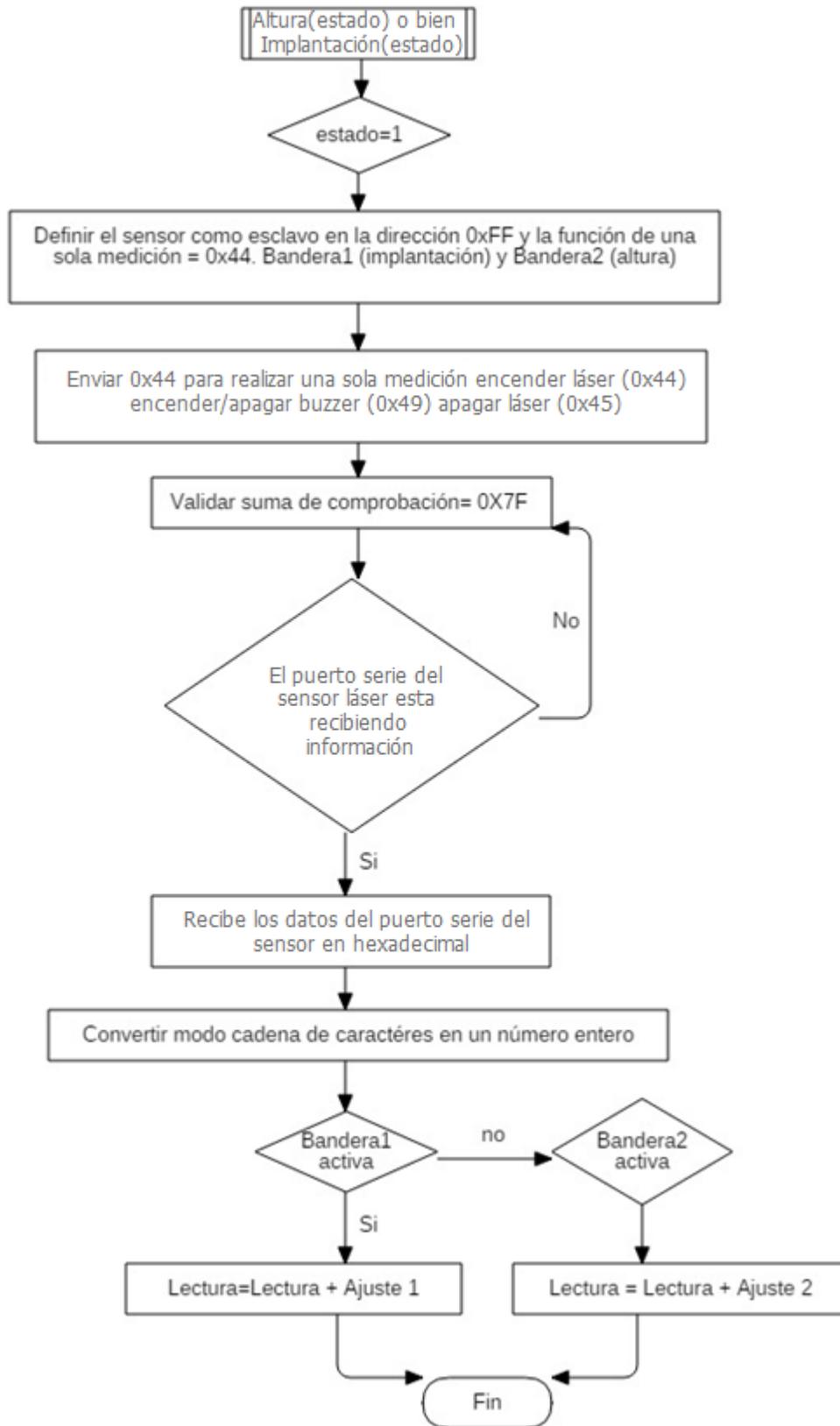
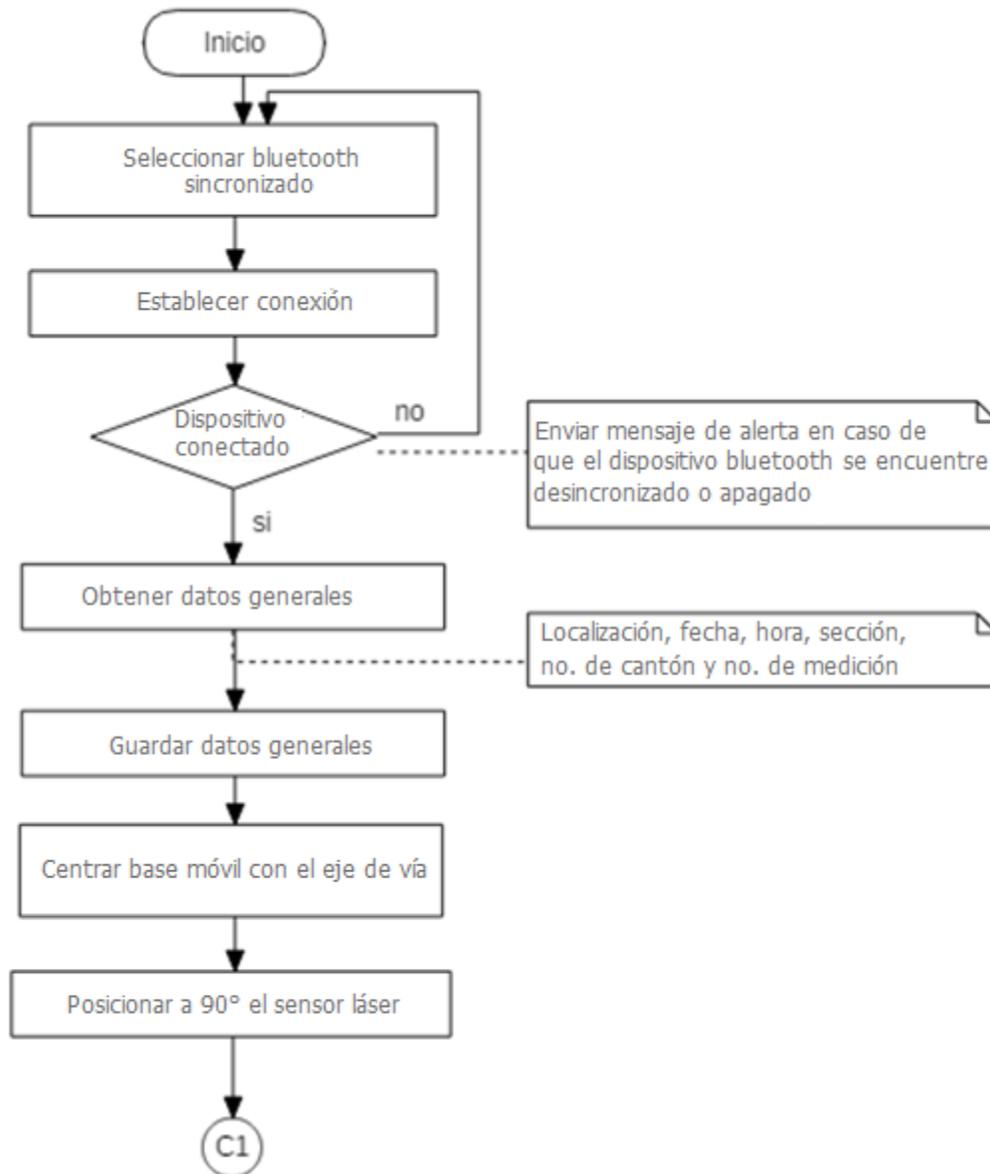
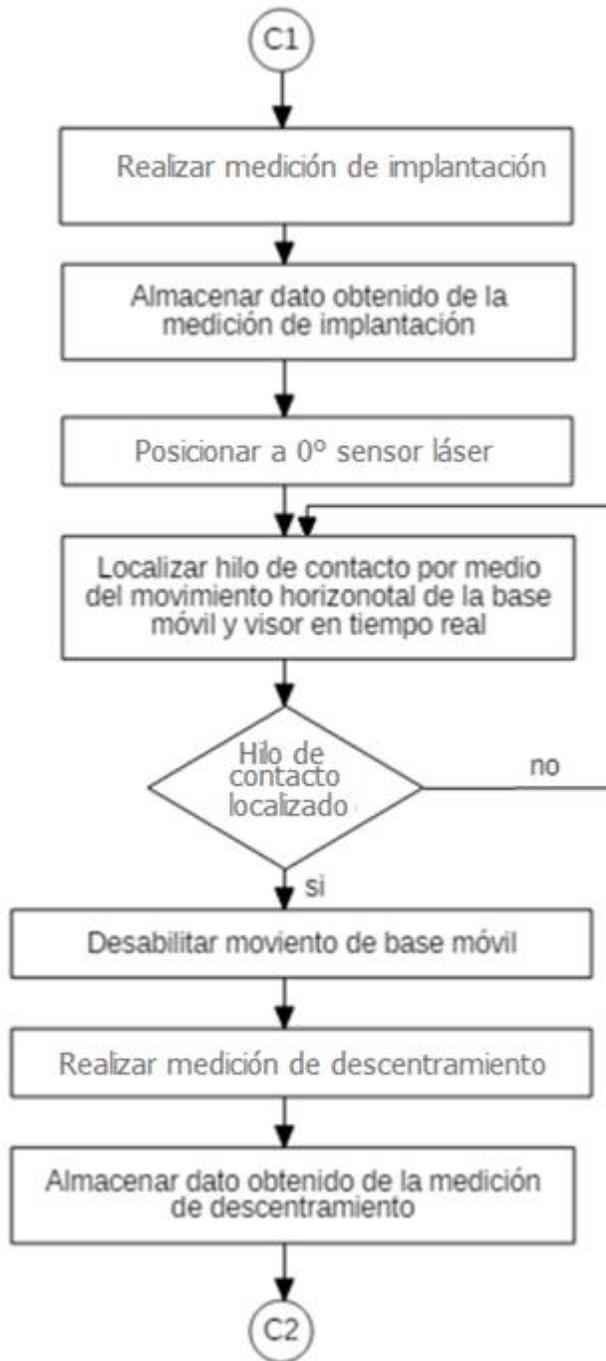


Figura 48. Algoritmo del microcontrolador

-Algoritmo de la interfaz de usuario





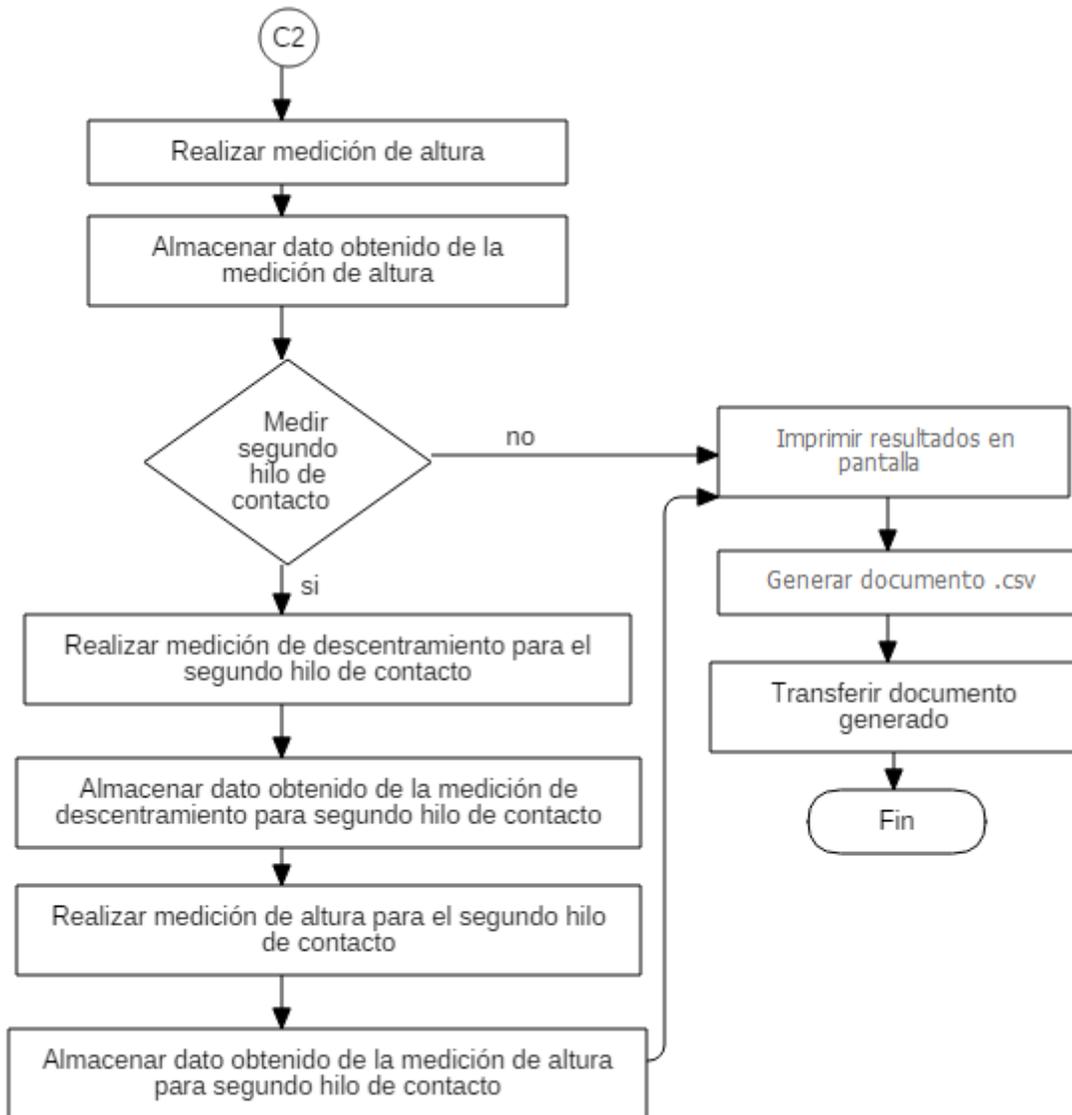


Figura 49. Algoritmo para el desarrollo de la aplicación Android

-Proceso de construcción

La estructura mecánica sobre la cual se coloca el sistema electrónico se fabricó sobre medida (Figura 50).

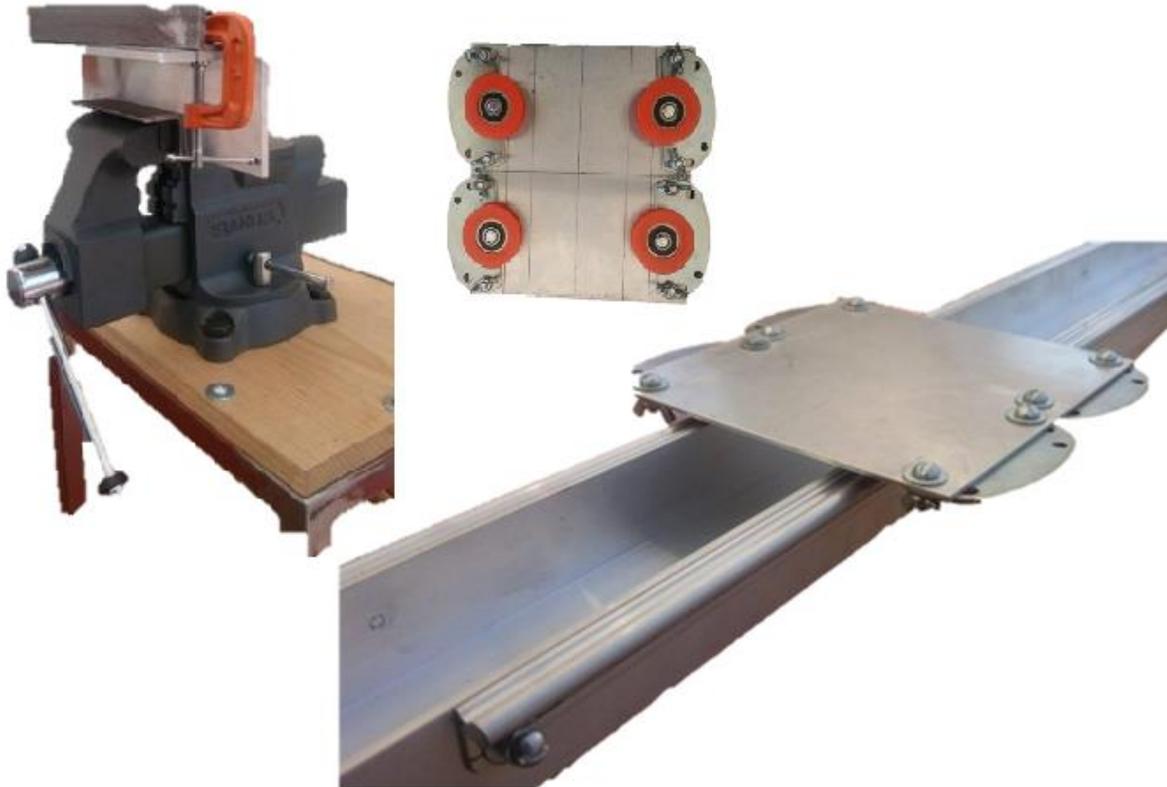


Figura 50. Fabricación de la estructura mecánica del prototipo de medición

Finalmente en la Figura 51 se observa la placa del circuito impreso utilizada para controlar el prototipo de medición.

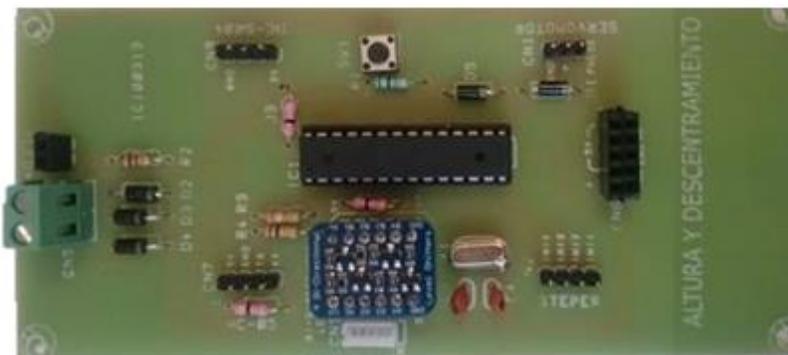


Figura 51. Circuito impreso del prototipo de medición

La conexión y el ensamble final del sistema de medición dan como resultado el producto de la *Figura 52*.

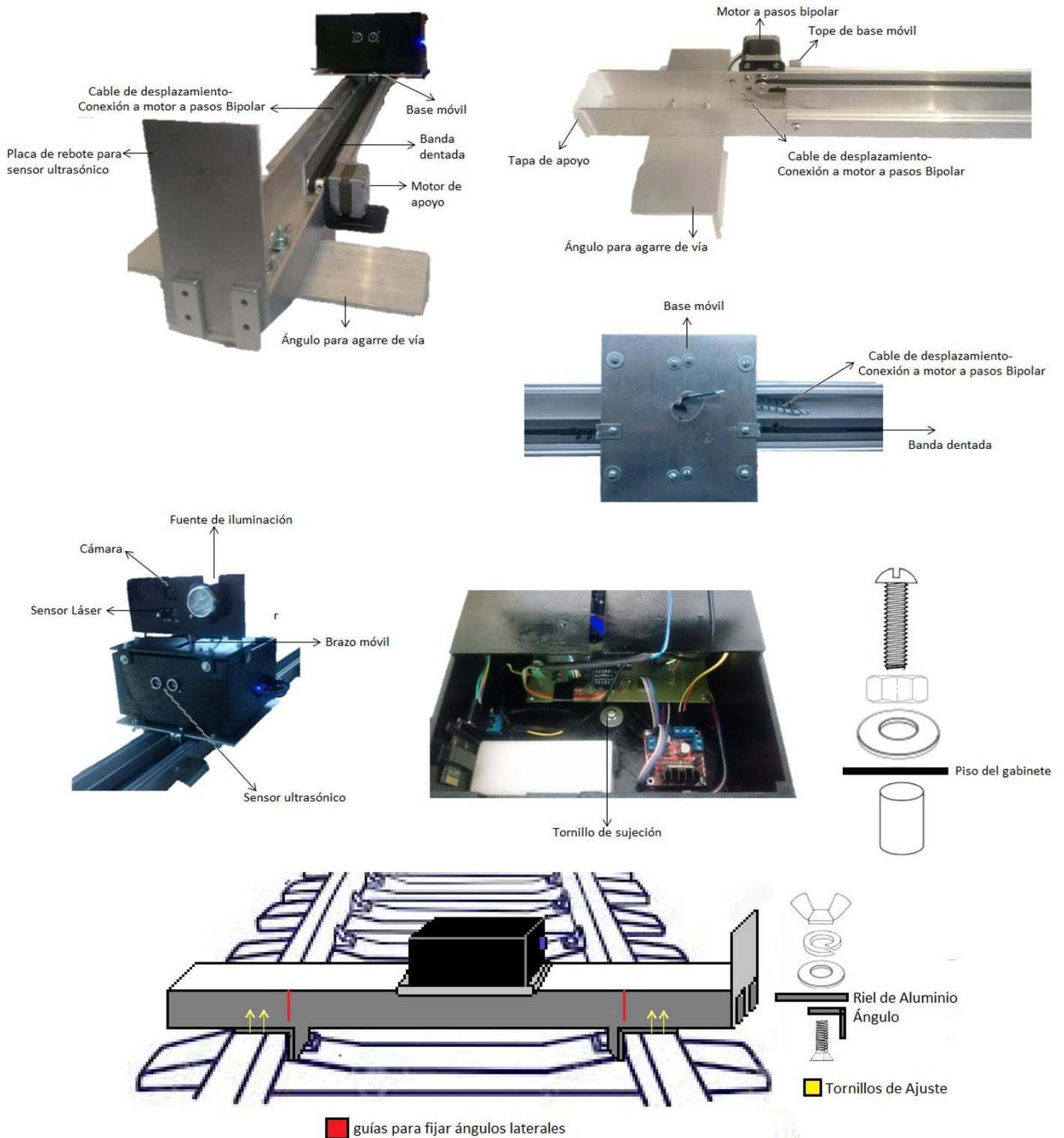


Figura 52. Ensamble del prototipo de medición

V. Resultados obtenidos

a) Proceso de calibración

La calibración es el conjunto de operaciones que establecen bajo condiciones específicas, la relación entre los valores de las magnitudes que indique un sistema de medición y los valores correspondientes a un patrón de referencia¹⁵.

El prototipo de medición, se calibró previamente contra un telémetro ABT4640-Laser Height & Stagger (Hilti PD-E Laser) el cual cuenta con las características mencionadas en la *Tabla 12*.

Tabla 12. Características del telémetro Hilti PD-E Láser para medición de altura y descentramiento

Descentramiento		Altura	
Resolución	Exactitud	Resolución	Exactitud
1mm	+/- 10mm @ 5m	0.1mm	+/- 3mm

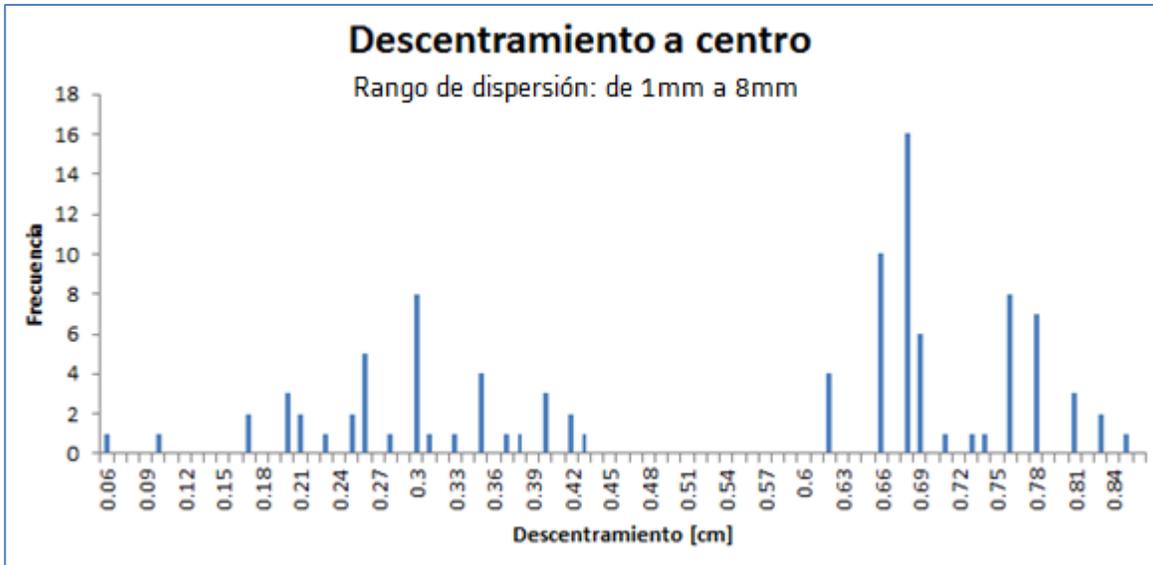
Los ajustes de compensación para mejorar la precisión del prototipo, se programaron internamente en el microcontrolador, de modo que el porcentaje de error (%E) fuera mínimo.

$$\%E = \frac{Lp - Lm}{Lp} * 100$$

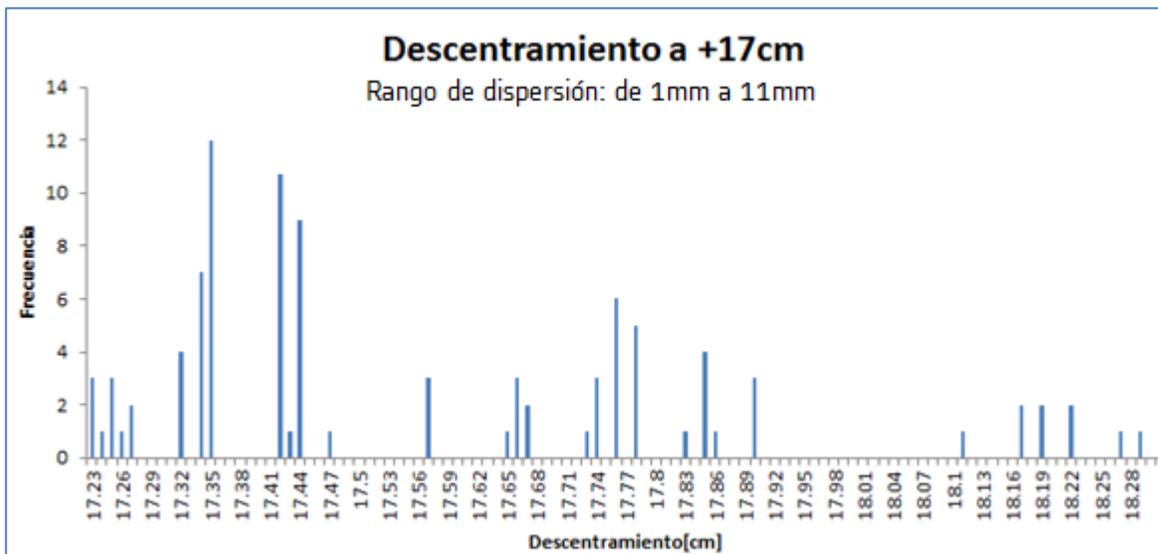
Donde “Lp” es la lectura patrón del telémetro y “Lm” la lectura medida del prototipo.

Las gráficas 1, 2, 3, 4 y 5 muestran los histogramas de dispersión en las mediciones obtenidas al calibrar el instrumento de medición.

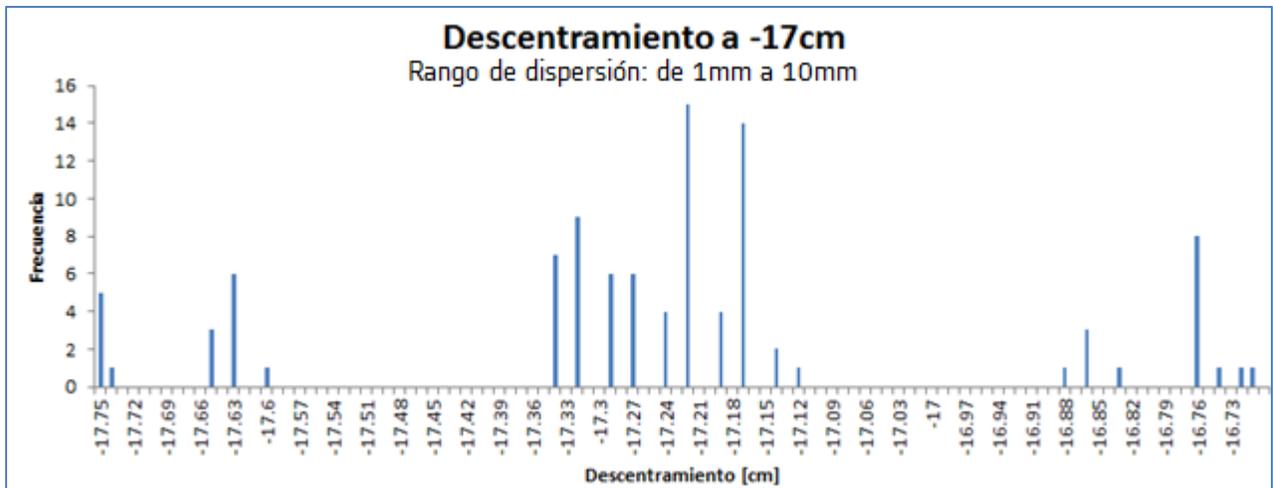
¹⁵ Grupo Distrimedics. Calibración <http://www.distrimedics.com/calibracion.html>



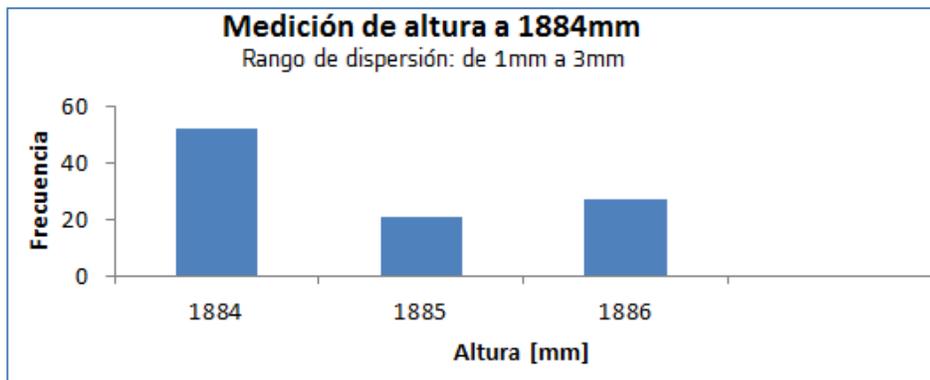
Gráfica 1. Sensor ultrasónico para medición de descentramiento al centro del eje de vía



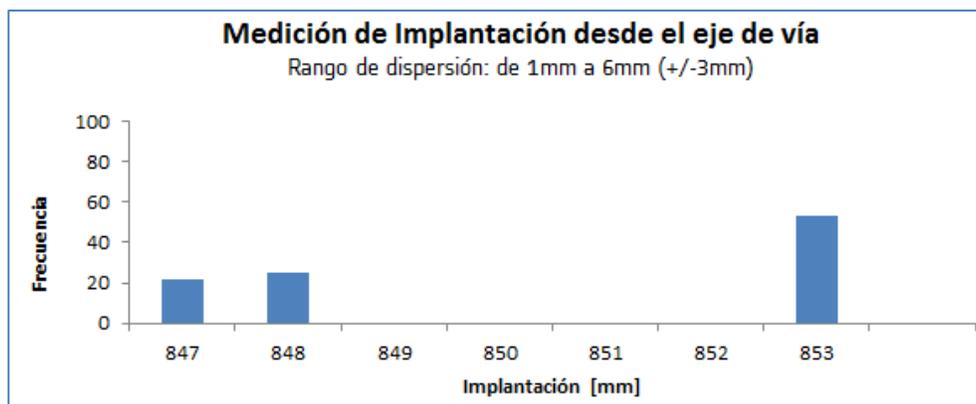
Gráfica 2. Sensor ultrasónico para medición de descentramiento a +17cm



Gráfica 3. Sensor ultrasónico para medición de descentramiento a -17cm



Gráfica 4. Sensor láser para medición de altura



Gráfica 5. Sensor láser para medición de implantación

La *Tabla 13* muestra los rangos de exactitud reales y el promedio de los porcentajes de error obtenidos de la calibración.

Tabla 13. Parámetros reales obtenidos de la calibración del prototipo de medición

Medición	Rango de exactitud	Porcentaje de error promedio
Altura	$\pm 10mm$	2.66%
Descentramiento	$\pm 3mm$	0.039%
Implantación	$\pm 3mm$	0.032%

Para asegurar la calidad del prototipo de medición, se realizó un estudio de repetibilidad y reproducibilidad, descrito en el apartado b) de esta sección.

A fin de que el lector comprenda mejor los conceptos del estudio realizado, se mencionarán las características principales de los equipos de medida según la norma ISO 9001¹⁶.

- Rango de medida

Define los valores mínimo o límite inferior y máximo o límite superior de lectura para los cuales el equipo ha sido diseñado.

- Alcance

Diferencia algebraica entre los valores superior e inferior del campo de medición del instrumento.

$$\text{Alcance} = \text{Valor máximo del rango} - \text{Valor mínimo del rango}$$

- Fondo de escala

Máximo valor que puede medir el instrumento o del que se obtiene lectura.

- Exactitud

Es la capacidad de un equipo de medida de dar un mensurando que se aproxime al verdadero valor de referencia de la magnitud medida. Para expresar esto, se indica el intervalo dentro del cual puede recaer el valor real o de referencia del mensurando.

- Precisión

Es la cualidad que caracteriza la capacidad del instrumento de medida para dar el mismo valor de magnitud al medir varias veces en unas mismas condiciones. Un instrumento con alta precisión asegura una baja dispersión en las lecturas obtenidas.

La *Figura 53* muestra la diferencia entre la precisión y la exactitud respecto a un valor de referencia.

¹⁶ Adolfo Hilario, Pablo J. Carbonell. Calibración de equipos de medida según ISO 9000 <http://www.eni.es/wp-content/uploads/items/6Calibraci%C3%B3n%20equipos%20de%20medida%20seg%C3%BAn%20ISO%209000.pdf>
International Organization for Standardization. ISO 9001:2015(es) <https://www.iso.org/iso-9001-quality-management.html>

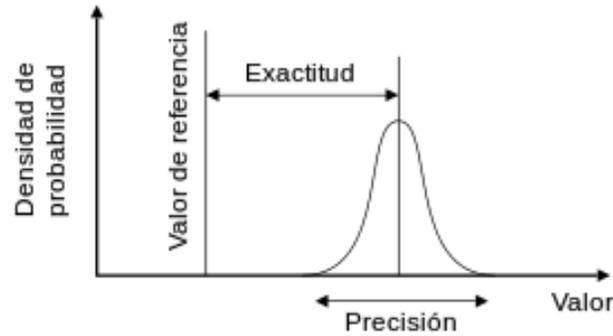


Figura 53. Circuito impreso del prototipo de medición

- Tolerancia

Define el máximo error esperado en cierto valor. Estrictamente hablando, no es una característica estática del instrumento de medida.

- Repetibilidad

Cercanía entre los resultados de mediciones sucesivas de la misma magnitud por medir, efectuadas en las mismas condiciones de medición. La *Figura 54* muestra el concepto de repetibilidad.

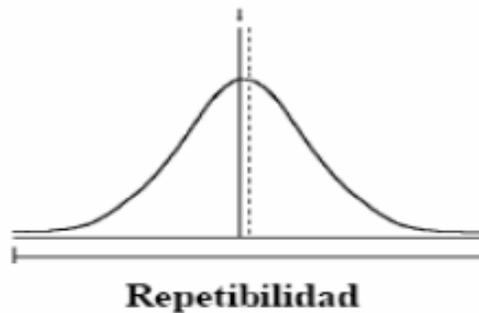


Figura 54. Representación gráfica del concepto de repetibilidad.

- Reproducibilidad

Cercanía entre los resultados de las mediciones de la misma magnitud por medir, efectuada bajo condiciones de medición diferentes, se producen cambios en las condiciones ambientales, en el observador, en la localización y ubicación o en los intervalos de medida. En la *Figura 55* se observa una representación gráfica del concepto de reproducibilidad.

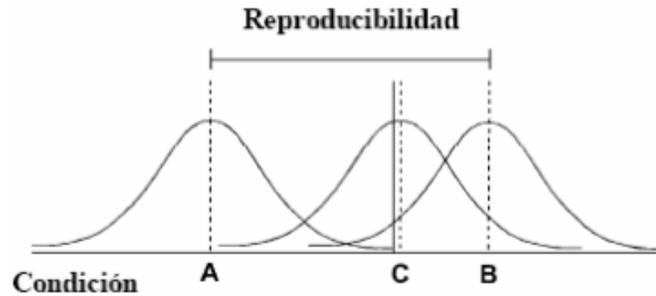


Figura 55. Representación gráfica del concepto de reproducibilidad.

- Desplazamiento

Un desplazamiento en la medida se produce cuando existe un error constante sobre todo el rango de medida. Este error generalmente puede ser eliminado por medio de un procedimiento de ajuste (ajuste de cero).

- Linealidad

Se produce cuando la lectura de los equipos de medida es proporcional a una curva de referencia. La no linealidad como se muestra en la Figura 56, es la máxima desviación de la curva característica definida por las lecturas obtenidas respecto a una línea de referencia.

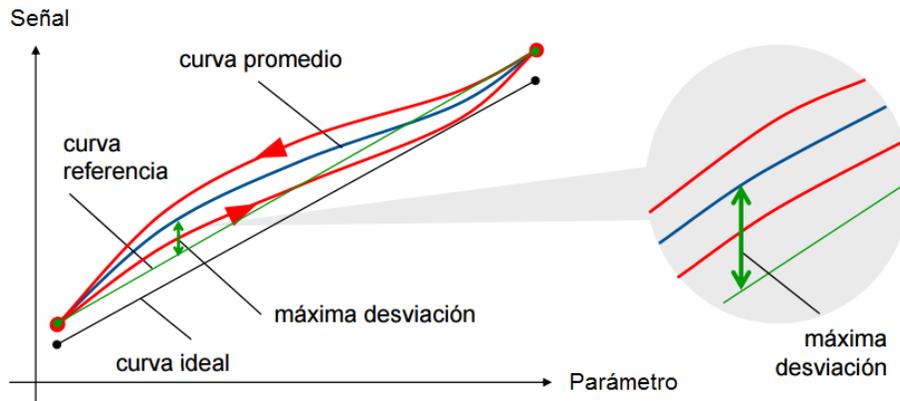


Figura 56. Representación gráfica de la no linealidad¹⁷

- Histéresis

Es la máxima diferencia que se observa en las lecturas obtenidas, para el mismo valor del campo de medida. Se observa cuando la variable recorre toda la escala del instrumento en dos sentidos: ascendente y descendente.

- Zona muerta

La zona muerta de un instrumento se define como el rango de entrada para el cual no se obtiene lectura en la salida.

¹⁷ ISA, Instrumentación básica de procesos industriales. <https://es.slideshare.net/mobile/tamapetem/6851050-cursoisapresentationinstrumentacionbasica>

b) Estudio de repetibilidad y reproducibilidad

Un estudio de repetibilidad y reproducibilidad de un sistema de medición permite investigar si la variabilidad del sistema de medición es pequeña en comparación con la variabilidad del proceso, también se puede conocer la variabilidad causada por diferencias entre operadores¹⁸.

Las ecuaciones utilizadas para llevar a cabo este procedimiento utilizando el método de promedios y rangos se enlistan en la Tabla 14.

Tabla 14. Ecuaciones para el método de promedios y rangos		
Parámetro	Descripción	Ecuación
\bar{X} Media aritmética	Valor más probable que se podría obtener a partir de un conjunto infinito de lecturas.	$\bar{X} = \sum \frac{Xi}{N}$
d Desviación máxima	Variación máxima de la lectura observada con respecto a la media aritmética.	$d = Xi - \bar{X}$
D Desviación promedio	Suma de los valores absolutos de la desviación dividida entre el número de lecturas.	$D = \sum \frac{ d }{N}$
S' Desviación estándar	Medida de dispersión en las lecturas obtenidas del instrumento de medición.	$S' = \sqrt{\frac{\sum d^2}{N - 1}}$
R Resolución	Permite conocer la capacidad del dispositivo para distinguir entre niveles discretos de una señal.	$R = \frac{SPAN}{bits\ de\ salida}$
$SPAN$ Alcance o Rango	Diferencia entre el valor del límite superior y el valor del límite inferior medido por el instrumento.	$SPAN = Lsup - Linf$
H Histéresis	Diferencia entre el valor medido desde el rango mínimo hasta posición deseada y el valor medido desde el rango máximo hasta la posición deseada dividido entre el alcance.	$H = \frac{Vmrm - VmrM}{alcance}$
\bar{R} Rango promedio de cada operador	Suma de las mediciones realizadas por cada operador dividida entre el número total de mediciones.	$\bar{R} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Ri$
$\bar{\bar{R}}$ Rango promedio de todos los rangos	Suma del rango promedio de cada operador dividida entre el número de operadores.	$\bar{\bar{R}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \bar{R}i$

¹⁸ Universidad Tecnológica de Pereira. Estudio de repetibilidad y reproducibilidad utilizando el método de promedios y rangos para el aseguramiento de la calidad de los resultados de calibración de acuerdo con la norma técnica NTCISO/IEC 17025, págs.455-460.

Parámetro	Descripción	Ecuación
\overline{Xop} Medición promedio de cada operador	Valor más probable que se podría un operador a partir de un conjunto infinito de lecturas para "r" dispositivos en "n" número de ensayos	$\overline{Xop} = \frac{1}{nr} \sum_{i=1}^n Xi$
\overline{XD} Rango de la medición promedio	Diferencia entre el valor del límite superior y el valor del límite inferior de la medición promedio de cada operador.	$\overline{XD} = Ximáx - Ximín$
%Rpr Porcentaje de Reproducibilidad	K2 es una constante que depende del número operadores (Ver Tabla15).	$\%Rpd = \frac{\sqrt{(K2 * \overline{XD})^2 - \frac{(K1 * \overline{R})^2}{nr}}}{T} * 100$
%Rpt Porcentaje de Repetibilidad	Rango promedio de todos los rangos multiplicado por una constante que depende del número de ensayos realizados por cada operador (Ver Tabla15), dividido entre la tolerancia	$\%Rpt = \frac{K1 * \overline{R}}{T} * 100$
%Rpt&%Rpr Porcentaje de la relación entre la repetibilidad y la reproducibilidad	Parámetro utilizado como criterio para comprobar que un sistema de medición es aceptable.	$\%Rpt\&\%Rpr = \sqrt{(\%Rpt)^2 + (\%Rpr)^2}$

La Tabla 15 muestra el valor de las constantes K1 y K2 de acuerdo al método de promedios y rangos utilizado en el "Estudio de repetibilidad y reproducibilidad utilizando el método de promedios y rangos para el aseguramiento de la calidad de los resultados de calibración de acuerdo con la norma técnica NTCISO/IEC 17025" que realizó la Universidad Tecnológica de Pereira.

Tabla 15. Relación de constantes para el cálculo del porcentaje de repetibilidad y reproducibilidad				
No. de ensayos	2	3	4	5
K1	4.56	3.05	2.50	2.21
No. de operadores	2	3	4	5
K2	3.65	2.70	2.30	2.08

La Tabla 16 muestra los resultados obtenidos para cinco operadores diferentes.

Tabla 16. Características principales del prototipo de medición			
Mensurando	<i>Implantación</i>	<i>Descentramiento</i>	<i>Altura</i>
Medida	mm	cm	mm
Rango del instrumento	de 2187 a 3000	+/-35	de 4300 a 5500
Media Aritmética	2354.16	12.34	4126.88
Desviación	2	0.25	2
Desviación promedio	0.47	0.06	0.32
Desviación estándar	0.62	0.07	0.49
Error de medición	0.25	1.25	0.08
Resolución	1.25	2.5	1.25
Histéresis	0.6	0.0065	0.1
%Repetibilidad	0.37	1.55	0.37
%Reproducibilidad	2.77	3.38	2.07
%Porcentaje de la relación entre la repetibilidad y la reproducibilidad	2.79	3.72	2.11

Analizando los resultados podemos decir que el prototipo de medición es un sistema aceptable según los criterios de la *Tabla 17* donde se muestra la variación del porcentaje de la relación entre la repetibilidad y la reproducibilidad de acuerdo al método utilizado.

Criterio	Descripción
$\%Rpt\&Rpr < 15\%$	El sistema de medición es aceptable
$16\% < \%Rpt\&Rpr < 25\%$	El sistema de medición puede ser aceptable según su uso, aplicación, costo del instrumento de medición y costo de reparación.
$\%Rpt\&Rpr > 25\%$	El sistema de medición es considerado como no aceptable y requiere mejoras en cuanto al operador, equipo, método, condiciones, etc.

Tabla 17. Evaluación del porcentaje de la relación entre la repetibilidad y la reproducibilidad⁶

Si la repetibilidad es mayor a la reproducibilidad las posibles causas son: el instrumento necesita mantenimiento, el equipo requiere ser rediseñado para ser más rígido, el montaje o ubicación donde se efectúan las mediciones necesita ser mejorado y/o, existe una variabilidad excesiva entre las partes.

Si la reproducibilidad es mayor que la repetibilidad las causas pueden ser: el operador necesita mejor entrenamiento en cómo utilizar y como leer el instrumento, la indicación del instrumento no es clara, no se han mantenido condiciones de reproducibilidad y/o el instrumento de medición presenta deriva.

c) Cotización de Materiales

En la Tabla 18 se observa la lista de materiales propuesta para la construcción del prototipo de medición.

Tabla 18. Desglose de Materiales		
<i>Material electrónico</i>		
Material	Precio	Proveedor
módulo bluetooth HC-05	\$ 150.00	Kinetronica
motor a pasos unipolar	\$ 703.00	330ohms
circuito integrado LM298N	\$ 50.00	El último recurso
fuentes conmutada	\$ 45.00	Mercado libre
servomotor 2.2kg	\$ 137.00	AG electrónica
microcontrolador y componentes pasivos	\$ 200.00	El último recurso
sensor ultrasónico	\$ 56.00	Kinetronica
sensor láser	\$ 3,424.92	Egismos Technology Corporation
convertidor de voltaje	\$ 145.00	330ohms
circuito impreso con recubrimiento	\$ 417.60	Herkits – Geekstore
lámpara led	\$ 299.00	Mercado libre
batería recargable	\$ 550.00	Mercado libre
cámara	\$ 649.00	Mercado libre
<i>Material mecánico</i>		
Material	Precio	Proveedor
riel de aluminio	\$ 573.00	Metales Díaz
ángulo de aluminio	\$ 340.00	Metales Dávalos
carretillas con guía	\$ 367.00	La Casa del Herrero
banda dentada y poleas	\$ 502.00	Mercado libre
tornillería	\$ 200.00	La casa del tornillo
<i>Soportes especiales</i>		
Material	Precio	Proveedor
soporte universal para servomotor	\$ 89.00	Sanher Universal
escuadras	\$ 30.00	Electrónica Estudio
brazo de aluminio para servomotor	\$ 59.00	Sanher Universal
ángulos largos	\$ 32.00	Cosas de Ingeniería
piezas en impresión 3D	\$ 359.99	330 ohms
base para sensor ultrasónico	\$ 46.00	Kinetronica
soportes para motor a pasos	\$ 198.00	Mercado libre
TOTAL	\$9,622.51	

VI. Conclusiones

Con base en los criterios de diseño establecidos por el cliente y con ayuda del estudio realizado para el análisis de los datos obtenidos, se puede concluir que el prototipo diseñado cumple con el objetivo planteado.

El estudio de repetibilidad y reproducibilidad muestra que la variabilidad del sistema de medición respecto a la variabilidad del proceso y del operador que manipula el instrumento es aceptable.

La importancia de obtener mediciones lo más precisas y exactas en conjunto con una interfaz amigable para el usuario, resulta una propuesta altamente competitiva con relación a los dispositivos existentes en el mercado, los cuales además de tener un costo elevado entregan las mediciones finales en una pantalla digital sin permitir la transferencia electrónica de los datos obtenidos, el posicionamiento del láser sobre el hilo de contacto se hace manualmente por el operador y no permiten configurar las referencias del sitio de medición ni obtener su localización geográfica.

Por otra parte, el prototipo de medición diseñado con el objetivo de conocer la geometría de la catenaria a lo largo de la instalación, resuelve las siguientes cuestiones:

- Mejora la técnica para efectuar la medición de altura y descentramiento.
- Optimiza el tiempo en que se efectúan las mediciones.
- Proporciona mayor precisión en las mediciones y disminuye los errores provocados por el operador al instalar el instrumento.
- Permite el registro, almacenamiento y transferencia de mediciones consecutivas de manera electrónica, es decir sin intervención del operador.
- Clasifica cada medición de forma ordenada estableciendo fecha, hora, lugar, número de cantón, número de medición y sección.
- Localiza mediante GPS el sitio sujeto de medición y obtiene referencias multimedia (videos y fotografías).

De manera general el sistema proyectado contribuye al mantenimiento y construcción del sistema de alimentación de trenes para transporte de personas, por lo que se puede considerar benéfico para la sociedad.

El planteamiento de propuestas factibles, la toma de decisiones y el análisis de resultados, son un conjunto de criterios profesionales que me permitieron llevar el proyecto a buenos términos, ya que por su diseño versátil, el instrumento de medición funciona en cualquier dispositivo con sistema operativo Android, puede ser calibrado en la programación interna del microcontrolador, es amigable con el medio ambiente y el control del mismo se efectúa de forma inalámbrica.

Finalmente la implementación de este prototipo me permitió integrar conocimientos adquiridos durante mi formación, tales como el uso de microcontroladores y sistemas embebidos, diseño circuitos impresos, análisis de circuitos, dinámica del sistema mecánico, aplicación de conceptos de medición e instrumentación, entre otros. Así también, me fue posible adentrarme en la investigación de posibles soluciones y adquirir de esta forma nuevas herramientas para resolver las problemáticas suscitadas durante el proceso de construcción.

VII. Bibliografía

F. Kiessling; R.Puschmann; A. Schmieder.. (2001). Contact Lines for Electric Railways (Planning-Design-Implementation). Alemania, Munich: Publicis - SIEMENS.

SNCF. (1971). Technologie ferroviaire: Traction électrique. France, Paris: Union Parisienne d'imprimeries.

Características mecánicas de la catenaria simple y normal
Octavio Lomelí Escobar, Ángel David Chávez González. (2013). Características y Constitución de las Líneas Aéreas de Contacto. En Manual Para La Formación de Técnicos en Catenaria (63). Ciudad de México: STCM.

SNCF. (1961). Manuel des principes d'équipements et du matériel des lignes caténares à courant continu 1500 volts. France, Paris: Union Parisienne d'imprimeries.

GEISMAR. (2010). Catenary tools. France, Paris: Société des anciens établissements L.GEISMAR.

Instrumentos WIKA. (2008). Tipos de Sensores para la medida de presión Cálculo de Precisiones. Febrero 2017, de Instrumentos WIKA, S.A. Sitio web: <http://www.ugr.es/~jttcia/2008/ponencias%20II%20jornadas/WIKA.pdf>

HERRAMIENTAS TECNOLÓGICAS PROFESIONALES. (Enero 2017). Sensor ultrasónico HC-SR04. Abril 2017, de HET-PRO Sitio web: <https://www.hetpro-store.com/TUTORIALES/sensor-de-distancia->

Egismos Opto Electronics. (Enero 2017). Laser Measuring & Optoelectronics. Febrero 2017, de Egismos Technology Corporation Sitio web: <http://www.egismos.com/laser-measuring-optoelectronics-module.html>

Uriel Méndez. (Febrero 2016). Motores a pasos... ¿unipolares o bipolares? Octubre 2016, de 330ohms Sitio web: <https://www.330ohms.com/blogs/blog/112837444-que-son-los-servomotores>

HERRAMIENTAS TECNOLÓGICAS PROFESIONALES. (Enero 2017). Módulo Puente H L298H. Enero 2017, de HET-PRO Sitio web: <https://hetpro-store.com/modulo-puente-h-l298n-para-control-de-motores/>

Uriel Méndez. (Marzo 2016). ¿Qué son los servomotores? Febrero 2017, de 330ohms Sitio web: <https://www.330ohms.com/blogs/blog/112837444-que-son-los-servomotores>

Jesús Rubén Santa Anna Zamudio. (Febrero 2014). Bluetooth HC-05 y HC-06 Tutorial de Configuración. Diciembre 2016, de Geek Factory Sitio web: <http://www.geekfactory.mx/tutoriales/bluetooth-hc-05-y-hc-06-tutorial-de-configuracion/>

Arduino. (2017). From Arduino to a Microcontroller on a Breadboard. Enero 2017, de Arduino Sitio web: <https://www.arduino.cc/en/Tutorial/ArduinoToBreadboard>

MIT App Inventor. (2015). Tutorials for App Inventor. Septiembre 2016, de MIT App Inventor Sitio web: <http://appinventor.mit.edu/explore/ai2/tutorials.html>

Grupo Distrimedics. (2014). Calibración. Febrero 2017, de Distrimedics Sitio web: <http://www.distrimedics.com/calibracion.html>

Adolfo Hilario, Pablo J. Carbonell. (2013). Calibración de equipos de medida según ISO 9000. Febrero 2017, de Dirección de CEA-IFAC Sitio web: <http://www.eni.es/wp-content/uploads/items/6Calibraci%C3%B3n%20equipos%20de%20medida%20seg%C3%BAn%20ISO%209000.pdf>

International Organization for Standardization. (2015). ISO 9001:2015(es). Febrero 2017, de International Organization for Standardization Sitio web: <https://www.iso.org/iso-9001-quality-management.html>

Universidad Tecnológica de Pereira. (Agosto 2007). Estudio de repetibilidad y reproducibilidad utilizando el método de promedios y rangos para el aseguramiento de la calidad de los resultados de calibración de acuerdo con la norma técnica NTCISO/IEC 17025. Scientia et Technica, No. 35, 455-460.

Minitab 17. (2016). ¿Qué es un estudio R&R del sistema de medición (repetibilidad y reproducibilidad)?. Febrero 2017, de Minitab Sitio web: <http://support.minitab.com/es-mx/minitab/17/topic-library/quality-tools/measurement-system-analysis/gage-r-r-analyses/what-is-a-gage-r-r-study/>