



UNIVERSIDAD  
DE PIURA

REPOSITORIO INSTITUCIONAL  
PIRHUA

# DESARROLLO DE UN SISTEMA RF PARA MONITOREAR LA FUERZA EN UNA MORDAZA INDUSTRIAL

Alvaro Vásquez-Palacios

Piura, mayo de 2019

FACULTAD DE INGENIERÍA

Departamento de Ingeniería Mecánico-Eléctrica

Vásquez, A. (2019). *Desarrollo de un sistema RF para monitorear la fuerza en una mordaza industrial* (Tesis para optar el título de Ingeniero Mecánico-Eléctrico). Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Mecánico-Eléctrica. Piura, Perú.



Esta obra está bajo una licencia

[Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

[Repositorio institucional PIRHUA – Universidad de Piura](https://repositorio.institucional.pirhua.edu.pe/)

**UNIVERSIDAD DE PIURA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA  
MECÁNICO ELÉCTRICA**



**Desarrollo de un sistema RF para monitorear la fuerza en una mordaza industrial**

**Tesis para optar el Título de  
Ingeniero Mecánico-Eléctrico**

**Alvaro Horacio Vásquez Palacios**

**Asesor: Dr. Ing. Edilberto Vásquez Díaz**

**Piura, mayo 2019**



A mi madre y consejera, Roxana.  
A mi padre y principal asesor, Edilberto.  
A mi abuela Graciela y mi tía Rosa, por sus consejos y oraciones.  
A mis hermanos, Roxana, Sergio, Celeste, Sol María y Joaquín,  
de quienes he aprendido más de lo que les he enseñado.  
A Víctor Chumán y Luis Paiba, sin su ayuda, amistad y confianza  
no hubiese salido adelante en este nuevo reto.



## Prefacio

Actualmente, con el fin de ser más eficientes y más productivos, la industria metal mecánica empieza a exigir el control, monitoreo y supervisión de sus procesos de fabricación. Para cumplir con estos requerimientos se hace necesario la instalación de sensores y actuadores en máquinas y herramientas, que no necesariamente tienen que ser automatizadas, sino que también pueden ser operadas de forma manual.

Implementar una gran cantidad de sensores y actuadores en máquinas y herramientas, para monitorear los procesos de fabricación genera un alto flujo de información, por lo tanto, se requiere un manejo óptimo de la transmisión de los datos. La tendencia actual, por la facilidad de manipulación e instalación en sensores y actuadores, es utilizar dispositivos electrónicos inalámbricos para la transmisión de la información; Esto implica desarrollar dispositivos diseñados y construidos con electrónica especial (*Low Energy*) y utilizar protocolos inalámbricos de bajo consumo de energía.

Apostando por las nuevas tendencias en la industria la empresa ALLMATIC-Jakob Spannsysteme GmbH, dedicada al diseño y fabricación de mordazas. empezó a desarrollar proyectos de automatización y de adquisición de datos para sus productos. Uno de los proyectos es un medidor de fuerza de sujeción para sus mordazas, *clamp assist*, desarrollado en colaboración con la empresa Tecnotron Elektronik GmbH. Sin embargo, el proyecto al desarrollarse bajo una filosofía de diseño cerrado, no cumple con los requerimientos que exige la industria actual, como son: diseño ágil, seguridad, integración en una pirámide de automatización y facilidad en la adquisición de datos. Por lo tanto, la empresa decidió desarrollar su propio *clamp assist* con el fin de adquirir *know how* y un producto que se adapte perfectamente a sus necesidades.

La tesis expone el desarrollo de un nuevo *clamp assist* para la empresa Allmatic, con una filosofía de diseño diferente y tecnología más actual. Gracias a un diseño ágil, un desarrollo heurístico y una filosofía modular del sistema, se ha podido instalar el prototipo, en tiempo record, no solo en mordazas propias, sino también en mordazas para un cliente externo. El desarrollo de esta tecnología representa una clara ventaja competitiva para la empresa Allmatic.

El proyecto se realizó gracias a la confianza y asesoramiento constante del Ing. Luis Enrique Paiba Samamé, Ing. Victor Chumán Alvarado y el Dr. Edilberto Vásquez Díaz, quienes con su experiencia ayudaron a terminar con éxito el proyecto.



## Resumen

En el siguiente trabajo se describen las etapas que se siguieron en el diseño y construcción de un sistema de medición de fuerza remoto, *clamp assist*, para las mordazas fabricadas por la empresa alemana ALLMATIC-Jakob Spannsysteme GmbH. El objetivo principal del diseño es que cumpla con las exigencias de la industria actual: modularidad, seguridad, bajo consumo energético y de arquitectura abierta. Así como los requerimientos de factor de forma para su instalación, sin perder de vista el diseño ágil y reusable, con el fin de que este proyecto sirva como base para otros.

Primero se analiza el *clamp assist* que en la actualidad viene instalado en las mordazas de Allmatic, con el fin de estudiar las partes del sistema y determinar las mejoras necesarias al sistema actual; luego, se examina el sistema físico de la mordaza para el diseño y construcción de una celda de carga que se utiliza como sensor de fuerza. Posteriormente se estudia la tecnología electrónica disponible para el desarrollo del sistema de medición y de comunicación. Finalmente se diseña y construye un prototipo *Clamp Assist*.

El desarrollo de esta tesis permitió también la implementación de un laboratorio de electrónica en Allmatic, así como la posibilidad de desarrollo de nuevos proyectos para otras empresas del sector industrial de máquinas herramientas y CNC.



## Tabla de contenido

<b>Capítulo 1 Descripción del problema .....</b>	<b>1</b>
1.1. Problemas con el sistema actual.....	3
1.2. Objetivos y alcances de la solución .....	6
<b>Capítulo 2 Estado del arte .....</b>	<b>9</b>
2.1. Medición de fuerza con strain gauge .....	9
2.1.1. Configuraciones para medición: Puente Wheatstone.....	9
2.1.2. Acondicionamiento de la señal de medición.....	13
2.2. Microcontroladores .....	14
2.3. Comunicación de los microcontroladores .....	22
2.3.1. Protocolo SPI (Serial Peripheral Interface).....	22
2.3.2. Protocolo I2C (Inter-Integrated Circuit) .....	24
2.3.3. Bluetooth 5.0 .....	24
2.4. Sistemas embebidos. ....	26
<b>Capítulo 3 Solución propuesta e implementación .....</b>	<b>29</b>
3.1. Medición de fuerza.....	29
3.1.1. Sensor .....	29
3.1.2. Acondicionador – Transmisor .....	35
3.2. Sistema embebido: Hardware y software.....	40
3.2.1. Descripción del hardware del prototipo .....	40
3.3. Descripción del software de programación del Prototipo .....	51
<b>Capítulo 4 Pruebas de funcionamiento.....</b>	<b>55</b>
4.1. Resultados de Hardware.....	55
4.2. Pruebas de medición de fuerza.....	59

4.3. Pruebas de comunicación.....	63
<b>Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>69</b>
<b>Referencias bibliográficas.....</b>	<b>71</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>73</b>
Anexo 1. Esquema BLE-Platine .....	75
Anexo 2. Esquema Messplatine.....	77

## Lista de tablas

Tabla 1.	Diferencias strain gauges 350 $\Omega$ y 1000 $\Omega$ .....	35
Tabla 2.	Valores de $R_{sg}$ y $C_{load}$ .....	38
Tabla 3.	Resultados experimentales.....	62



## Lista de figuras

Figura 1.	Mordaza de tipo LC 125. ....	1
Figura 2.	Allmatic clamp assist. ....	1
Figura 3.	Montaje del clamp assist dentro del spindle. ....	2
Figura 4.	Clamp Assist. ....	2
Figura 5.	Antena de Clamp Assist. ....	3
Figura 6.	Husillo dentro de la mordaza. ....	3
Figura 7.	Esquema de funcionamiento interno de una mordaza ....	4
Figura 8.	Clamp Assits Titan. ....	4
Figura 9.	Clamp assist - Módulo desarrollado por Tecnotron. ....	5
Figura 10.	Prueba de perpendicularidad. ....	5
Figura 11.	Husillo (Spindle). ....	5
Figura 12.	Dispositivo para colocar el clamp assist. ....	5
Figura 13.	Calibración de Clamp Assist. ....	6
Figura 14.	Curva de deformación. ....	10
Figura 15.	Puente Wheatstone. ....	11
Figura 16.	Un cuarto de puente Wheatstone. ....	12
Figura 17.	Medio puente Wheatstone. ....	12
Figura 18.	Puente Wheatstone completo. ....	12
Figura 19.	Sistema de acondicionamiento de señal. ....	13
Figura 20.	Time Digital Converter (TCD). ....	14
Figura 21.	MCU mbed LPC1768 ....	15
Figura 22.	Esquema del uso AT86RF231 ....	15
Figura 23.	MCU EFR32xG1. ....	16
Figura 24.	Familia Cortex ....	16
Figura 25.	Diagrama de bloques de CC2640R2F. ....	17

Figura 26.	Arquitectura ICall de software de alto nivel.....	18
Figura 27.	Ejemplo de mensajería ICall.....	19
Figura 28.	Modos de ahorro de energía, .....	19
Figura 29.	Esquema de conexión RF .....	20
Figura 30.	BGA Package .....	21
Figura 31.	BGA Package .....	21
Figura 32.	SMD package .....	21
Figura 33.	Foot print SMD,.....	22
Figura 34.	Diagrama de comunicación SPI .....	23
Figura 35.	Comunicación SPI .....	23
Figura 36.	Conexión I2C.....	24
Figura 37.	Esquema GATT .....	25
Figura 38.	Indicación/ Notificación .....	26
Figura 39.	Servomotor Hitec.....	27
Figura 40.	Sistema de control embebido: ATmega8L .....	27
Figura 41.	Celda de carga .....	30
Figura 42.	Celda de carga .....	30
Figura 43.	Celda de carga .....	30
Figura 44.	Celda de carga .....	30
Figura 45.	Simulación de celda de carga. ....	30
Figura 46.	Simulación de celda de carga. ....	31
Figura 47.	Simulación de celda de carga. ....	31
Figura 48.	Simulación de celda de carga. ....	32
Figura 49.	Análisis de energía en celda de carga. ....	32
Figura 50.	Strain en el eje Z.....	33
Figura 51.	Strain en el eje Y. ....	33
Figura 52.	Planos de strain gauge .....	34
Figura 53.	strain gauge .....	35
Figura 54.	strain gauge instalado. ....	35
Figura 55.	Diagrama de bloques PS09.....	36
Figura 56.	Principio de funcionamiento de chip PS09.....	37
Figura 57.	PS09: Configuración de puente completo .....	38
Figura 58.	Ciclo de tiempos para puente completo.....	38
Figura 59.	Gráfica de carga de un capacitor. ....	39

Figura 60.	Conexión de la tierra del circuito impreso con la celda de carga. ....	40
Figura 61.	Esquema capacitor. ....	42
Figura 62.	Conexión de un condensador de desacoplo .....	42
Figura 63.	Impedancia Vs frecuencia.....	43
Figura 64.	Diagrama eléctrico de un cristal de cuarzo. ....	43
Figura 65.	Diagrama electrónico del sistema de medición. ....	46
Figura 66.	Circuito impreso de medición, Simulación en 3D. ....	47
Figura 67.	Circuito impreso de medición, Simulación en 3D. ....	47
Figura 68.	Circuito impreso de medición, Simulación en 3D. ....	47
Figura 69.	Diagrama electrónico del sistema de comunicaciones Bluetooth.....	48
Figura 70.	Kicad parámetros de la placa .....	49
Figura 71.	Características de la pista.....	49
Figura 72.	Circuito impreso Bluetooth.....	50
Figura 73.	Circuito impreso Bluetooth.....	50
Figura 74.	Circuito impreso Bluetooth.....	50
Figura 75.	Bluetooth Developer Studio.....	51
Figura 76.	Las tres tareas, que se ejecutan en paralelo.....	51
Figura 77.	Prueba de memoria. ....	52
Figura 78.	Configuración de tiempo.....	52
Figura 79.	Configuración de reloj desde un dispositivo externo.....	53
Figura 80.	Configuración de puerto SPI.....	53
Figura 81.	Protocolo para iniciar comunicación con el módulo de medición. ....	54
Figura 82.	Visualización de la variable leída. ....	54
Figura 83.	Circuito impreso de medición. ....	55
Figura 84.	Circuito impreso de medición colocado en la celda de carga.....	56
Figura 85.	Vista frontal del circuito impreso Bluetooth.....	56
Figura 86.	Vista posterior del circuito impreso Bluetooth. ....	57
Figura 87.	Vista frontal del circuito impreso necesario para conexión.....	57
Figura 88.	Vista posterior del circuito impreso necesario para conexión .....	57
Figura 89.	Antena conectada al circuito impreso Bluetooth. ....	58
Figura 90.	Sistema Clamp Assist. ....	58
Figura 91.	Modelo 3D del sistema Clamp Assist dentro del Husillo.....	58
Figura 92.	Medida de fuerza 0 kN, Media y error de Media.....	59
Figura 93.	Medida de fuerza 10.08 kN, Media y error de Media.....	60

Figura 94.	Medida de fuerza 20.35 kN, Media y error de Media. ....	60
Figura 95.	Medida de fuerza 30.01 kN, Media y error de Media. ....	61
Figura 96.	Medida de fuerza 40.22 kN, Media y error de Media. ....	61
Figura 97.	Medida de fuerza 50.31 kN, Media y error de Media. ....	62
Figura 98.	Relación lineal entre raw value Vs fuerza medida por el sensor. ....	63
Figura 99.	Grafica RSSI, 2m, sin viruta.....	64
Figura 100.	Grafica RSSI,2m, con viruta.....	64
Figura 101.	Grafica RSSI,5m, sin viruta.....	65
Figura 102.	Grafica RSSI, 5m, con viruta.....	65
Figura 103.	Grafica RSSI,15m, sin viruta.....	66
Figura 104.	Grafica RSSI, 15m, con viruta.....	66

## Capítulo 1

### Descripción del problema

La empresa alemana Allmatic-Jakob fabrica desde 1973 mordazas que son utilizadas como sistemas de sujeción de piezas en máquinas herramientas y en equipos dedicados al mecanizado. Las mordazas producen fuerzas de sujeción sobre la pieza que se va a mecanizar gracias a los *backends* o bocas. En la Figura 1 se muestra la mordaza LC 125 de Allmatic. Entre las bocas se sujeta la pieza que se va a mecanizar, para ello se desplaza la boca móvil a través de un husillo (tornillo sin fin o spindle). El movimiento giratorio del husillo se logra aplicando un torque mecánico para lograr la fuerza de sujeción.

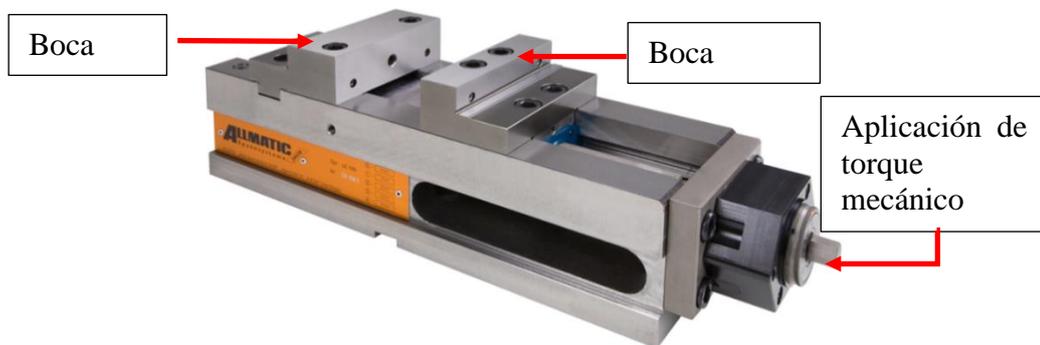


Figura 1. Mordaza de tipo LC 125.

Fuente: <https://www.allmatic.de/shop/en/Products>

Las empresas Allmatic y Tecnotron desarrollaron de manera conjunta la tecnología *clamp assist*, Figura 2, con el propósito de monitorear la fuerza de sujeción ejercida por la mordaza sobre las piezas durante el proceso de mecanizado. Si las fuerzas de sujeción no son las correctas, la pieza podría vibrar dando lugar a tolerancias incorrectas en el mecanizado y, por lo tanto, una alta tasa de rechazo en la producción.



Figura 2. Allmatic clamp assist.

Fuente: Elaboración propia

El *clamp assist* desarrollado por Allmatic y Tecnotron, es montado dentro del spindle o tornillo sin fin para luego ser ensamblado como parte de la mordaza. En la Figura 3 se puede observar que el spindle es hueco y en su interior es colocado el clamp assist.



Figura 3. Montaje del clamp assist dentro del spindle.  
Fuente: Elaboración propia

El *clamp assist*, Figura 4, utiliza como transductores *strain gauges* montados sobre una pieza metálica, esta lleva el nombre de celda de carga (*Kraftaufnehmer*), la cual se deforma cuando es sometida a fuerzas externas. El acondicionamiento de la señal eléctrica generada por la celda de carga y su tratamiento digital se realiza mediante un sistema electrónico basado en un microcontrolador instalado sobre un circuito impreso junto con las baterías. Para la comunicación remota se diseñó un sistema con un protocolo propio, con un receptor externo especial para los equipos Allmatic que se enlazan con el clamp assist, para ello se dispone de una antena montada sobre el spindle.



Figura 4. Clamp Assist.  
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 5 se puede observar la parte trasera del spindle donde se encuentra instalada la antena del clamp assist, como protección se coloca una tapa plástica.

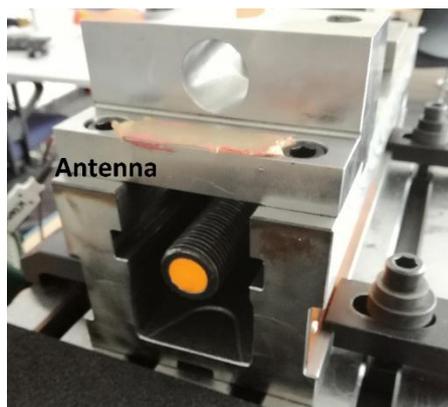


Figura 5. Antena de Clamp Assist.  
Fuente: Elaboración propia

El husillo es el responsable de mover la boca móvil de la mordaza. En su interior tiene un amplificador de fuerza, que permite sujetar la pieza con más fuerza de la que el usuario podría proporcionar a través del torque que ejerce sobre el husillo, Figura 6.



Figura 6. Husillo dentro de la mordaza.  
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 7 se muestra un esquema de los componentes internos de la mordaza. Existen esfuerzos de reacción entre el amplificador de fuerza (*Kraftverstärker*) y el husillo (spindle), que se aprovecha para colocar la celda de carga con strain gauges. Para poder medir la fuerza de sujeción es necesario instalar la electrónica de medición dentro del spindle o tornillo sin fin. Cuando el amplificador de fuerza trabaja, este ejerce presión sobre un área del husillo (spindle), en esta zona se coloca la celda de carga para que se pueda deformar y medir la fuerza que ejerce la mordaza.

### 1.1. Problemas con el sistema actual

Los problemas que actualmente presenta el *clamp assist* desarrollado por Allmatic y Tecnotron, radican principalmente en la dificultad para su montaje, diseño poco reutilizable y falta de integración con sistemas de supervisión industriales. Los problemas se describen a continuación:

- **Hardware:** el sistema consiste en un solo circuito impreso, donde se encuentra el transductor, el microcontrolador, el sistema RF y las baterías, este diseño complica la reutilización y la actualización de los módulos para el desarrollo de posteriores productos.

- Integración a sistemas de supervisión: Se desarrolló como equipo de supervisión de funcionamiento de la mordaza un receptor con protocolo RF cerrado, Figura 8, que permite visualizar el *raw value* de medición, calibrar el *clamp assist*, calcular y visualizar el valor de la fuerza de sujeción. Al ser de protocolo cerrado el *clamp assist* no se integra con otros equipos externos, por ejemplo, PC o PLC's. En la Figura 8 se presenta un esquema que describe el funcionamiento de *clamp assist*, se puede observar la antena dentro del spindle que permite una comunicación exclusiva con el receptor RF.
- Montaje: Para instalar el sistema de medición completo dentro del spindle, se debe de seguir un protocolo complicado de montaje, desde verificar la perpendicularidad del circuito impreso con la celda de carga, Figura 9, hasta su colocación a ciegas dentro del spindle. Para verificar la perpendicularidad el *clamp assist* se inserta en un módulo transparente de plástico, con el fin de observar que no se tenga problemas cuando entre en el husillo, Figura 10. El montaje a menudo es una pérdida de tiempo y en varis casos se acaba rompiendo el módulo.

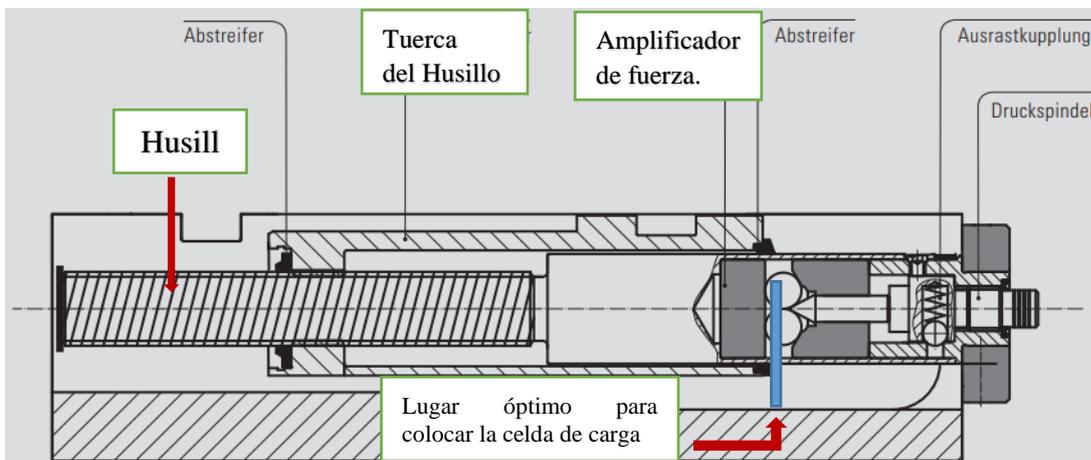


Figura 7. Esquema de funcionamiento interno de una mordaza  
Fuente: Allmatic clamp assist – spannkraftmessung direkt am werkstück



Figura 8. Clamp Assits Titan  
Fuente: <https://www.allmatic.de/shop/en/Products>



Figura 9. Clamp assist - Módulo desarrollado por Tecnotron.  
Fuente: Elaboración propia



Figura 10. Prueba de perpendicularidad.  
Fuente: Propia

Para colocar el *clamp assist* dentro del husillo se utiliza una herramienta especial. En las Figuras 11 y 12 se pueden observar el husillo y la herramienta para el *clamp assist*.



Figura 11. Husillo (Spindle).  
Fuente: Elaboración propia



Figura 12. Dispositivo para colocar el clamp assist.  
Fuente: Elaboración propia

Si la perpendicularidad no está garantizada los bordes del circuito impreso no entran con facilidad en el agujero central del husillo. Los bordes raspan con las paredes del husillo y al aplicarse la fuerza de ingreso se rompe. Otro problema que se presenta es el montaje de la antena, tiene que salir del husillo con el cable más largo hasta la parte de atrás, Figura 9.

Luego del montaje del clamp assist dentro del husillo y su posterior instalación en la mordaza, se procede a su calibración. Se debe relacionar el raw value con las unidades de fuerza medido por un sensor de referencia. Esta relación se hace por mínimos cuadrados y se aproxima a una recta, obteniéndose dos constantes. Se puede apreciar en la Figura 13 el proceso de calibración. Los *raw values* obtenidos por el receptor y los valores de sensor de referencia se colocan a mano en el programa de regresión lineal que se ejecuta en la notebook. luego se obtienen las constantes de la recta y se ingresan en el receptor, donde se calcula y visualiza la fuerza de sujeción de la mordaza.

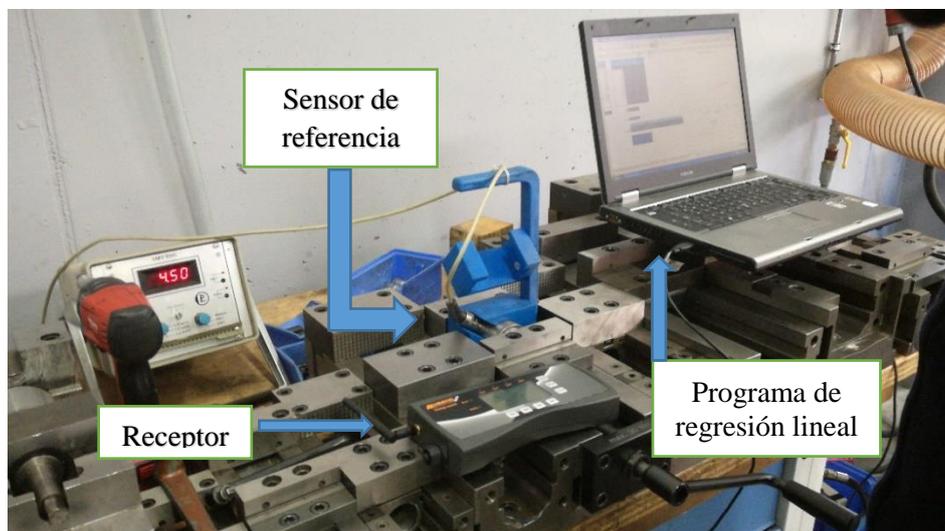


Figura 13. Calibración de Clamp Assist.  
Fuente: Elaboración propia

## 1.2. Objetivos y alcances de la solución

El objetivo principal de la presente tesis es desarrollar un prototipo funcional de un sistema de medición de fuerza, *clamp assist*, para las mordazas de la empresa Allmatic.

Con la finalidad de garantizar un sistema modular y un montaje sencillo del sistema de medición dentro del husillo, la solución propuesta considera:

- Simulación y construcción de una celda de carga óptima.
- Desarrollo de un módulo de medición de fuerza lo más compacto posible y que pueda comunicarse a través de un protocolo estándar (I2C o SPI).
- Diseñar y construir un módulo de procesamiento y comunicación desarrollado en base a un microcontrolador que incluya una capa física de radio frecuencia (RF) y un protocolo de comunicación estándar.

Todo lo anterior hace fácil poder actualizar los módulos de medición y procesamiento de forma independiente con el avance de la tecnología, una mejor integración ya que el protocolo entre los módulos será abierto, al igual que el protocolo entre el módulo de comunicación y cualquier otro dispositivo externo convencional, sin la necesidad de desarrollar con un sistema *ad hoc* para la recepción. El proyecto considera la construcción de un prototipo funcional *clamp assist*, que se pueda calibrar, configurar y mostrar los valores de fuerza desde un dispositivo móvil.

En el proyecto está implícito el uso de tecnologías *Low Energy* en los circuitos integrados y dispositivos electrónicos que se utilicen en el diseño y construcción del prototipo. Las optimizaciones de software para ahorro de energía no están previstas en esta etapa del proyecto.



## Capítulo 2

### Estado del arte

En el presente capítulo se describen la tecnología y los procedimientos actuales que sirven de base para la construcción del prototipo funcional de un sistema *clamp assist* para la empresa Allmatic.

#### 2.1. Medición de fuerza con strain gauge

Un Strain Gauge (SG) es una resistencia que modifica su valor con la deformación plástica. El significado de strain o deformación unitaria es: deformación por unidad de longitud. Se representa con el símbolo  $\varepsilon$  el cual se obtiene de la ecuación:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2.1)$$

##### 2.1.1. Configuraciones para medición: Puente Wheatstone

Los arreglos de strain gauge deben funcionar en el área plástica, debido a que cualquier deformación permanente implicará un offset en la variación de resistencia. Es recomendable pre tensionar la celda de carga, esto llevaría la fuerza sobre el límite elástico, moviéndolo hacia la derecha y desplazando la zona plástica de la curva. Como se puede observar en la Figura 14, la máxima deformación elástica sin cambios es 0,2% equivalente a 0,002 de deformación unitaria.

El valor de 0,002 es un valor típico referencial para los aceros, por lo tanto, aunque sepamos exactamente el material que se utilizará, usaremos 0,2% como máximo valor posible en nuestras simulaciones.

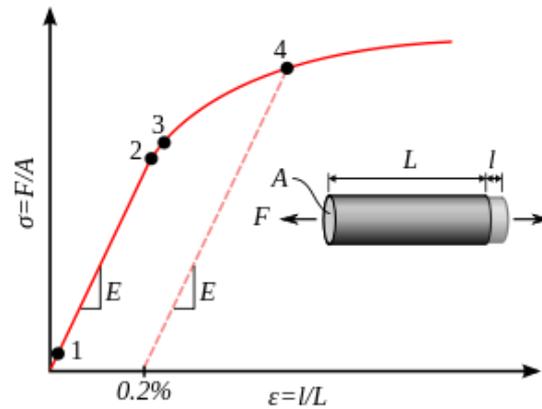


Figura 14. Curva de deformación.

Fuente: [https://en.wikipedia.org/wiki/Yield\\_\(engineering\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Yield_(engineering))

Para poder colocar un strain gauge es necesario entender el sistema mecánico y la disposición física del strain sobre la superficie de la pieza donde se pretende colocarlo, de tal forma que se ubique en la dirección donde se encuentre la máxima deformación unitaria.

Actualmente en el mercado existen varios diseños de celdas de carga comerciales, ya están analizados y permiten obtener las máximas deformaciones en los strain gauge, el problema es que no se pueden utilizar en cualquier sistema, debido a su geometría o por los esfuerzos a los que son sometidos.

La construcción del sensor de medición de fuerza hace necesario diseñar una celda de carga específica. Es importante que el strain de la celda de carga permita medir tensión y compresión. Para lograr una buena disposición física de los strain gauges, en la superficie de la celda de carga, se utiliza un software de elementos finitos para analizar el su comportamiento.

Los strain gauges están hechos de aleaciones dúctiles para poder fabricar los micro hilos y son materiales isotrópicos, los cuales tienen propiedades uniformes como el coeficiente de Poisson el cual nos permitirá medir la variación del área transversal cuando el strain gauge es estirado.

La ecuación con la cual se calculará es la variación de resistencia es:

$$R = \frac{\rho * L}{A} \quad (2.2)$$

Una de las características de los strain gauge (SG) es el GAGE FACTOR o GF, y debe ser proporcionado por el fabricante, suele estar alrededor de 2 si son aleaciones de cobre, el valor puede variar según la geometría diseñada. El GF relaciona la variación relativa de la resistencia con la deformación unitaria, lo cual se define con la siguiente ecuación (Omega engineering, 1999).

$$GF = \frac{(\Delta R/R)}{\epsilon} \quad (2.3)$$

La variación de resistencia se calcula con la siguiente forma.

$$\Delta R = GF \times R \times \epsilon \quad (2.4)$$

La forma clásica de medir la variación de resistencia en un SG consiste en un puente Wheatstone, Figura 15. A partir del voltaje de alimentación  $V_1$ , lo más estable posible, se mide la variación de voltaje en  $V_2$ , teóricamente se necesita que antes de medir  $V_2$  el puente este equilibrado, es decir la diferencia de potencial sea cero, esto con el fin de aprovechar toda la capacidad de deformación del puente.

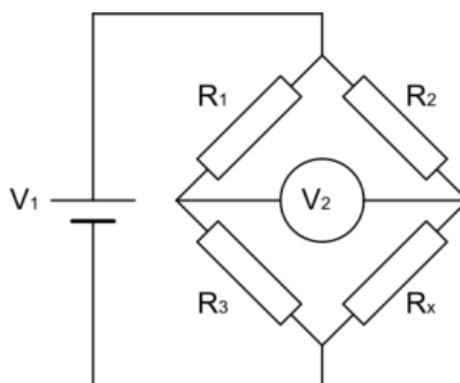


Figura 15. Puente Wheatstone.  
Fuente: Texas Instruments, Precision analog application seminar

Para desequilibrar el puente se usan diferentes métodos dependiendo de si la variación de la resistencia es negativa o positiva y de cuántas resistencias variables se tenga.

Se puede desequilibrar el puente Wheatstone con uno, dos o cuatro strain gage. Dependiendo del tipo de strain que se desea medir se determina el tipo de puente que se usará. Cuando la aplicación requiere medir esfuerzos en sentidos opuestos, tensión y compresión, es necesario configurar un puente completo. Si solo se desea medir un sentido se usan un par de strain gage y se fijan los otros con resistencias. Para un puente completo la amplitud es mayor, por consiguiente su resolución es mejor ante las deformaciones.

Se evalúa un puente de acuerdo a la Figura 16, con los siguientes datos, un strain gauge de  $1\text{k}\Omega$ ,  $3.3\text{ V}$  en la fuente y un GF de 2.

$$\Delta R = 2 \times 1000 \times 0.002 = 4 \quad (2.5)$$

$$\Delta V = VE \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) \quad (2.6)$$

Esta distribución es la más pobre, ya que solo una de las cuatro resistencias varía.

$$3.3 \left( \frac{1000}{1000 + 1000} - \frac{1000}{1000 + 1004} \right) = 0.003293\text{V} \quad (2.7)$$

En la Figura 17 se muestra la distribución de medio puente, es la más común y se obtiene un tipo de strain, ya sea de tensión o compresión, siendo su amplitud de salida el doble de amplitud del primero.

$$3.3 \left( \frac{1004}{1000 + 1004} - \frac{1000}{1000 + 1004} \right) = 0.006586V \quad (2.8)$$

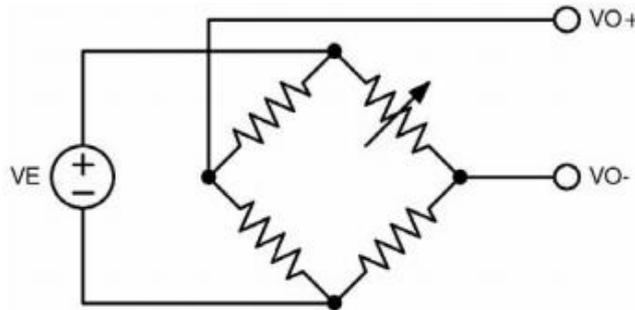


Figura 16. Un cuarto de puente Wheatstone.

Fuente: Texas Instruments, Precision analog application seminar,

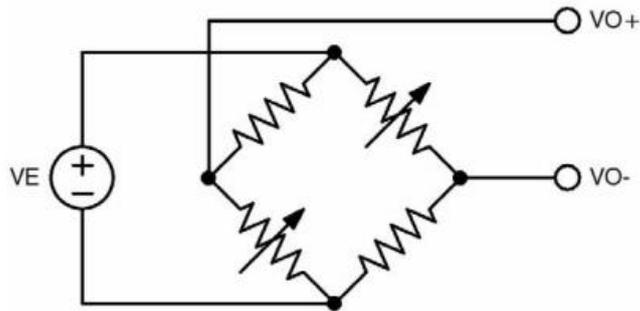


Figura 17. Medio puente Wheatstone.

Fuente: Texas Instruments, Precision analog application seminar.

En la Figura 18 se muestra la distribución de puente completo, todas las resistencias varían. Se puede construir una celda de carga que mide los dos tipos de strain (tensión y compresión), tiene el doble de amplitud que el medio puente.

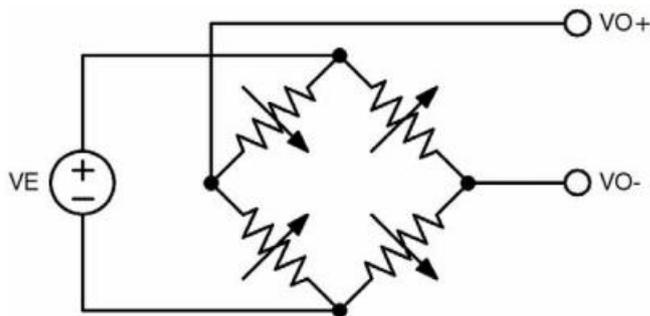


Figura 18. Puente Wheatstone completo.

Fuente: Texas Instruments, Precision analog application seminar.

$$3.3 \left( \frac{1004}{996 + 1004} - \frac{996}{996 + 1004} \right) = 0.0132V \quad (2.9)$$

Se puede concluir que la máxima variación de voltaje con puente completo (0.0132V) corresponde solo al 0.4 % del voltaje de alimentación (3.3V). Por lo tanto, es necesario un circuito de acondicionamiento o amplificación de la señal.

### 2.1.2. Acondicionamiento de la señal de medición

El acondicionamiento de la señal tiene como objetivo amplificar las pequeñas señales que se obtienen del transductor, en este caso del puente Wheatstone. Para poder diseñar la etapa de acondicionamiento se necesita conocer la amplitud de la señal que se desea amplificar y el voltaje de referencia del ADC que se utilizará. Es importante considerar una etapa de filtrado antes de ingresar la señal amplificada al convertidor analógico digital.

En el circuito de amplificación se debe de prestar atención a la linealidad en la amplificación de la señal y a los dispositivos electrónicos necesarios para el diseño y construcción del circuito.

Como se puede observar en la Figura 19 el puente Wheatstone se alimenta con su respectiva fuente de energía, luego la diferencia de voltaje se amplifica para posteriormente filtrarse y después conectarse con la entrada ADC.

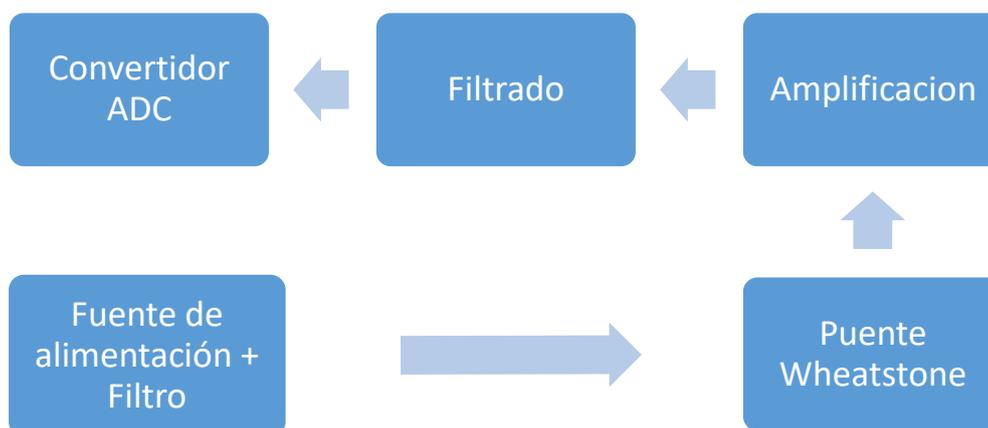


Figura 19. Sistema de acondicionamiento de señal.

Fuente: Elaboración propia.

Otra forma de medir y obtener una señal digital a partir de la variación de la resistencia de un strain gauge es utilizar el principio Time Digital Converter (TCD).

TDC es una tecnología capaz de medir pequeños intervalos de tiempo en el rango de pico segundos, se usa de forma frecuente cuando se necesita medir el intervalo entre dos eventos. Los intervalos se miden entre un inicio y una parada, funciona como un contador de alta frecuencia, el intervalo de tiempo medido se representa de manera digital (binaria).

El principio de funcionamiento del TDC, Figura 20, es contar un número de ciclos de reloj entre el evento de inicio y el evento de parada. Las unidades en las que se mide el intervalo entre los eventos es en número de ciclos, para obtener el tiempo es necesario multiplicar el número de ciclos por la frecuencia de cada ciclo. Es importante una buena estabilidad y bajo ruido del cristal que determina la frecuencia de operación del TDC, este requerimiento es importante en el diseño.

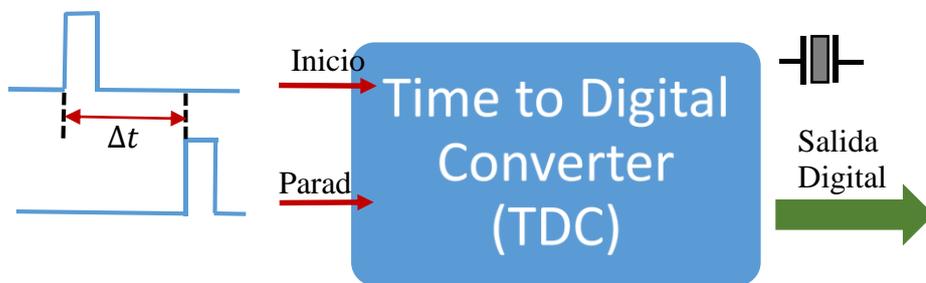


Figura 20. Time Digital Converter (TCD).  
Fuente: Elaboración propia.

En el presente proyecto se aplicará la tecnología TDC para medir el tiempo de descarga de un circuito RC. Si mantenemos la capacitancia constante, la variación del tiempo de descarga estará relacionada con la variación de la resistencia. De esta forma podríamos medir la variación de resistencia de los *strain gauges* en función al tiempo de descarga del circuito RC sin necesidad de utilizar la etapa de amplificación y conversión digital. Esta es la forma más precisa y con baja energía de medir variación de los *strain gauges*.

## 2.2. Microcontroladores

Un microcontrolador es el corazón de una aplicación embebida, son circuitos integrados que ejecutan órdenes grabadas en su memoria. Actualmente en aplicaciones de sistemas embebidos es más práctico utilizar SOC (Systems on chips) o MCU (microcontroller unit) con el fin de ahorrar espacio en el diseño de los circuitos impresos, ya que estos vienen con memorias (RAM, ROM) y periféricos incluidos en el chip.

El chip mbed LPC1768 de “NXP Semiconductors” es un ejemplo de un sistema MCU utilizado en el desarrollo de sistemas embebidos. En la Figura 21 se muestra el LPC1768 montado en un circuito impreso, como se puede observar el chip cuenta con SRAM, ROM, DAC, ADC, I2C, SPI, CAN, Ethernet, etc.

En la Figura 22 se muestra el esquema clásico de conexión externa utilizada por los microcontroladores para comunicación por radio frecuencia. Como se puede observar el microcontrolador ATMEGA1281 se conecta con el circuito integrado AT86RF231, Transceiver de 2.4GHz, para la comunicación inalámbrica. Los nuevos microcontroladores traen un transceiver integrado al chip.

Dentro de las opciones comerciales para implementar una comunicación Bluetooth con un Transceiver incorporado dentro del SOC está el microcontrolador EFR32xG1, de “Silicon Laboratories, Inc.”; sin embargo, presenta la desventaja de tener solo un microcontrolador de tipo Cortex-M4, Figura 23, el cual tiene doble tarea: procesamiento de datos y gestión de la comunicación Bluetooth.

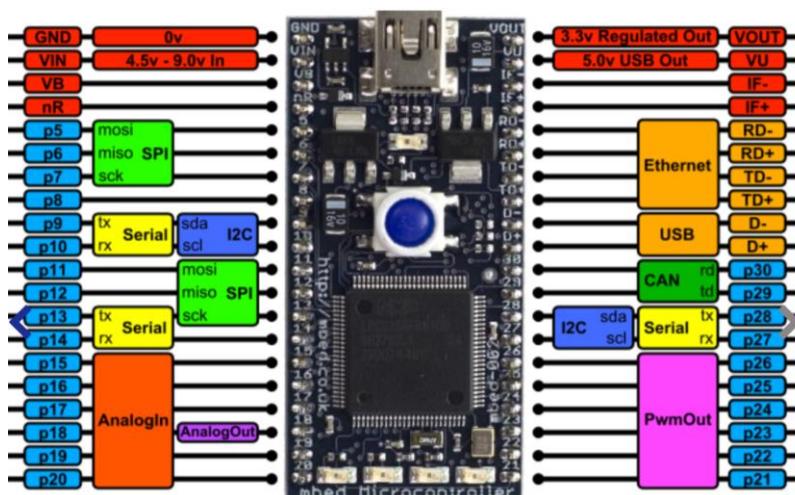


Figura 21. MCU mbed LPC1768  
Fuente: <https://os.mbed.com/platforms/mbed-LPC1768/>

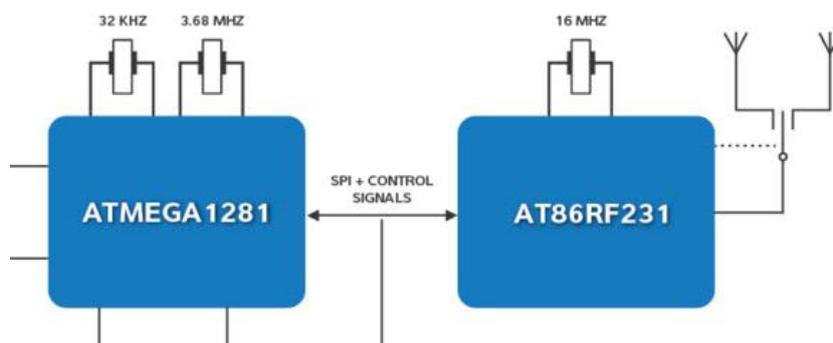


Figura 22. Esquema del uso AT86RF231  
Fuente: Microchip Technology

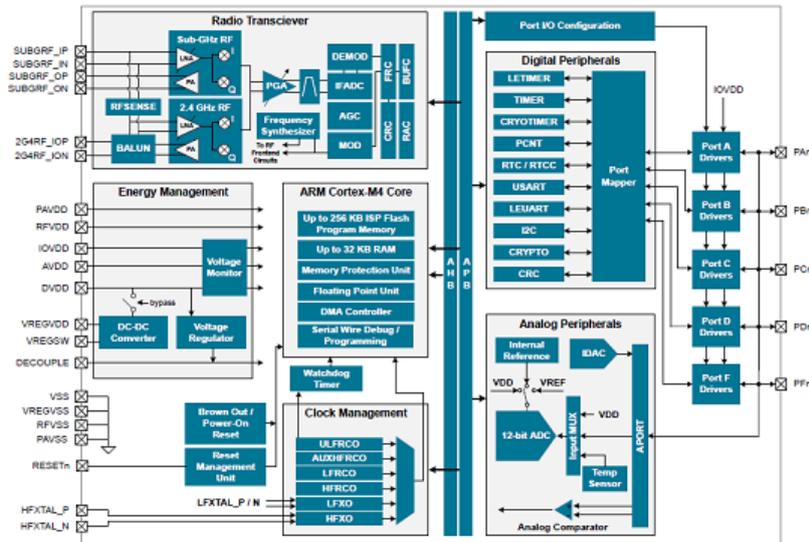


Figura 23. MCU EFR32xG1.  
Fuente: <http://m.elecfans.com/article/861095.html>

En la Figura 24 se puede observar que dentro de las arquitecturas de Microcontroladores de la familia ARM, la línea M es la indicada para el desarrollo de dispositivos orientados a fusión de sensores, industria médica y automovilística, la principal característica de sus CPUs es que son diseñados específicamente para eficiencia energética.

## ARM architecture for diverse computing needs

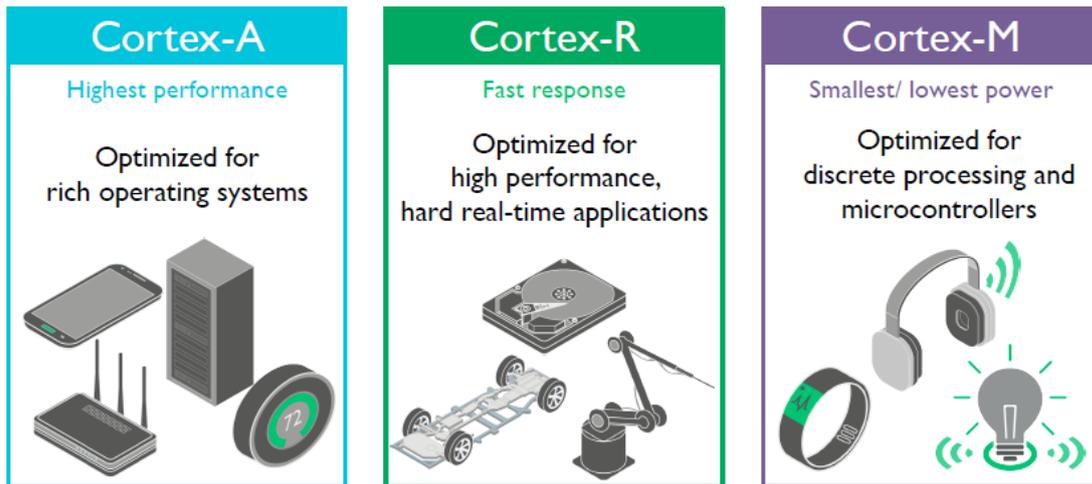


Figura 24. Familia Cortex  
Fuente: Kinjal Dave, 2016.

Dentro de la gama M los microcontroladores Cortex-M3 y Cortex-M0 son de licencia libre para desarrolladores, por lo tanto, los productos que utilicen estos CPUs son de bajo costo para el desarrollo de sistemas embebidos (Kinjal Dave, 2016)

El MCU CC2640R2F de Texas Instruments, Figura 25, incorpora dos microcontroladores, el microcontrolador ARM Cortex-M0 encargado de la gestión del módulo de Radio Frecuencia (RF) y el microcontrolador ARM Cortex-M3 como unidad principal de procesamiento (CPU), ambos diseñados para eficiencia energética. Los MCU CC2XXX RF están optimizados para el desarrollo para aplicaciones de Inthernet of thing (IOT) y Machine to Machine (M2M).

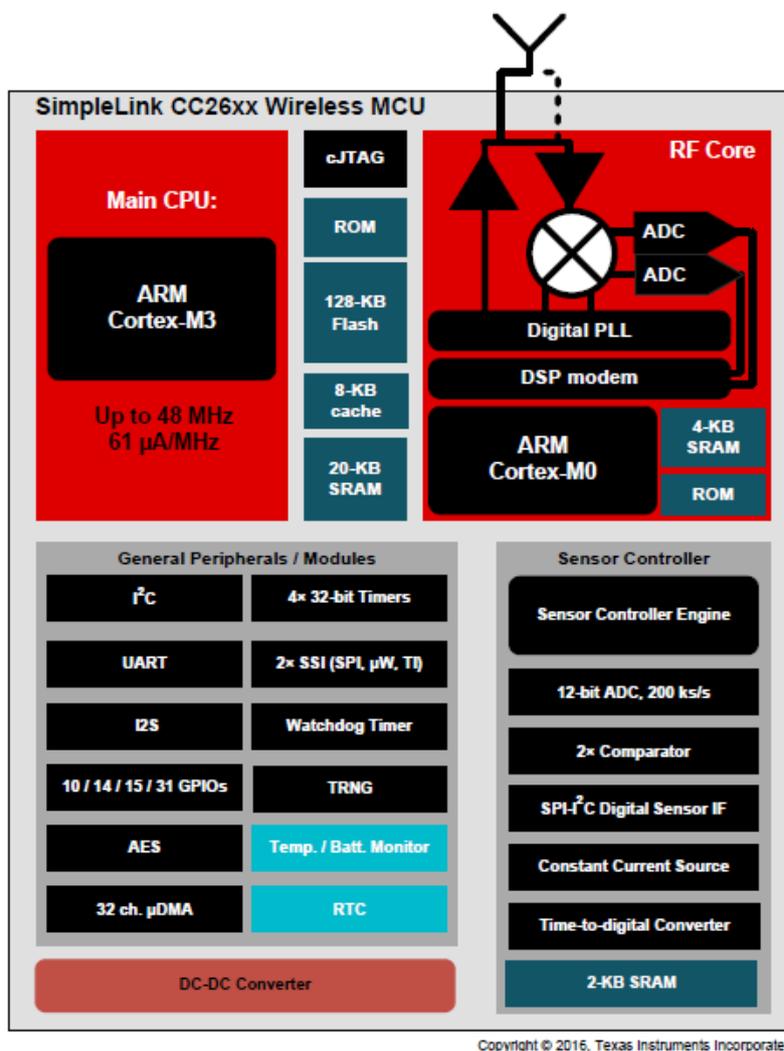


Figura 25. Diagrama de bloques de CC2640R2F  
Fuente: Texas Instruments, 2017

Las características más importantes del MCU CC2640R2F son las siguientes:

- SRAM 8-KB.
- Real Time Clock.
- Sensor Controller.
- RF Core.
- Monitor de batería.
- Comunicación SPI e I2C.

Es importante mencionar que el MCU CC2640R2F utiliza dos cristales, uno de 37,768 kHz y 24 MHz, el cristal de más alta frecuencia está encargado de generar la frecuencia 2.45 GHz para la RF. Debido a que la frecuencia de RF es crítica, el MCU nos da la posibilidad de programar los condensadores de carga del cristal con finalidad de hacerlo oscilar a la frecuencia indicada.

El módulo de gestión de Radio Frecuencia (CORE RF), basado en Cortex-M0, permite hacer una interface que toma las señales analógicas provenientes de la antena y las convierte a señales digitales, armando un paquete de información. Este diseño facilita tener una comunicación de alto nivel mediante comandos API entre el CORE RF y el Cortex-M3 (Texas Instruments, 2017).

A diferencia de un simple Transceiver, el CORE RF ejecuta procesos propios del protocolo Bluetooth que suelen ser críticos en tiempo; además, libera al CPU principal, Cortex-M3, de carga computacional ya que el Cortex-M0 está pre programado para ejecutar tareas como levantar un servidor Bluetooth. El CORE RF no puede ser programado por los desarrolladores, solo puede ser configurado (Texas Instruments, 2017).

Para la comunicación entre el Cortex-M3 y el Cortex-M0 se utiliza el módulo interface Indirect Call Framework (ICall), el cual proporciona rutinas que permiten que la aplicación que se ejecuta en el Cortex-M3, interactúe con los servicios del Stack del protocolo del módulo de Bluetooth Low Energy, es decir, las API del Stack del módulo Bluetooth LE – Cortex-M0. En la Figura 26 se observa como el módulo ICall, permite que la aplicación y la pila del protocolo operen de manera eficiente, se comuniquen y compartan recursos en un entorno RTOS unificado.

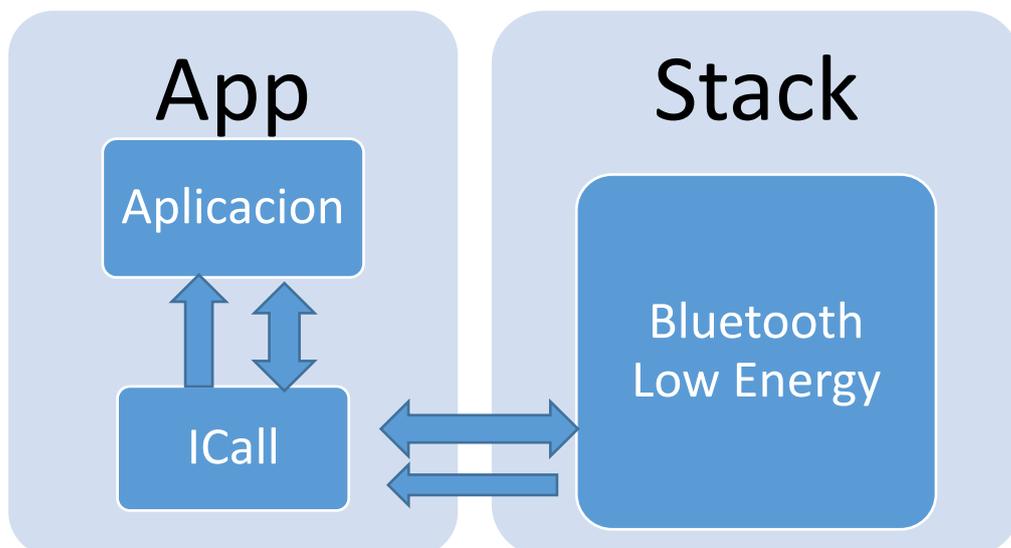


Figura 26. Arquitectura ICall de software de alto nivel  
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 27 se puede observar la independencia en la ejecución de tareas debido a que se ejecutan en paralelo por los dos procesadores físicos: Cortex-M3 y Cortex-M0. Esto es necesario para mantener el Bluetooth *Low Energy protocol stack* siempre actualizado. El sistema operativo que se ejecuta en el Cortex -M3, TI-RTOS, también permite simular la ejecución de tareas en paralelo.

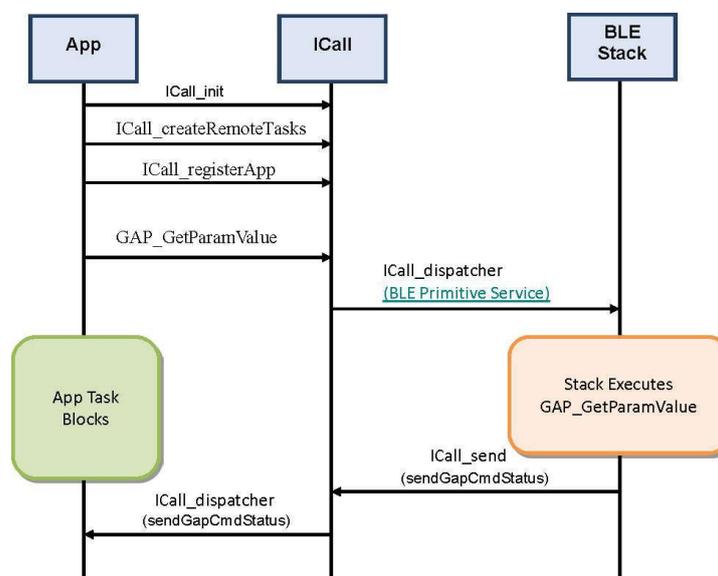


Figura 27. Ejemplo de mensajería ICall  
Fuente: Texas instruments, Developer's Guide, 2018

Es importante mencionar que el MCU CC2640R2F posee diferentes modos de ahorro de energía los cuales se muestran en la Figura 28 obtenida de su hoja de datos proporcionada por Texas Instruments.

MODE	SOFTWARE CONFIGURABLE POWER MODES				RESET PIN HELD
	ACTIVE	IDLE	STANDBY	SHUTDOWN	
CPU	Active	Off	Off	Off	Off
Flash	On	Available	Off	Off	Off
SRAM	On	On	On	Off	Off
Radio	Available	Available	Off	Off	Off
Supply System	On	On	Duty Cycled	Off	Off
Current	1.45 mA + 31 $\mu$ A/MHz	550 $\mu$ A	1 $\mu$ A	0.15 $\mu$ A	0.1 $\mu$ A
Wake-up Time to CPU Active <sup>(1)</sup>	-	14 $\mu$ s	151 $\mu$ s	1015 $\mu$ s	1015 $\mu$ s
Register Retention	Full	Full	Partial	No	No
SRAM Retention	Full	Full	Full	No	No
High-Speed Clock	XOSC_HF or RCOSC_HF	XOSC_HF or RCOSC_HF	Off	Off	Off
Low-Speed Clock	XOSC_LF or RCOSC_LF	XOSC_LF or RCOSC_LF	XOSC_LF or RCOSC_LF	Off	Off
Peripherals	Available	Available	Off	Off	Off
Sensor Controller	Available	Available	Available	Off	Off
Wake up on RTC	Available	Available	Available	Off	Off
Wake up on Pin Edge	Available	Available	Available	Available	Off
Wake up on Reset Pin	Available	Available	Available	Available	Available
Brown Out Detector (BOD)	Active	Active	Duty Cycled	Off	N/A
Power On Reset (POR)	Active	Active	Active	Active	N/A

(1) Not including RTOS overhead

Figura 28. Modos de ahorro de energía,  
Fuente: Texas Instruments, 2017

En la etapa de diseño de aplicaciones basadas en el MCU CC2640R2F se debe considerar que los elementos que componen la tarjeta ocupen poco espacio, es decir, usando la menor cantidad de componentes eléctricos y electrónicos posibles.

El MCU CC2640R2F se compone de dos circuitos de alimentación, uno para el funcionamiento del Cortex-M3 y periféricos, y otro para funcionamiento del CORE RF. Así mismo, cuenta con un regulador de voltaje interno, el cual se puede utilizar como parte del diseño de aplicaciones para ahorrar espacio.

El CORE RF necesita balancear la señal que obtiene de la antena monopolar para poder interpretar el protocolo Bluetooth, para esto utiliza un balun. Existen diferentes formas de implementar un balun, dependiendo si se usa o no bias externo (Fredrik Kervel, 2017), Figura 29. En el caso de usar bias interno se gasta menos energía, pero la calidad de la señal disminuye; por tanto, será necesario tener la antena lo mejor sintonizada posible, esto se hace con un circuito entre el balun y la antena.

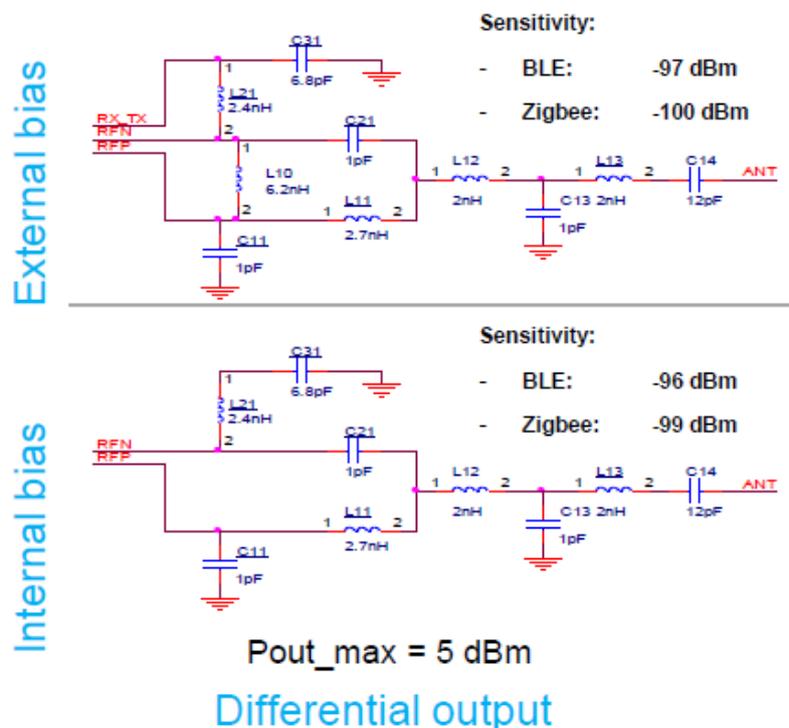


Figura 29. Esquema de conexión RF  
Fuente: Fredrik Kervel, 2017

Para efectos de estudio se han evaluado dos tipos de balun:

Balun BALF-CC26-05D3, Figura 30 y Figura 31, su montaje es con soldadura de tipo Ball Grid Array (BGA), haciendo que su posicionamiento en la placa sea complejo. Se conecta de forma diferencial y con bias externo, lo cual permite obtener una mejor calidad de la señal. Sin embargo, debe probarse su desempeño mecánico post montaje, ya que si está sometido a vibraciones y movimiento tiene la desventaja de tener una adhesión más débil que los tipos SMD, debido a que no posee una garganta de soldadura.

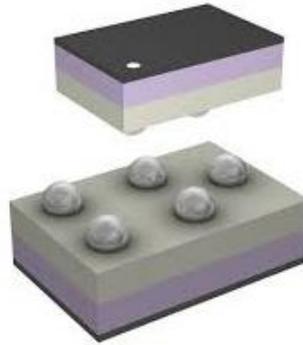


Figura 30. BGA Package  
Fuente: Digikey

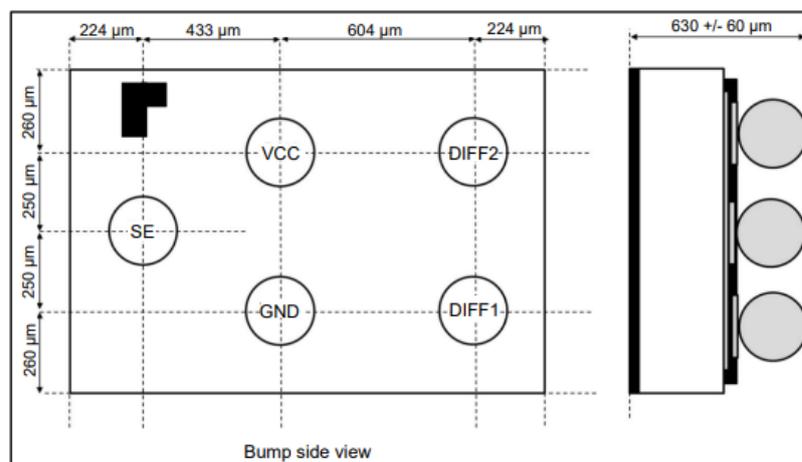


Figura 31. BGA Package  
Fuente: STMicroelectronics,2016

Balun 2450BM14G0011T, Figura 32, permite la conexión diferencial y bias interno, por lo tanto, la calidad de la señal no es la mejor, sin embargo, al ser SMD facilita el posicionamiento y es fácil el control post montaje. Al tener garganta de soldadura y superficie es mucho más resistente a vibraciones y movimientos, Figura 33.



Figura 32. SMD package  
Fuente: Digikey

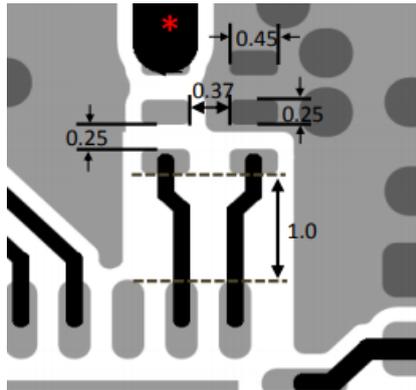


Figura 33. Foot print SMD,  
Fuente: Johanson Technology, Inc, 2017.

### 2.3. Comunicación de los microcontroladores

Los protocolos de comunicación más utilizados por los desarrolladores para el intercambio digital de información entre los microcontroladores y circuitos integrados de aplicación específica (*Application Specific Integrate Circuit* ASIC), son: SPI, I2C y *Bluetooth Low Energy* (BLE). Los dos primeros utilizan medio físico cableado y para el tercero el medio físico es inalámbrico. Estos protocolos son implementados en la mayoría de chips: SOC, MUC y ASIC.

#### 2.3.1. Protocolo SPI (Serial Peripheral Interface)

Es un protocolo serial síncrono desarrollado por Motorola, funciona en modo dúplex permitiendo que la información viaje en dos direcciones de manera simultánea, se utilizan altas frecuencias de comunicación y se aplica principalmente en una arquitectura maestro - esclavo.

En la Figura 34 se muestra el esquema de comunicación SPI en una arquitectura maestro – esclavo. Las señales utilizadas en la comunicación son:

MOSI: (Master Output Slave Input). Permite la transferencia de datos desde el maestro al esclavo.

MISO: (Master Input Slave Output). Permite la transferencia de datos desde el esclavo al maestro.

CS: (chip select). Permite al maestro seleccionar y habilitar el esclavo.

SCLK: (Clock). Señal de reloj enviada desde el maestro para sincronizar los esclavos.

La conexión física de los dispositivos es simple, no se utilizan pull up's, es susceptible a ruidos y tiene la ventaja de consumir poca energía. No se recomienda para conexiones de distancias mayores a 30 cm, solo dentro del espacio utilizado

para el desarrollo de un sistema con microcontroladores. El protocolo no considera confirmación de datos recibidos, se recomienda tenerlo en cuenta durante la programación de las aplicaciones.

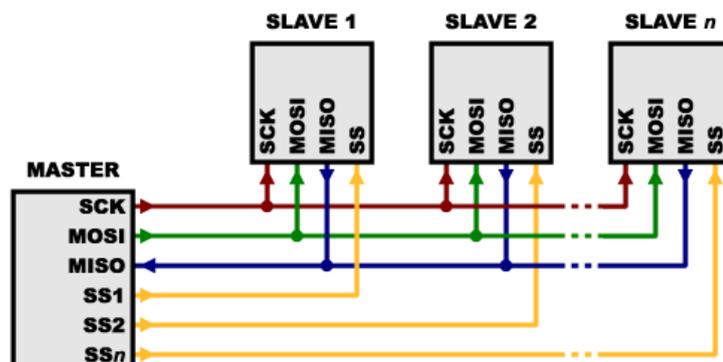


Figura 34. Diagrama de comunicación SPI  
Fuente: Sparkfun, Serial Peripheral Interface (SPI),

Hay dos parámetros en el protocolo SPI importantes para poder sincronizar los chips. El primero de ellos es la polaridad y el segundo es la fase. La polaridad indica si para enviar el primer dato la señal de reloj inicia con un flanco ascendente (falling) o un flanco descendente (rasing). La fase señala cuándo se actualiza el dato si es con un falling o un rasing.

En la Figura 35 se muestra la sincronización de la comunicación maestro-esclavo utilizando el flanco ascendente de la señal de reloj. El esclavo es seleccionado con estado '0' del CS, el maestro envía el dato 0x53, el esclavo responde con el dato 0x46.

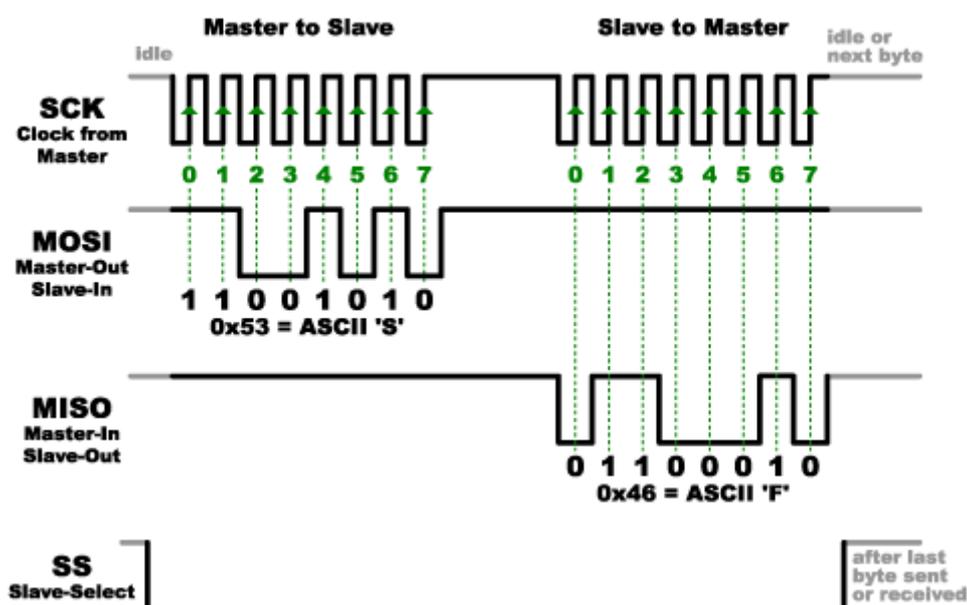


Figura 35. Comunicación SPI  
Fuente: Sparkfun, Serial Peripheral Interface (SPI)

### 2.3.2. Protocolo I2C (Inter-Integrated Circuit)

Es un protocolo serial asíncrono desarrollado por Philips que permite tener varios maestros y esclavos en la misma red. Tiene el inconveniente que no se puede escribir y leer al mismo tiempo.

En la Figura 36 se puede observar que el bus de comunicación se caracteriza por usar solamente dos señales:

SDA:(Serial Data). Es la línea de transmisión de datos entre los dispositivos

SCL:(serial Clock) Señal de reloj para la sincronización del sistema

El bus de comunicación necesita de resistencias pull ups, por lo que es menos susceptible a ruidos, está diseñado para comunicar diferentes placas electrónicas, permite comprobar si el dato enviado es válido. Es un protocolo bastante estándar por lo cual no sufre variaciones en su implementación.

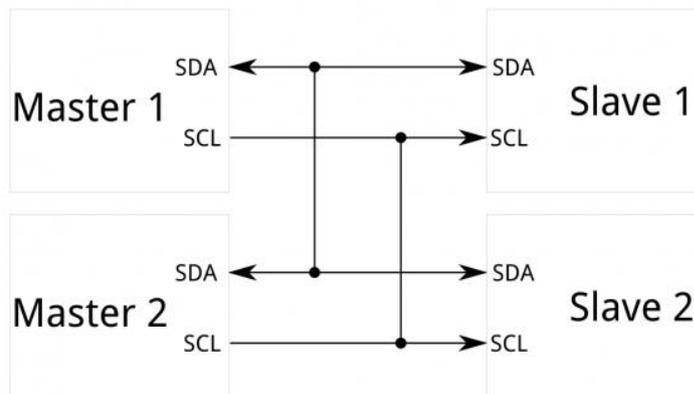


Figura 36. Conexión I2C

Fuente: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/i2c>

### 2.3.3. Bluetooth 5.0

Es una tecnología *wireless* que funciona en la banda de 2.4 GHz perteneciente a la banda global disponible ISM (Industrial, Scientific and Medical). La capa física (PHY) opera a 2Mb/s y permite conectividad de hasta 500m, Texas Instruments, asegura poder conectarse a 1Km. Sus aplicaciones están orientadas a comunicar dispositivos cercanos formando redes PAN (Personal Area Network). El bajo consumo de energía que requiere la transmisión Bluetooth permite que dispositivos móviles que funcionan con baterías se puedan comunicarse de manera eficiente.

La forma en la que se estructura la información en un dispositivo Bluetooth 5.0 lleva el nombre de Generic Attribute Profile (GATT), este permite mantener la comunicación entre dos dispositivos según sean los roles, como servidores o clientes GATT.

Un Servidor GATT es un dispositivo remoto que dispone de la información y al cual se puede acceder mediante operación de lectura, escritura o notificaciones.

El Cliente GATT es el dispositivo que almacena la información localmente y permitir el acceso a la información mediante métodos.

La estructura de un perfil GATT, consiste en servicios, características y atributos. Las características y servicios tienen un identificador numérico único conocido como UUID (Universally Unique Identifier), que el cliente usa para acceder a la información que guarda una característica. Los atributos controlan el comportamiento de las características, por ejemplo, habilitar las operaciones de indicación y notificación.

Los UUID, pueden ser de 128 bits o de 16 bits, la diferencia radica en que los de 128 bits, son multipropósitos, en cambio los de 16 bits tienen que ser usados con permiso de Bluetooth SIG (Special Interest Group), puesto que ya están definidos. En la Figura 37 se muestra la estructura de un perfil GATT.

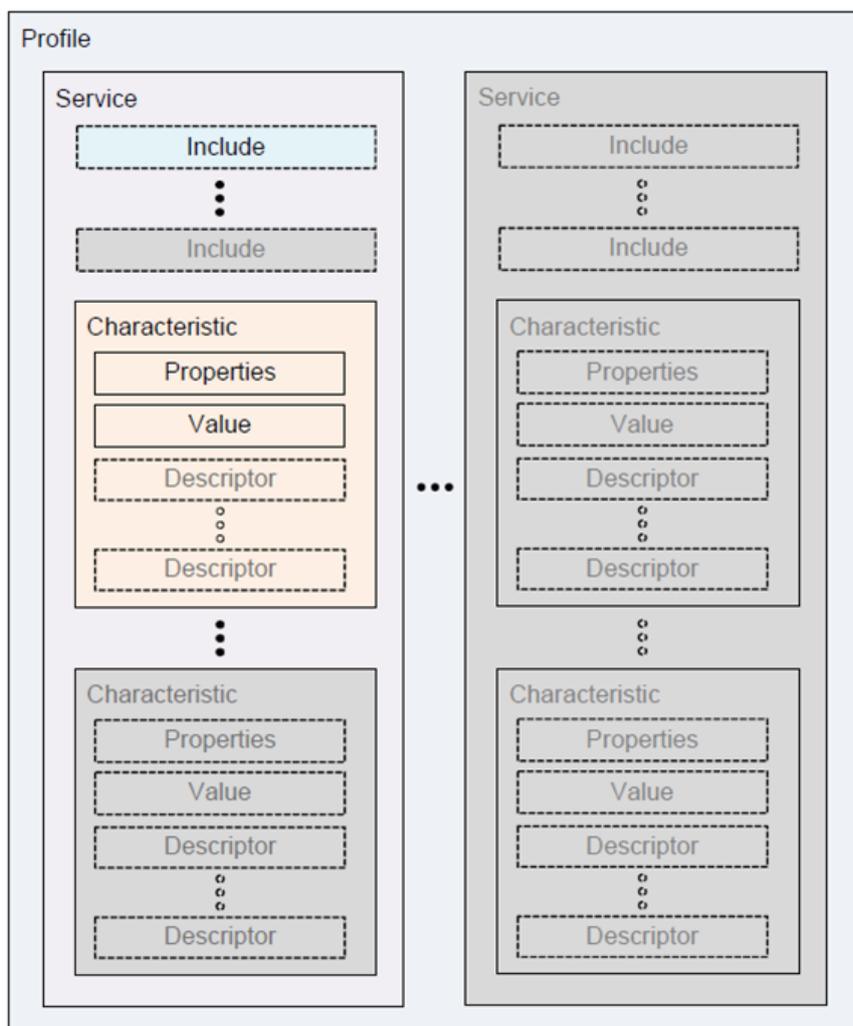


Figura 37. Esquema GATT  
Fuente: Bluetooth Special Interest Group, Inc.

Dentro de los métodos para transferencia de datos se encuentran los siguientes:

Leer: Si un cliente desea obtener datos de un servidor.

Escribir: Si un servidor quiere almacenar un dato en el cliente.

Notificar: si el Servidor necesita enviar un dato al cliente, sin solicitud del cliente.

Indicación: Son iguales que las notificaciones, solo que, en este caso, la información es confirmada por el servidor, esto aumenta la fiabilidad, pero son más lentas.

Figura 38

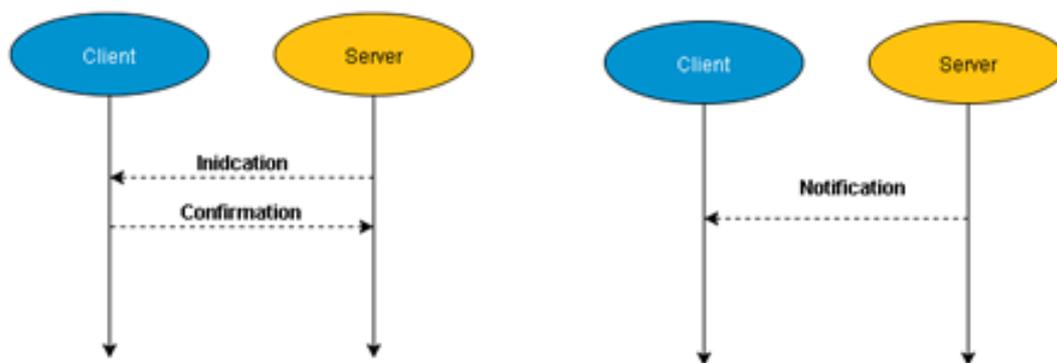


Figura 38. Indicación/ Notificación

Fuente: <https://community.nxp.com/docs/DOC-328525>

## 2.4. Sistemas embebidos.

Los sistemas embebidos, empotrados o incrustados, son diseñados para un propósito específico, en comparación con ordenadores que son de propósito general. La palabra embebido denota que a menudo estos sistemas son utilizados para controlar, medir o asistir procesos o maquinarias.

Los sistemas embebidos al ser de propósito específico, lo hace mucho más seguro que los sistemas multipropósito los cuales son más susceptibles en cuanto a la seguridad de la información.

En las Figura 39 y 40 se puede observar un sistema embebido encargado de controlar la posición de un servomotor de la marca Hitec, utiliza el Microcontrolador Atmega8l para el desarrollo del algoritmo de control.

Los sistemas embebidos son diseñados para realizar tareas específicas, por lo tanto, la adquisición de datos mediante sensores se diseña específicamente para el sistema, permitiendo disminuir costos de fabricación.

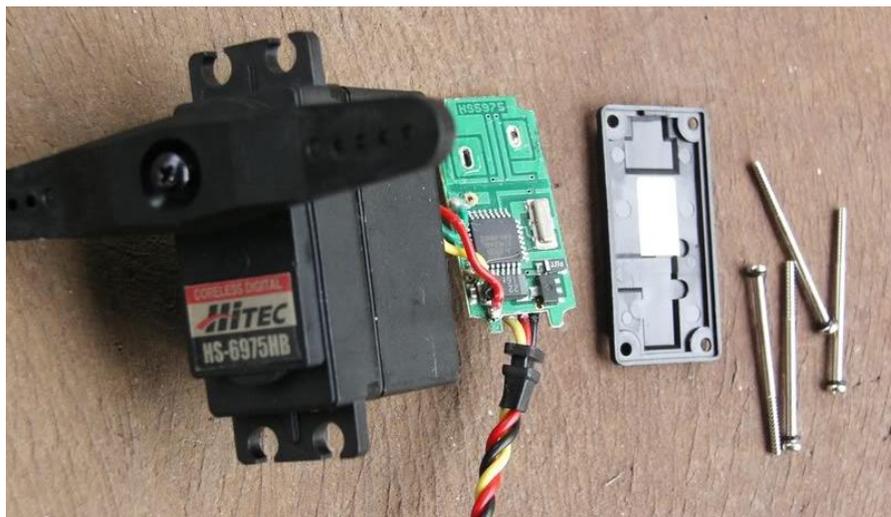


Figura 39. Servomotor Hitec  
Fuente: Elaboración propia



Figura 40. Sistema de control embebido: ATmega8L  
Fuente: Elaboración propia



## **Capítulo 3**

### **Solución propuesta e implementación**

Para seleccionar la tecnología de desarrollo y construcción del prototipo *clamp assist* se tomó en cuenta tres características principales de diseño del prototipo: que consuma lo menor cantidad de energía posible, que ocupe el menor espacio posible y que sea modular.

También se considera como requisito de construcción, que los dispositivos electrónicos seleccionados deben ser de fácil montaje con los equipos que dispone el laboratorio de la empresa Allmatic.

#### **3.1. Medición de fuerza**

En esta sección se describe el transductor y el principio de funcionamiento que se usa para medir la deformación en la celda de carga.

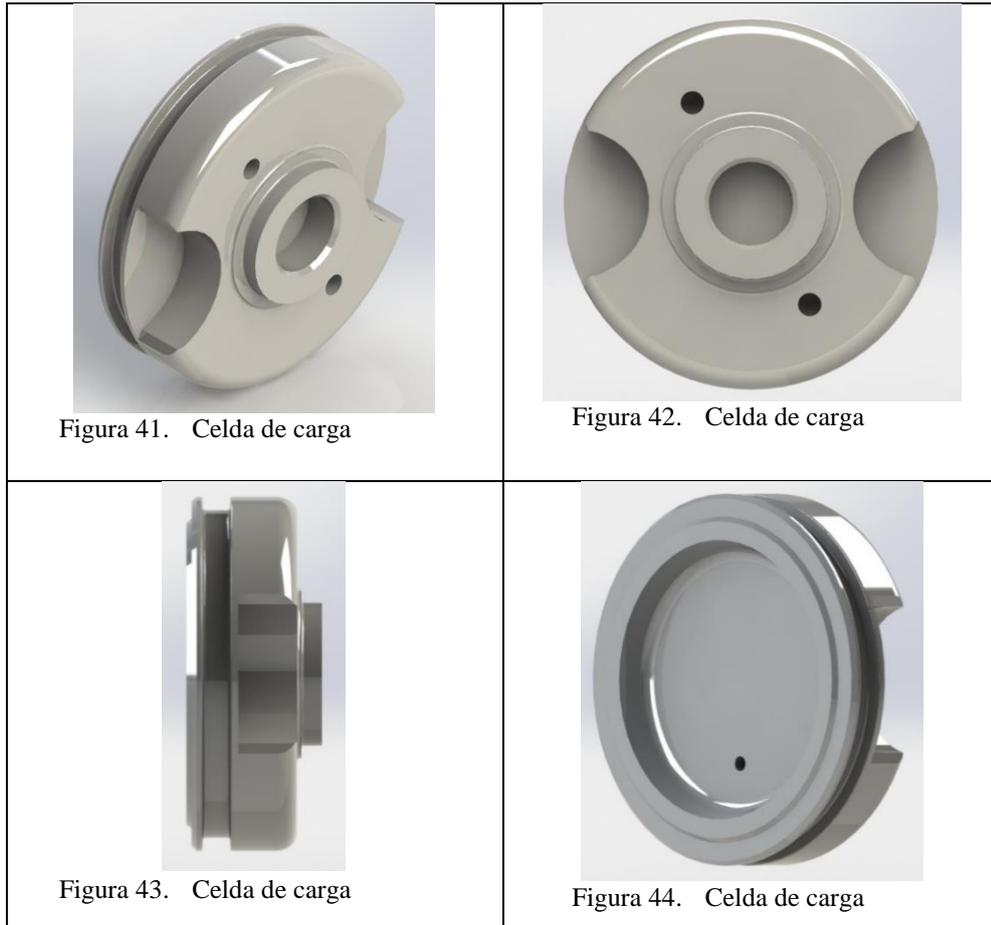
##### **3.1.1. Sensor**

En el diseño, con el fin de usar la menor corriente posible, se utiliza un *strain gauge* (SG) de  $1k\Omega$ . Por lo tanto, la mayor variación que podríamos obtener de acuerdo a (2.4) es:

$$4.3 \Omega = 2.15 \times 1000 \times 0.002$$

Este cálculo es teniendo en cuenta una deformación unitaria de 0.002, valor típico límite elástico de los aceros. Por lo tanto, el diseño de la celda de carga considera 0.002 de *strain* máximo, así nos aseguramos de no romper la celda de carga.

El sistema actual utiliza la celda de carga representada en las Figuras 41, 42, 43 y 44.



Fuente: Elaboración propia.

Para simular el comportamiento de la celda de carga bajo una fuerza se considera despreciar los efectos del O-Ring que forma parte del sistema de sellado y se procede a configurar las superficies.

En la Figura 45 se configura la superficie resaltada solamente para soportar presión (*compression only support*), que restringe el movimiento de los elementos en una sola dirección y en un solo sentido. Luego se genera una región de simetría, Figura 46, para evitar posibles errores numéricos como en el caso de una rotación.

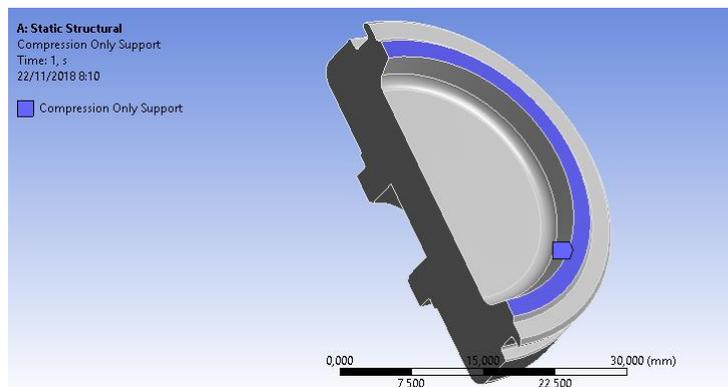


Figura 45. Simulación de celda de carga.

Fuente: Elaboración propia

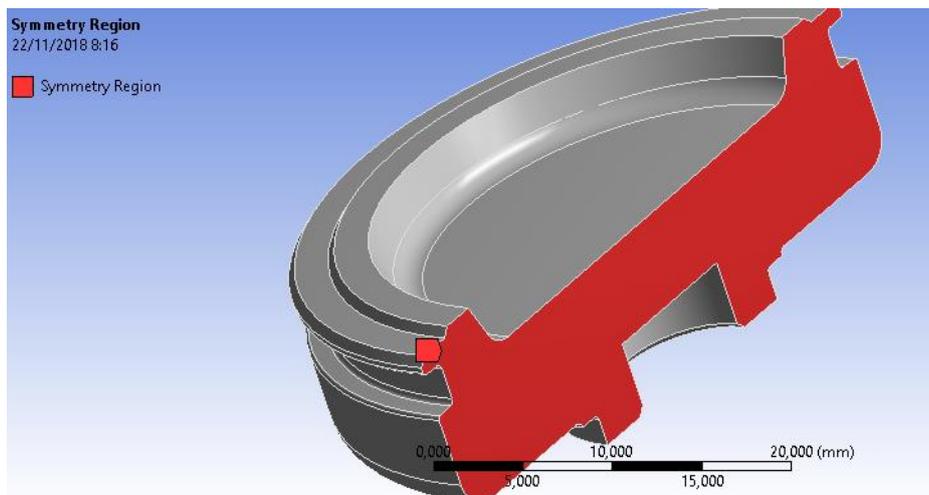


Figura 46. Simulación de celda de carga.  
Fuente: Elaboración propia

Luego se aplica la máxima fuerza a la que puede estar sometida la pieza, es decir 10 toneladas, Figura 47.

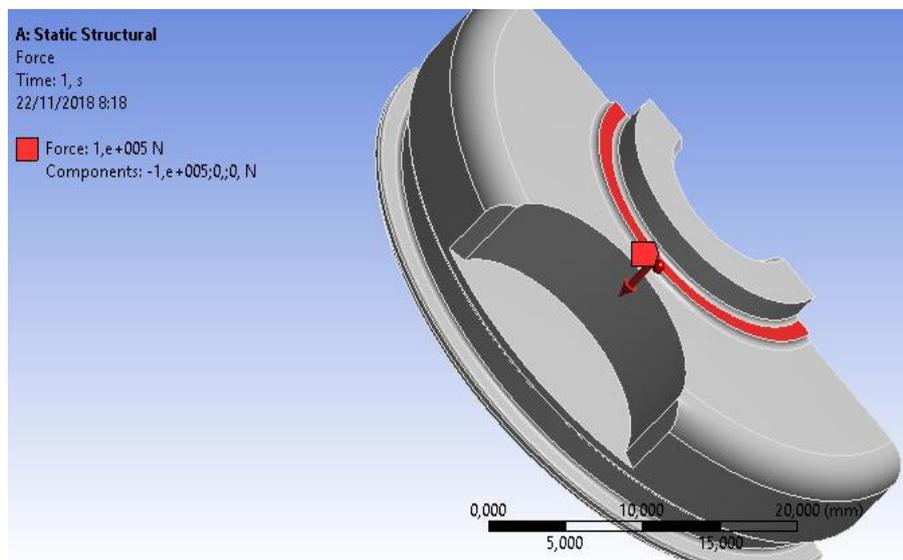
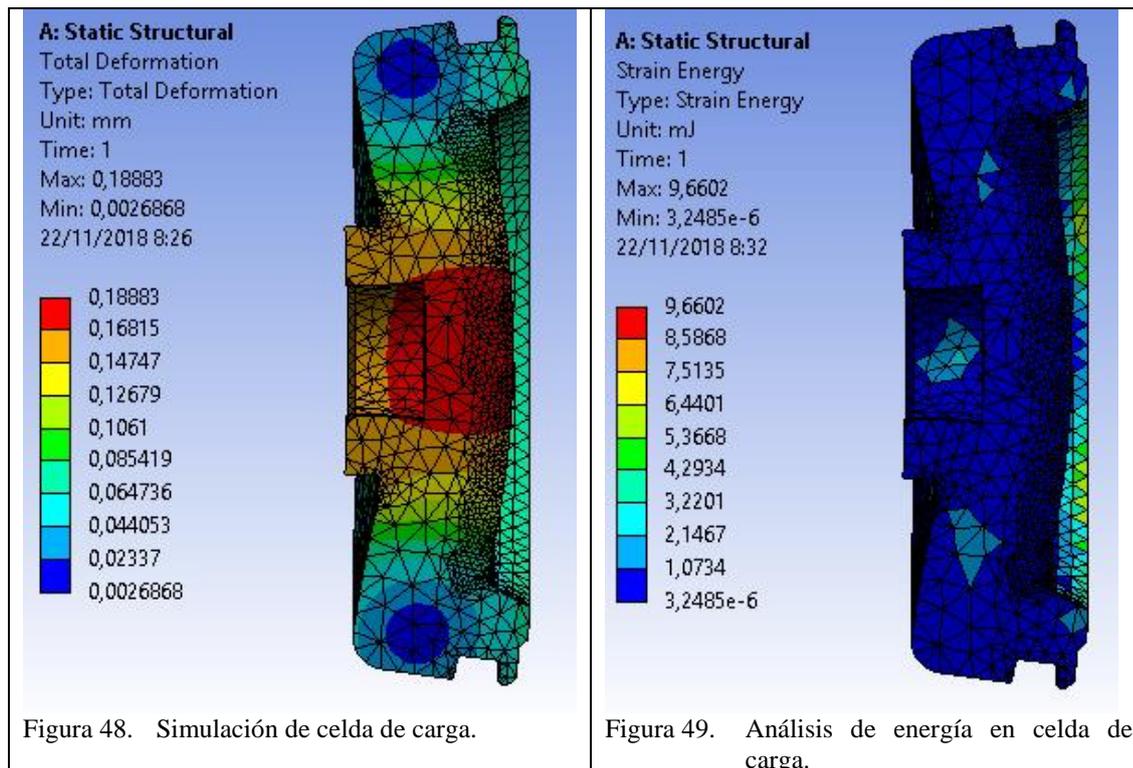


Figura 47. Simulación de celda de carga.  
Fuente: Elaboración propia.

Simulamos los desplazamientos y la energía, obteniendo los gráficos de las Figuras 48 y 49.



Fuente: Elaboración propia

En ansys se puede obtener los strain en tres direcciones coincidentes con los ejes X, Y, Z, sin embargo, el strain máximo que interesa está proyectado sobre la superficie y también puede ser radial, así que lo correcto es tomar los strain y luego proyectarlos en la superficie de las direcciones que se necesita analizar. Teniendo en cuenta que los desplazamientos perpendiculares a la superficie son muy pequeños, los desplazamientos proyectados en este eje también lo serán y por lo tanto se pueden despreciar.

Los resultados para los ejes paralelos al plano donde se colocarán los strain gauge, se muestran en las Figuras 50 y 51.

Debido a que se trata de una simulación, probablemente en la realidad no se lleguen a esos strain, pero será necesario que la pieza sea sometida previamente a la máxima fuerza a la que trabajará, para que en el peor de los casos modifique su máximo punto de plasticidad de tal forma que no ocurra un offset después de pegados los *strain gauge*.

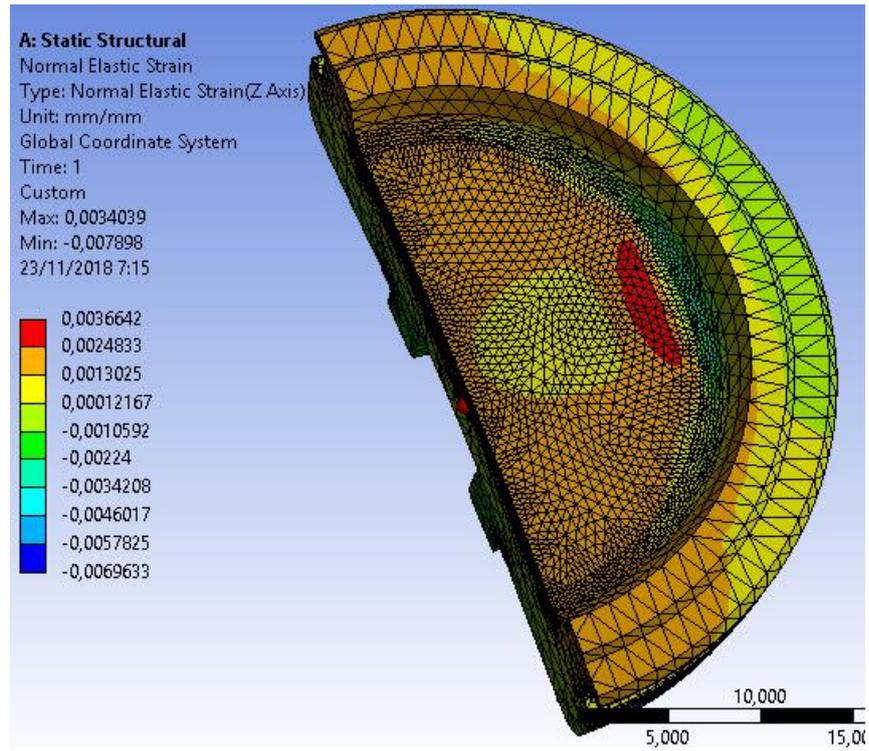


Figura 50. Strain en el eje Z  
 Fuente: Elaboración propia

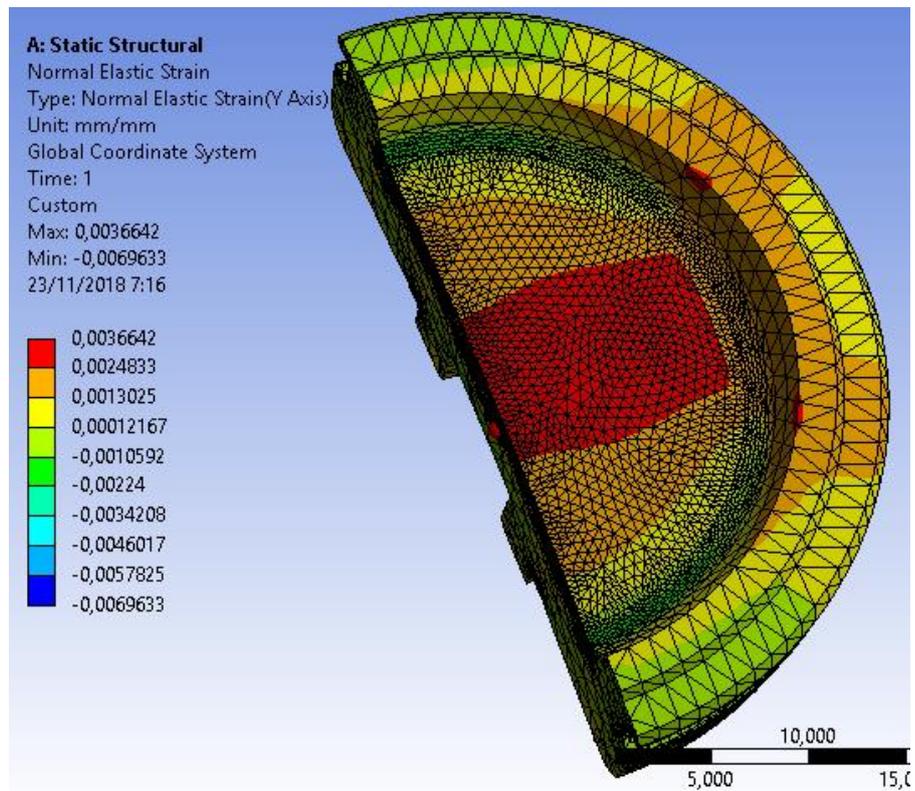


Figura 51. Strain en el eje Y.  
 Fuente: Elaboración propia

En la Figura 52 se presenta el diseño óptimo de los *strain gauge* para la celda de carga analizada. Este diseño de *strain gauge* tangenciales, permitirá que se aproveche mejor las deformaciones superficiales en la celda de carga.

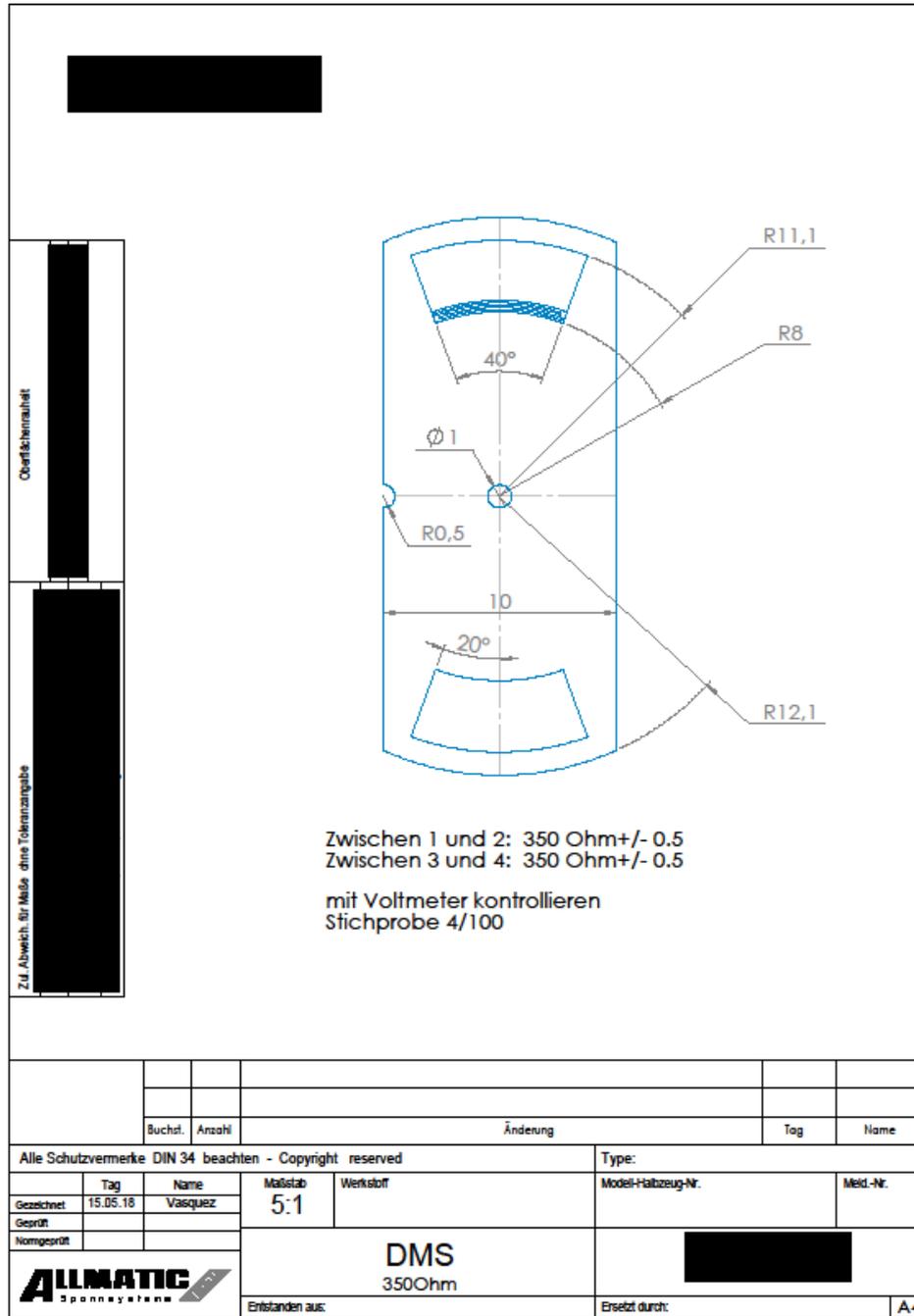


Figura 52. Planos de strain gauge  
Fuente: Elaboración propia

En la figura 53 y 54, se observa los strain gauges fabricados y luego pegados sobre la celda de carga. El proceso de pegado se hace con epoxy aplicándole fuerza mientras se cura a 80 grados centígrados durante dos horas. Al pegar con epoxy, este genera una capa entre el strain gauge y la celda de carga, esta capa debe de ser lo suficientemente fina como para garantizar su buen funcionamiento mecánico y que no amortigüe demasiado la dinámica de la deformación.



Figura 53. strain gauge

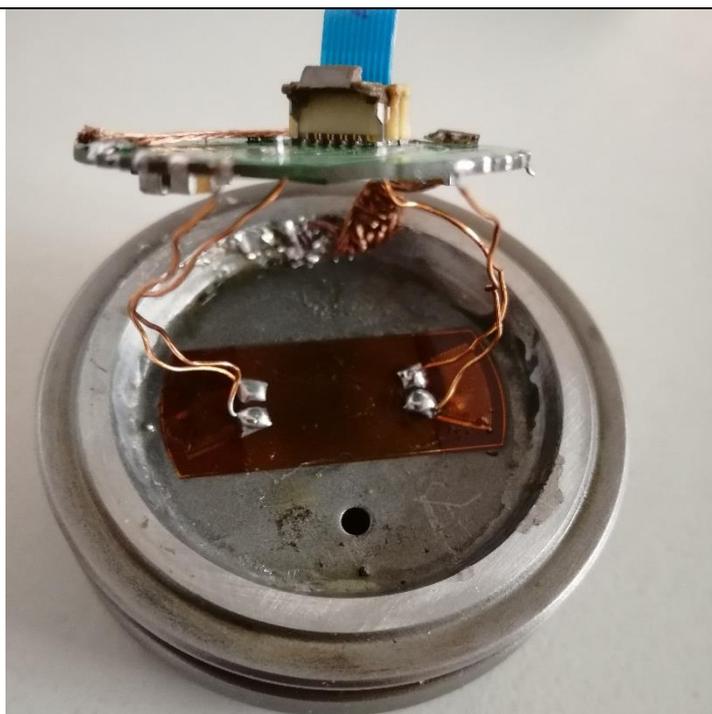


Figura 54. strain gauge instalado.

Fuente: Elaboración propia

Se mandaron a fabricar strain gauges con resistencias de  $350\ \Omega$  y de  $1k\Omega$ , las ventajas se muestran en la Tabla 1

Tabla 1. Diferencias strain gauges  $350\ \Omega$  y  $1000\ \Omega$ 

$\Omega$	Ruidos	Temperatura drift	Resistencia	Corriente
350	menos	más	menos	más
1000	más	menos	más	menos

Si bien, se obtiene mayor variación de resistencia con un strain gauge de mayor valor, el ruido que se obtiene es mayor. Se decide usar una de  $1000\ \Omega$  porque consume menos corriente.

### 3.1.2. Acondicionador – Transmisor

Convencionalmente para poder medir la variación de voltaje en un puente Wheatstone es necesario pasar por etapas de acondicionamiento y de filtrado. En caso de que el valor de las strein gauge se cambiara o el strain máximo en la superficie fuera otro, se presenta la desventaja de tener que cambiar las etapas de acondicionamiento con el fin de obtener toda la resolución posible del ADC. Debido a este inconveniente se ha optado por utilizar como principio de medición y acondicionamiento la tecnología time – digital converter (TDC), para esto se utiliza el chip PS09 PICOSTRAIN desarrollado por la empresa ACAM y fabricado por la

empresa AMS que incorpora la tecnología TDC (CPU - Single-chip solution for strain gauges, 2014), la Figura 55 muestra el diagrama de bloques del PS09.

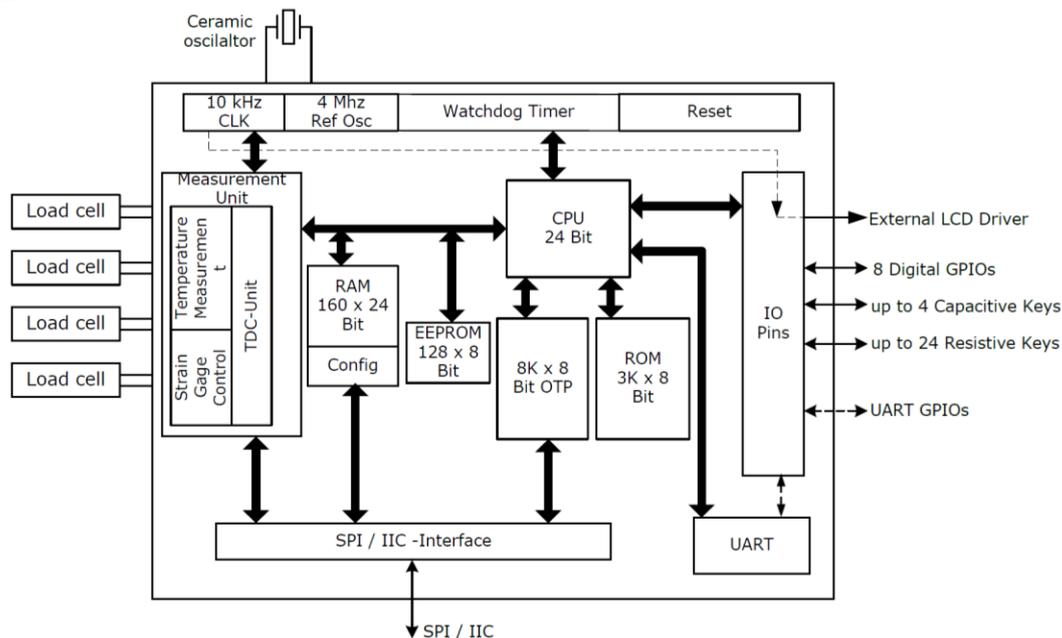


Figura 55. Diagrama de bloques PS09.

Fuente: <https://www.pmt-fl.com/picostrain/picostrain-ps09>

Las principales características del PS09 son las siguientes:

- RMS noise 11nV, 5Hz
- 24-bit internal microprocessor
- 4-wire serial SPI interface
- Current consumption  $\sim 200\mu\text{A}$ .
- Power supply voltage: 2.1V - 3.6V

El principio que utiliza el chip PS09 para medir la variación de resistencia de los strain gauge, montados sobre celda de carga Figura 54, difiere del sistema de medición clásico basado en el puente Wheatstone, explicado en el apartado 2.1.1. En el prototipo desarrollado el chip PS09 utiliza el arreglo de los *strain gauge* como se muestra en la Figura 56, es decir una configuración de puente completo (*full bridge*). En la configuración, las resistencias  $R + dR$  representan los strain gauge en modo tensión y las resistencias  $R - dR$  representan los strain gauge en modo compresión.

El chip PS09 utiliza la tecnología time – digital converter (TDC) para estimar la variación de la resistencia del puente completo. Midiendo el tiempo de descarga del condensador  $C_{load}$  a través de las resistencias  $R + dR$  y  $R - dR$ , Figura 56, se puede estimar la variación de las resistencias del puente y determinar la tensión o compresión a la que son sometidos los strains gauges.

El principio de medición del chip PS09 se basa en cargar el condensador  $C_{load}$  y luego descargarlo utilizando la resistencia de cada strain gauge, cada una en un tiempo diferente. La descarga se produce en el siguiente orden: primero con la resistencia que varía hacia negativo ( $R - dR$  morado) y posteriormente con la resistencia que varía hacia positivo ( $R + dR$  verde), luego procede a medir las otras dos resistencias del lado izquierdo empezando, como la primera vez, con la resistencia que varía hacia negativo y luego la que varía hacia positivo. La precisión con la que se miden los tiempos es de 15ps.

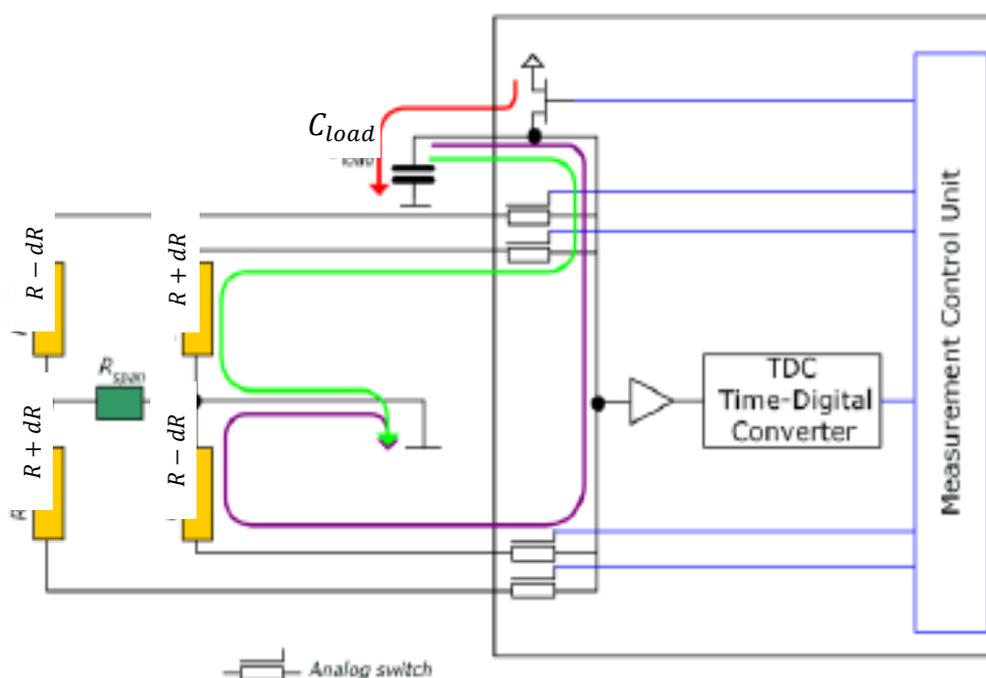


Figura 56. Principio de funcionamiento de chip PS09  
Fuente. Picostrain, 2012.

Para la fase de las pruebas de funcionamiento de sensor diseñado, se ha considerado medir solo deformaciones por tensión en la celda de carga. Se han utilizado los strains gauges montados sobre la celda de carga, Figura 54, para medir deformación positiva ( $R + dR$ ) en la celda de carga. Las deformaciones por compresión en la celda de carga no han sido consideradas y se ha procedido a remplazar los strains gauges que miden variación negativa  $R - dR$ , es decir compresión, por resistencias fijas. Para controlar la carga del condensador y sus respectivas descargas a través del puente completo las entradas del chip PS09 se unen de la siguiente manera: SG\_A1 con SG\_A2, SG\_B1 con SG\_B2, SG\_C1 con SG\_C2 y SG\_D1 con SG\_D2. Figura 57.

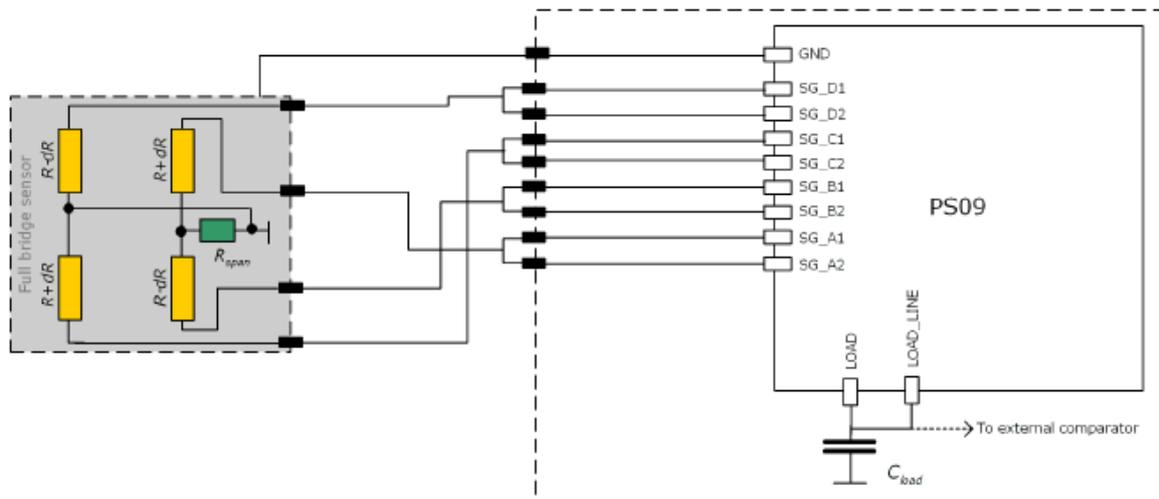


Figura 57. PS09: Configuración de puente completo  
Fuente: Picostrain, 2012.

Se puede apreciar en la Figura 58 la secuencia de tiempos de carga y descarga de un ciclo para una configuración de puente completo.

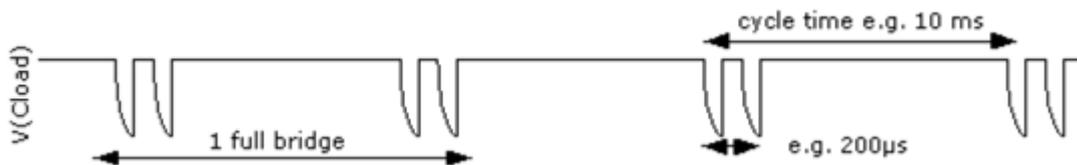


Figura 58. Ciclo de tiempos para puente completo  
Fuente: Picostrain, 2012.

La ventaja de esta tecnología permite que el sistema de medición desarrollado sea modular y reutilizable independiente de la celda de carga que se utilice; es decir, la electrónica de medición será siempre la misma, lo único que cambiaría, para guardar la proporción de los tiempos de descarga es el condensador  $C_{load}$ , cumpliendo la ecuación 3.1

$$70\mu s \leftrightarrow 150\mu s = 0.7 * R_{sg} * C_{load} \quad (3.1)$$

Los valores de la resistencia de strain gauge  $R_{sg}$  y el condensador  $C_{load}$  se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores de  $R_{sg}$  y  $C_{load}$

$R_{sg} = 350\Omega \rightarrow C_{load} = 300nF \text{ to } 400nF$
$R_{sg} = 1000\Omega \rightarrow C_{load} = 100nF \text{ to } 220nF$

Fuente: Picostrain, 2012.

En la Figura 59 se puede observar, que los valores de 50% del voltaje y 50% de corriente de descarga del condensador se logra en  $0.7T$  ( $T = R_{sg} * C_{Load}$ ).

El chip PS09 nos permite configurar a través de su puerto de comunicación SPI: el periodo de muestreo (entre 200us y 200 ms), el modo ahorro de energía (por interrupciones al 50% de la tensión de descarga), los diferentes arreglos de strain gauge y la compensación por temperatura. Utilizando el chip PS09 podemos optimizar espacio en el diseño de la tarjeta, utilizar menos energía que los puentes tradicionales y adaptar el sistema de medición a otros valores de strain gauge entre  $1000 \Omega - 350\Omega$ .

Haciendo uso de los strain gauge como parte de las resistencias del puente completo, Figura 30, el chip PS09 se encarga de estimar la fuerza a la que se encuentra sometida la celda de carga midiendo el tiempo de descarga del condensador  $C_{Load}$ . Relacionando el tiempo de descarga con las deformaciones del strain gauge el chip PS09 envía los raw values de la fuerza a través de su puerto de comunicaciones SPI.

Para el diseño del circuito impreso del sistema de medición, es muy importante filtrar adecuadamente la tensión de alimentación del chip PS09. Para eliminar las capacitancias parasitas es necesario que se una la tierra del circuito impreso con la masa de la celda de carga. La conexión de la tierra del circuito impreso se logra a través de los pernos de sujeción de la celda de carga con el circuito impreso, Figura 60.

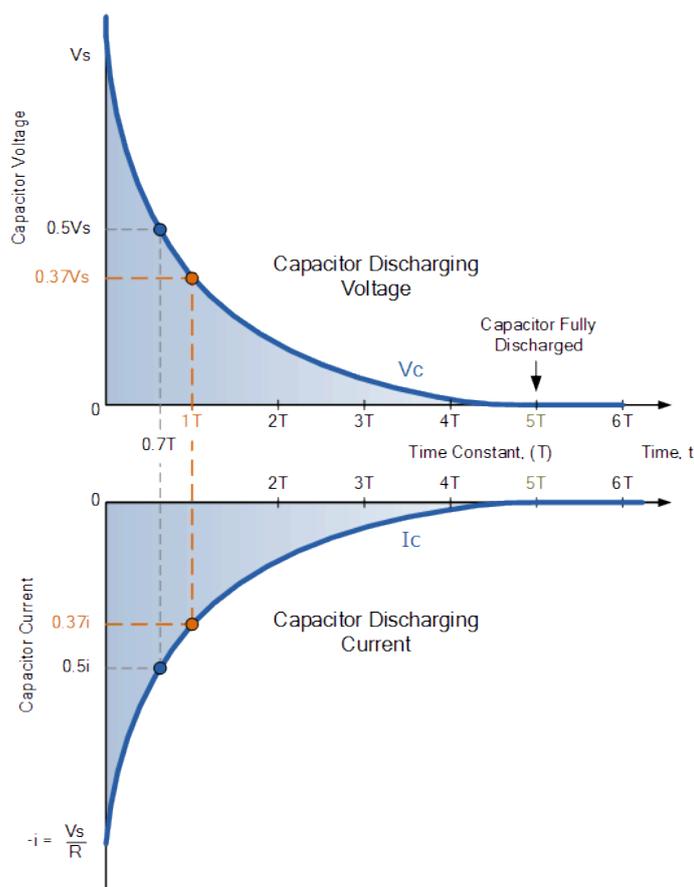


Figura 59. Gráfica de carga de un capacitor.

Fuente: [https://www.electronics-tutorials.ws/rc/rc\\_2.html](https://www.electronics-tutorials.ws/rc/rc_2.html)



Figura 60. Conexión de la tierra del circuito impreso con la celda de carga.  
Fuente: Elaboración propia

### 3.2. Sistema embebido: Hardware y software

Un sistema embebido se define como un dispositivo electrónico diseñado para cumplir una tarea específica. Normalmente estos dispositivos suelen ser más seguros, fiables y de bajo consumo de energía, debido al uso eficiente de los recursos.

#### 3.2.1. Descripción del hardware del prototipo

El prototipo desarrollado está compuesto por dos sistemas embebidos, uno para medición de fuerza que utiliza el chip PS09 y otro para procesamiento y comunicación Bluetooth basado en el MUC CC2640R2F. Los objetivos de diseño del prototipo son los siguientes:

- Bajo costo de fabricación.
- Lo más pequeños posibles.
- Montaje manual.
- Elementos electrónicos de bajo consumo de energía

Para el desarrollo del proyecto se decidió usar dos circuitos impresos de doble capa, a pesar que son más complejo de diseñar y probablemente se tenga que hacer pistas más largas, el costo de fabricación es aproximadamente siete veces más barato que si se utiliza circuitos impresos de cuatro capas.

En el diseño de los circuitos impresos se tomaron en cuenta los siguientes puntos.

#### Separación entre las vías.

En el diseño de un circuito impreso se utilizan vías para cambiar de una capa a otra, es muy importante tener en cuenta el comportamiento eléctrico de las vías cuando se trabaja en altas frecuencias ya que pueden utilizar para crear una suerte de barrera de Faraday.

Para lograr el efecto de Jaula de Faraday es importante determinar una separación teórica de las vías (Steve Hageman, 2013). El espaciamiento de las vías tiene que ser menor a la máxima longitud de onda prevista en el diseño del circuito

impreso, ecuación (3.1). Como regla empírica se toma  $\frac{1}{4}$  de la longitud de onda de espaciado para obtener una buena atenuación de la señal, mientras sea menor es mejor.

$$\lambda = \frac{V_l}{F\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.1)$$

Para

$V_l = 300.000$  Km/s. Velocidad de la luz

$F = 2.45$  Ghz. Frecuencia de transmisión

$\epsilon_r = 4.58$ . Constante dieléctrica del circuito impreso

La longitud de onda es  $\lambda = 57.22$  mm.

Por lo tanto, la máxima separación de vías para atenuar 2.45Ghz es de 14.3 mm, tomando como referencia  $\frac{1}{4}$  de la longitud de onda ( $\lambda = 57.22$ mm). Por otro lado, siendo el ancho del circuito impreso de 1,6mm y este es menor a 14.3 mm, evitará que la onda se disipe transversalmente por el material del impreso (Steve Hageman, 2013).

#### Ancho de las pistas.

Las pistas tendrán una altura de 35um correspondiente a una onza de cobre, luego, el ancho, el largo y su posición en el circuito impreso modificarán su impedancia. Para el caso donde las potencias y las frecuencias de las placas son muy bajas, solo nos importa el ancho de las pistas. Cuando las frecuencias son altas nos interesara también la separación de las pistas con los planos a tierra.

#### Montaje de los condensadores.

El principal objetivo de los condensadores de desacoplo, aparte de estabilizar el voltaje, es filtrar ruidos de alta frecuencia, manteniendo una baja impedancia a tierra para frecuencias altas. Es común que se usen condensadores de 1uF para estos fines. Es necesario mencionar que el trazado de las pistas en el circuito impreso es importante y sus efectos no son despreciables.

En la Figura 61 se puede observar el diagrama eléctrico equivalente de la conexión de un capacitor de desacoplo (Noise Suppression Products/EMI Suppression Filters).

En la Figura 62 se hace una comparación entre las conexiones de un condensador de desacoplo a la fuente de alimentación. Se sugiere la opción (a) a la

opción (b) para lograr un adecuado filtrado (*IC power pin connection for noise immunity and decoupling*). Como se trata de un sistema real, el lugar dónde se conecta el condensador afecta al filtrado, aunque matemáticamente se considere el mismo nodo.

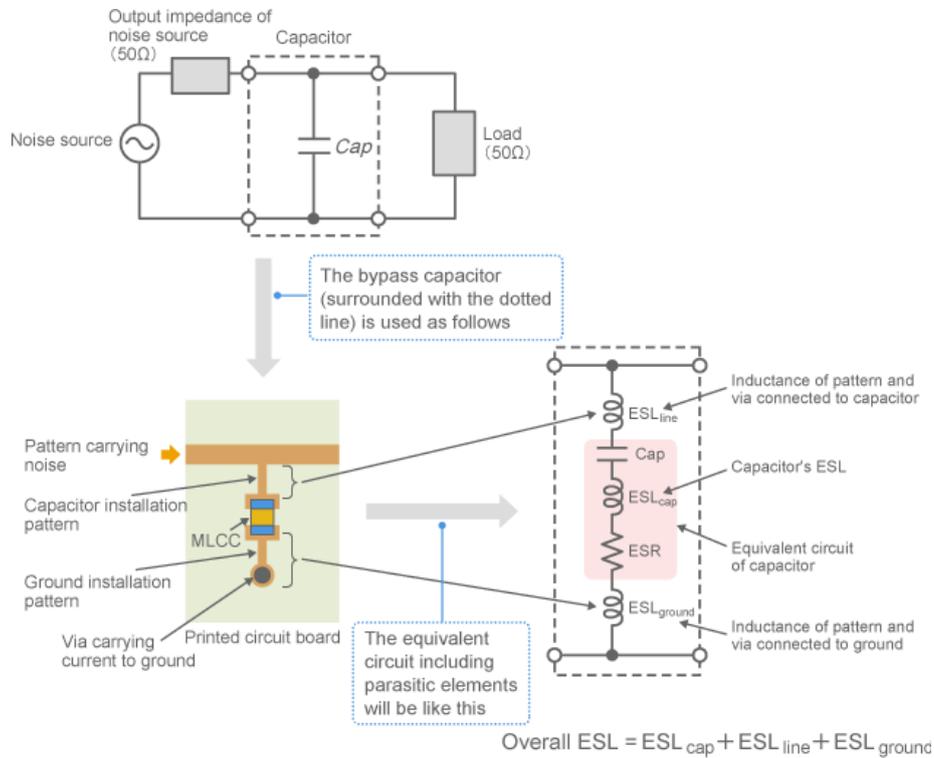


Figura 61. Esquema capacitor.

Fuente: Noise Suppression Products/EMI Suppression Filters.

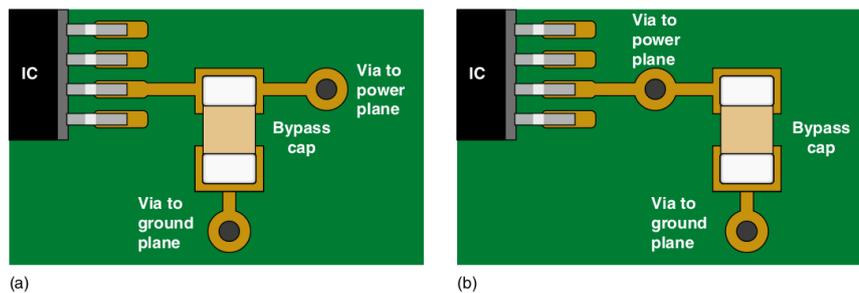


Figura 62. Conexión de un condensador de desacoplo

Fuente: IC power pin connection for noise immunity and decoupling,

Para la selección de los capacitores se necesita saber su comportamiento a altas frecuencias, esto se encuentra normalmente en las hojas de datos de los condensadores. Aquellos que son diseñados especialmente para funcionar como desacopladores tienen como característica un valor bajo de impedancia equivalente en serie, como se muestra en la Figura 63.

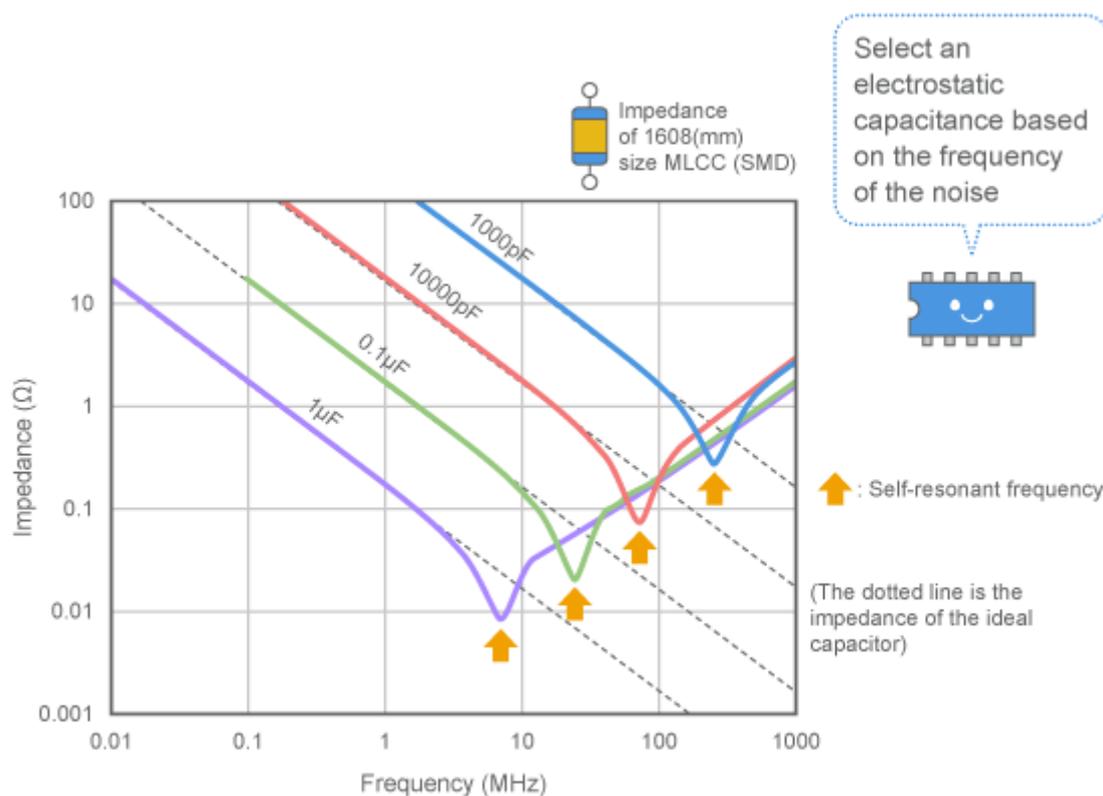


Figura 63. Impedancia Vs frecuencia  
Fuente: Noise Suppression Products/EMI Suppression Filters,

### Osciladores:

El cristal de cuarzo es un elemento que funciona bajo el principio piezoeléctrico para generar una oscilación a una frecuencia determinada, se utiliza para el funcionamiento del microcontrolador. El modelo eléctrico de un cristal de cuarzo se representa en la Figura 64 (James Murdock and Danielle Griffith, 2017).

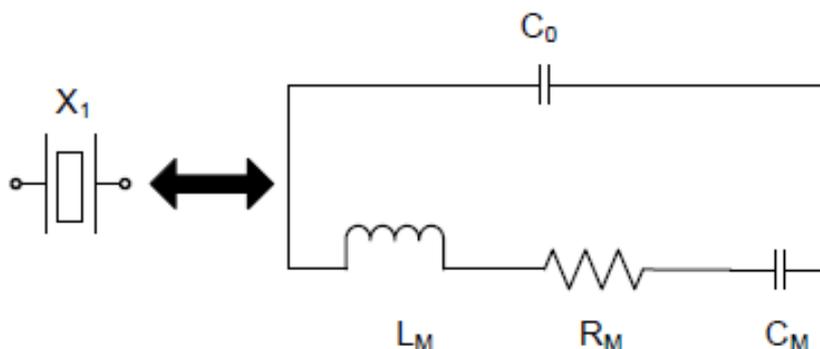


Figura 64. Diagrama eléctrico de un cristal de cuarzo.  
Fuente: Texas instruments, Crystal Oscillator and Crystal Selection for the CC26xx

Donde:

$C_0 =$  Capacitancia parásita por el diseño mecánico.

$L_M =$  Inductancia dinámica

$R_M =$  Resistencia dinámica

$C_M =$  Capacitancia dinámica

Un cristal de cuarzo tiene dos frecuencias de oscilación según:

Frecuencia de resonancia en serie,  $f_s$ .

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_M C_M}} \quad (3.6)$$

Cuando el cristal funciona a la frecuencia de resonancia la impedancia es mínima y la corriente máxima, esto ocurre porque  $X_{LM} = X_{CM}$  y teóricamente se cancelan.

Frecuencia de anti resonancia  $f_a$ .

$$f_a = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 \frac{C_M C_0}{C_M + C_0}}} \quad (3.7)$$

Cuando el cristal funciona a la frecuencia de anti resonancia la impedancia es máxima y la corriente mínima. La frecuencia de funcionamiento que se encuentra en la hoja de datos está entre estas dos frecuencias y se puede ajustar con los condensadores de carga que se colocan en paralelo en el circuito.

### Sintonización de cristal

Cuando se agrega un condensador de carga  $C_L$  en paralelo al cristal de cuarzo, la capacitancia del sistema cambia y la frecuencia a la que oscilará el cristal también. La fórmula es la siguiente (3.8):

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_M \frac{C_M(C_0 + C_L)}{C_M + (C_0 + C_L)}}} \approx f_s \left(1 + \frac{C_M}{2(C_0 + C_L)}\right) \quad (3.8)$$

Por lo tanto  $f_s < f_o < f_a$ .

### Diseño del circuito impreso:

A continuación, se explicarán los puntos más importantes del diseño de los dos circuitos impresos (medición y transmisión Bluetooth)

En la Figura 65 se puede apreciar una imagen del diagrama del circuito electrónico que corresponde al sistema de medición, Anexo I. Lo más importante en el diseño de este circuito impreso es la unión entre las tierras analógicas con las digitales. En este caso se ha considerado un diseño en estrella, todas las tierras analógicas se unen en un solo punto, y este se conecta a la tierra que entra al circuito impreso. Para las tierras digitales se sigue el mismo concepto. Las tierras analógicas y digitales se unen en un solo punto. Se usó una mínima cantidad de vías con el fin de controlar las probables recirculaciones de corriente causantes de ruidos.

Solo existe un plano de tierra en una de las caras, Figura 66, la razón es para no generar capacitancias parasitas, este plano a tierra también funciona como shield y protege las pistas de ruidos externos. La cara del circuito impreso que no tiene tierra, Figuras 67 y 68, estará dentro de la celda de carga, por lo tanto, tampoco estará expuesto a ruidos externos.

Debido al principio de funcionamiento del chip PS09 explicado en capítulos anteriores, es necesario utilizar un condensador de tipo COG para  $C_{load}$ , así como condensadores de tantalum para los filtros. También será importante la elección de transistores de bajo ruido eléctrico.

En la Figura 69 se puede apreciar una imagen del diagrama electrónico del circuito del sistema de comunicación Bluetooth, Anexo II. Para el montaje del circuito impreso usamos condensadores de desacoplo de 0,1uF comerciales, sin especificación alguna y una ferrita para filtrar los armónicos de alta frecuencia en la corriente de entrada y vías para hacer un efecto de jaula Faraday.

Se recomienda que los cristales de cuarzo de 32.768 KHz sean de tipo X7R sin más requerimiento.

El cristal de cuarzo de 24 MHz, tendrá que estar lo más cerca del chip y no usará capacitancias, debido a que chip cuenta ya con capacitancias internas que se pueden programar, por defecto están configuradas a 9pF. Por lo tanto, el cristal oscilará con una capacitancia de carga de 9 pF.

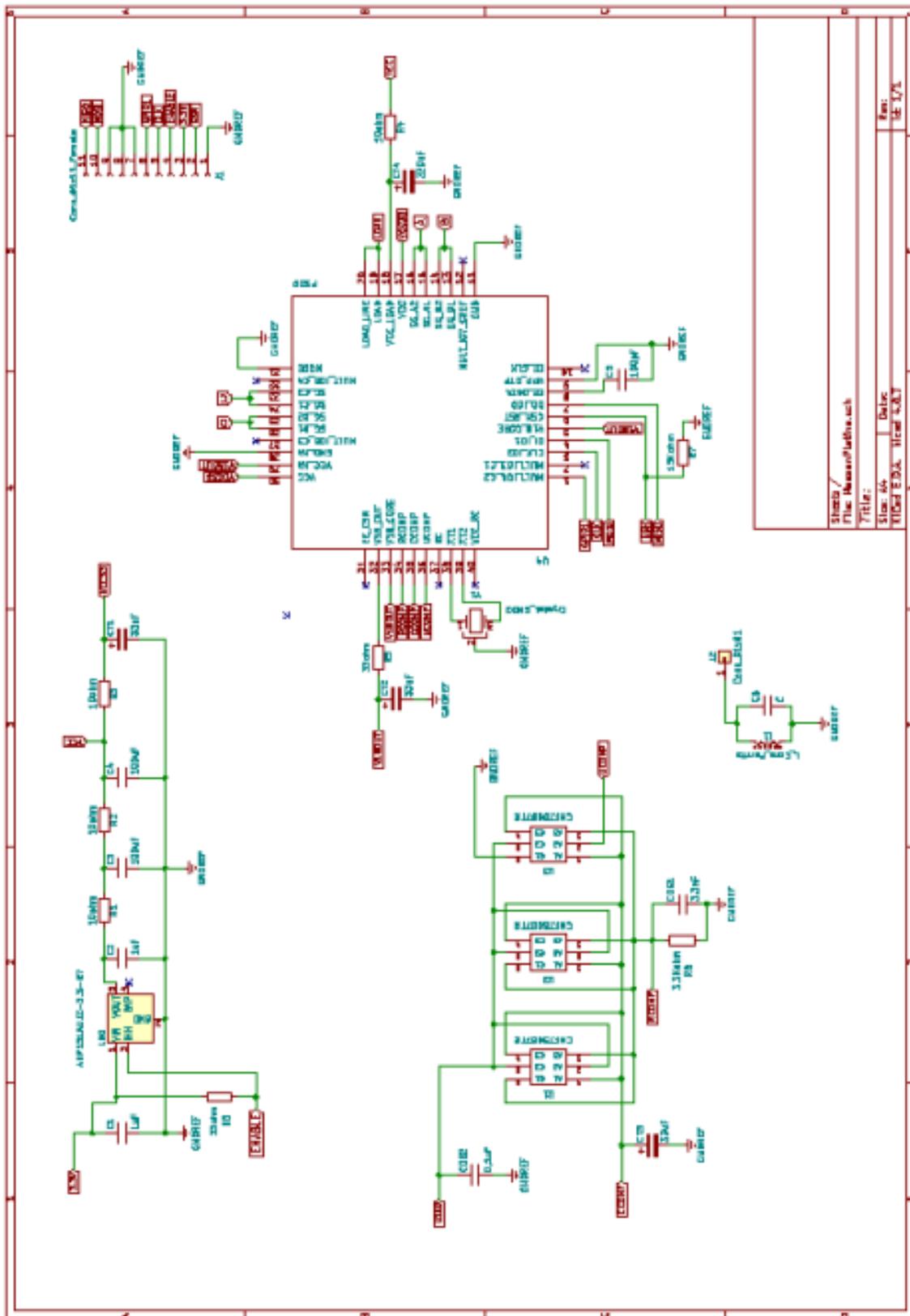


Figura 65. Diagrama electrónico del sistema de medición.  
Fuente: propia.

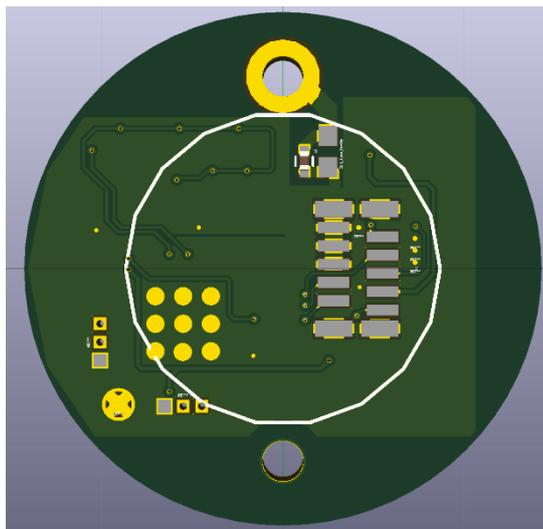


Figura 66. Circuito impreso de medición, Simulación en 3D.  
Fuente: Elaboración propia

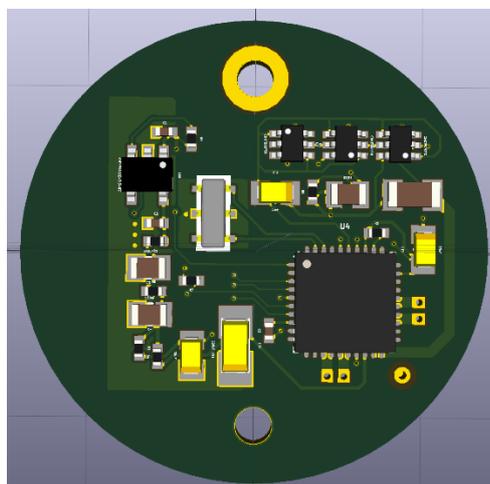


Figura 67. Circuito impreso de medición, Simulación en 3D.  
Fuente: Elaboración propia

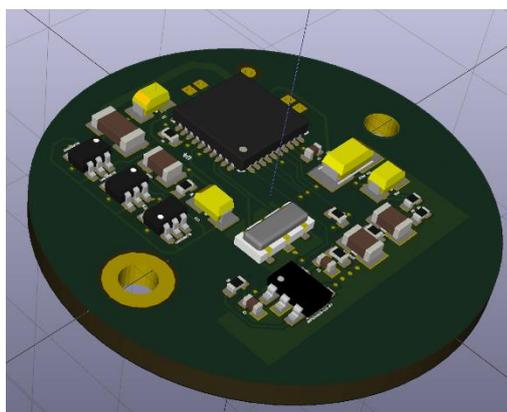


Figura 68. Circuito impreso de medición, Simulación en 3D.  
Fuente: Elaboración propia



La distancia entre el balun y el chip debe de ser menor a un milímetro, luego el grosor de la pista y la distancia hacia la tierra debe de ser calculada, puesto que a altas frecuencias la impedancia sí importa, para la pista de conexión a la antena se ha considerado 50 Ohm. Para esta tarea se suele usar programas de diseño de circuitos impresos, en el presente proyecto se ha utilizado la herramienta de KICAD, Figura 70.

Los datos del material de la placa del circuito impreso, FR4, que son necesarios para ingresar a la herramienta de diseño como parámetros del sustrato se obtienen del fabricante.

Parámetros sustrato:		Parámetros físicos	
Er	4,58	W	0,5 mm
TanD	0,022	S	0,122294 mm
Rho	1,72e-008	L	0,5 mm
H	0,6 mm	<input type="button" value="Analizar"/> <input type="button" value="Sintetizar"/>	
T	0,0347 mm	Parámetros eléctricos:	
mu Rel C	1	Z0	50 Ohm
		Ang_I	0,0381875 Radian
Parámetros componente:		Resultados:	
Frecuencia	2,4 GHz	ErEff	2,30548
		Pérdidas del conductor	0,00107286 dB
		Pérdidas dieléctricas	0,00264314 dB
		Profundidad de la piel	1,34734 um

Figura 70. Kicad parámetros de la placa

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 71, se observa las características geométricas de la pista que se quiere diseñar, estos datos son las respectivas distancias de la pista con los planos de tierra. Los valores de las distancias quedan determinados como parámetros del sustrato y parámetros físicos de placa utilizada para el circuito impreso, Figura 3.30.

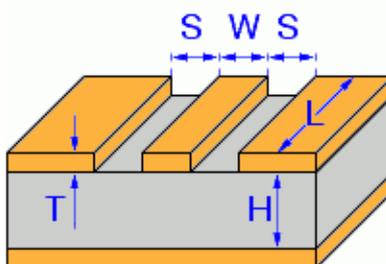


Figura 71. Características de la pista.

Fuente: Elaboración propia.

Se puede apreciar en la Figura 72, la vista posterior de la platina Bluetooth, en la Figura 73, la vista isométrica y en la Figura 74, la vista frontal.

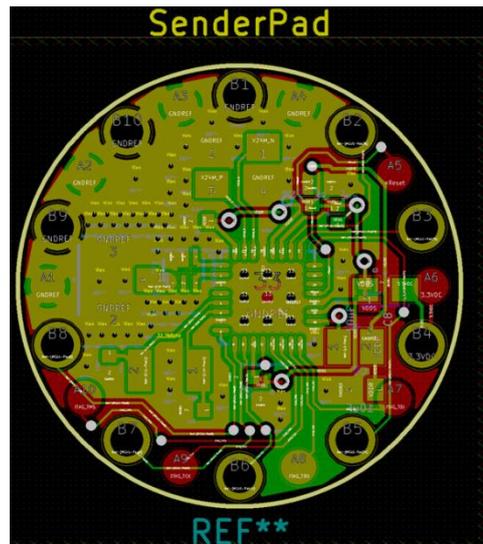


Figura 72. Circuito impreso Bluetooth.  
Fuente: Elaboración propia.

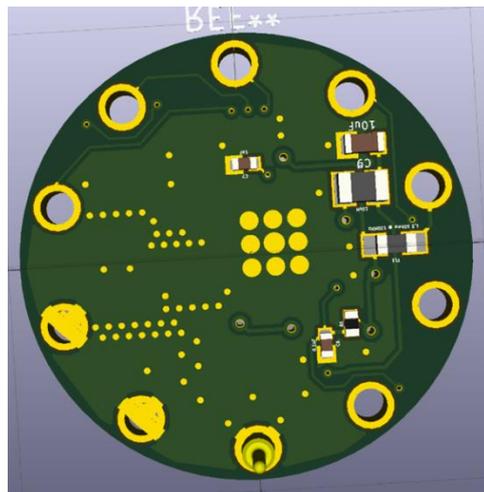


Figura 73. Circuito impreso Bluetooth.  
Fuente: Elaboración propia.

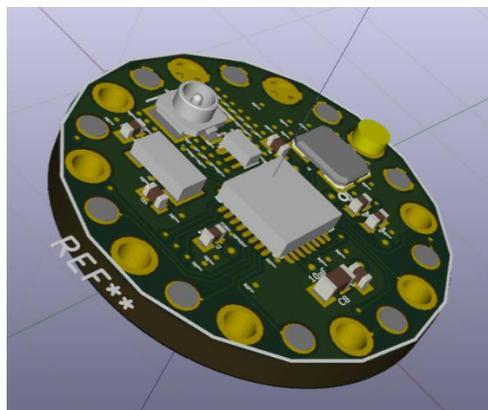


Figura 74. Circuito impreso Bluetooth.  
Fuente: Elaboración propia.

### 3.3. Descripción del software de programación del Prototipo

Los chips de Texas Instruments se programan usualmente en *Code Composer Studio* (CCS), un ambiente de desarrollo de aplicaciones para embebidos. CCS tiene diversas herramientas gráficas para generar código. También posee la capacidad de observar el paralelismo de tareas.

El software desarrollado se ejecuta en un sistema operativo real time, TI-RTOS, diseñado por Texas Instruments, con el fin de llevar a cabo tareas en paralelo y otras cuasi en paralelo.

Para desarrollar el código que levanta el servidor Bluetooth del chip CC2640R2F se utiliza una herramienta gráfica, *Bluetooth Developer Studio* (BDS), desarrollado por *The Bluetooth Special Interest Group* (SIG). En la Figura 75 se muestra la plataforma de desarrollo BDS.

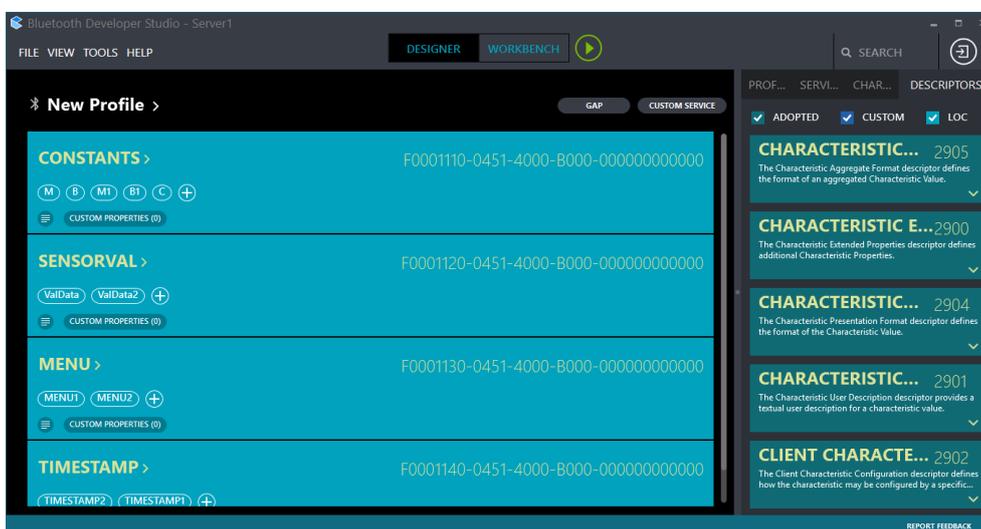


Figura 75. Bluetooth Developer Studio  
Fuente: Elaboración propia.

El servidor Bluetooth debe ser diseñado de acuerdo a la aplicación, determinado el tamaño de variables, sus modos de operación: escritura, lectura, notificación, etc. Esto se logra utilizando códigos de configuración a través de comandos AT entre el CPU principal (ARM Cortex M3) y el RF Core (ARM Cortex M0) del chip CC2640R2F.

En la Figura 76 se presentan las tres tareas que se ejecutan en paralelo y corresponden al programa para medir la fuerza sobre la celda de carga realizado como parte del desarrollo del prototipo clamp assist.

```
GAProle_createTask();
ProjectZero_createTask();
Tmp007_createTask();
```

Figura 76. Las tres tareas, que se ejecutan en paralelo.  
Fuente: Elaboración propia.

El framework de las dos tareas iniciales, “GAPRole” y “ProjectZero”, son creadas con la herramienta *Bluetooth Developer Studio* (BDS) y son necesarias para configurar y gestionar el servidor *Bluetooth*. La tercera tarea “Tmp007” corresponde al programa para la medición de la fuerza sobre la celda de carga, estableciendo las comunicaciones correspondientes (SPI y *Bluetooth*) y la ejecución de las rutinas de operación del sistema.

El programa de aplicación Temp007 está formado por varias subrutinas.

En la Figura 77 se muestra el código que corresponde a la rutina almacenamiento de 251 datos de 64 bits en la memoria del chip principal, AMR Cortex M3.

```
uint32_t addr = 0x0001d010;
int i1 = 1;
uint32_t data44 = 0x11223344;
uint32_t data45 = 0x22334455;

do{

FlashProgram(&data44,addr,sizeof(data44));

addr = addr + 0x00000004;
FlashProgram(&data45,addr,sizeof(data45));
addr = addr + 0x00000004;

i1 = i1 + 1;

}while(i1 <= 251 );
```

Figura 77. Prueba de memoria.  
Fuente: Elaboración propia.

La rutina de configuración del RTC (*real time clock*) se muestra en la Figura 78. EL RTC utiliza el formato “Tiempo Unix”, es una forma de representar el tiempo, que considera los segundos transcurridos desde la media noche de 1970. Hay que tener en cuenta que el tipo de variable usada para almacenar este valor es usualmente 32bits y no tiene espacio infinito, por lo tanto, habrá un tiempo máximo que podrá almacenar. A este efecto se le llama “año 2038” en el cual varios equipos que no sean “parchados” colapsaran.

```
UInt key;
Error_init(&eb);
readEvent = Event_create(NULL, &eb);
UTC_init();
time = 1533204188;
UTC_setClock(time);
Menu1 = 0X3300;
```

Figura 78. Configuración de tiempo.  
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 79 se muestra la rutina que permite escribir el tiempo en formato Tiempo Unix en el sistema embebido, prototipo desarrollado, desde un dispositivo externo con comunicación *Bluetooth* para calcular la fecha y la hora. Como podemos observar para configurar el reloj primero se debe hacer un swap (permutación de datos).

```

PIN_setOutputValue(hLedPins, CC2640R2DK_4XS_PIN_LED1 , 1);
uint32_t c;
Event_pend(readEvent, Event_Id_NONE, Event_Id_00, BIOS_WAIT_FOREVER);
Timestamp_GetParameter( T_TIMESTAMP1_ID, &value16, &c );

uint16_t a, b;

a = (uint16_t) ((c>> 16) & 0x0000FFFF);
b = (uint16_t) (c & 0x0000FFFF);

a = ((a >> 8) & 0x00ff) + ((a << 8) & 0xff00 );
b = ((b >> 8) & 0x00ff) + ((b << 8) & 0xff00 );
time = (b<<16)|a;

UTC_setClock(time);

PIN_setOutputValue(hLedPins, CC2640R2DK_4XS_PIN_LED1 , 0);
PIN_setOutputValue(hLedPins, CC2640R2DK_4XS_PIN_LED2 , 0);

Menu1 = 0x4000;
Menu1 = ((Menu1 >> 8) & 0x00ff) + ((Menu1<< 8) & 0xff00 );//
Menu_SetParameter(M_MENU1_ID, M_MENU1_LEN_MIN, &Menu1 );

```

Figura 79. Configuración de reloj desde un dispositivo externo  
Fuente: Elaboración propia.

Las instrucciones de la Figura 80, pertenecen a la configuración del protocolo SPI que se utiliza para la comunicación entre el chip CC2640R2F y el chip PS09, el cual trabaja a 5Khz.

```

SPI_init();
SPI_Params_init(&params);

params.bitRate      = 5000;
params.frameFormat  = SPI_POL0_PHA1;
params.dataSize     = 8;
params.mode         = SPI_MASTER;
//params.transferMode = SPI_MODE_CALLBACK;
handle56 = SPI_open(Board_SPI0, &params);

```

Figura 80. Configuración de puerto SPI.  
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 81 corresponde a la rutina de lectura de la dirección 0x10 de la memoria del chip PS09, donde se almacena el valor de la fuerza sobre la celda de carga. La secuencia que se muestra es la necesaria para leer sus direcciones de memoria y se describe en la hoja de datos del chip PS09.

```

PIN_setOutputValue(hLedPins, CC2640R2DK_4XS_PIN_LED3 , 1);
Task_sleep(2);
PIN_setOutputValue(hLedPins, CC2640R2DK_4XS_PIN_LED3 , 0);
Task_sleep(10);
txBuf[0] = 0x40;
transaction.count = 1;
transaction.txBuf = txBuf;
transaction.rxBuf = NULL;
SPI_transfer(handle56, &transaction);

txBuf[0] = 0x10;
transaction.count = 1;
transaction.txBuf = txBuf;
transaction.rxBuf = NULL;
SPI_transfer(handle56, &transaction);

transaction.count = 3;
transaction.txBuf = NULL;
transaction.rxBuf = rxBuf;
int resp = SPI_transfer(handle56, &transaction);

```

Figura 81. Protocolo para iniciar comunicación con el módulo de medición.  
Fuente: Elaboración propia.

Tras la lectura de la fuerza sobre la celda de carga desde el PS09, el dato se guarda en una variable llamada temperatura para luego ser asignada a la variable force, a continuación, se hace un swap y se almacena el resultado en la variable c2. La actualización del dato que se transmite por Bluetooth Low Energy (BLE) se hace a través de la característica Sensorval que se muestra en la Figura 82.

```

if (resp) {

key = Hwi_disable();
temperature = (rxBuf[0]<<16) | (rxBuf[1]<<8) | (rxBuf[2]);
//temperature = rxBuf[1];

//force = temperature*m2 + b2;
force = temperature;

uint16_t a, b;
uint32_t c2;

a = (uint16_t) ((force >> 16) & 0x0000FFFF);
b = (uint16_t) (force & 0x0000FFFF);

a = ((a >> 8) & 0x00ff) + ((a << 8) & 0xff00 );
b = ((b >> 8) & 0x00ff) + ((b << 8) & 0xff00 );
c2 = (b<<16)|a;
//c2 = temperature;

Sensorval_SetParameter( S_VALDATA_ID, S_VALDATA_LEN_MIN, &c2 );
Hwi_restore(key);
}

PIN_setOutputValue(hLedPins, CC2640R2DK_4XS_PIN_LED2 , 0);
Task_sleep(50000);
Menu_GetParameter(M_MENU1_ID, &value15 , &Menu1 );
Menu1 = ((Menu1 >> 8) & 0x00ff) + ((Menu1<< 8) & 0xff00 );//

} while(Menu1 == 0x3400);

```

Figura 82. Visualización de la variable leída.  
Fuente: Elaboración propia.

## Capítulo 4

### Pruebas de funcionamiento

En el presente capítulo se describen las distintas pruebas de funcionamiento que se le realizaron al prototipo *clamp assist* para validar su operación.

#### 4.1. Resultados de Hardware

Se puede observar en la Figura 83 el circuito impreso de medición luego de soldar los elementos electrónicos y en la Figura 84 se observa el circuito impreso montado en la celda de carga.

Como se puede observar el PCB cabe perfecta mente dentro de la celda de carga y luego de hacer pruebas de continuidad entre la tierra del circuito y la celda de carga, dio como resultado un buen contacto. Por lo tanto, en cuanto a factor de forma, el circuito impreso, cumple las especificaciones.

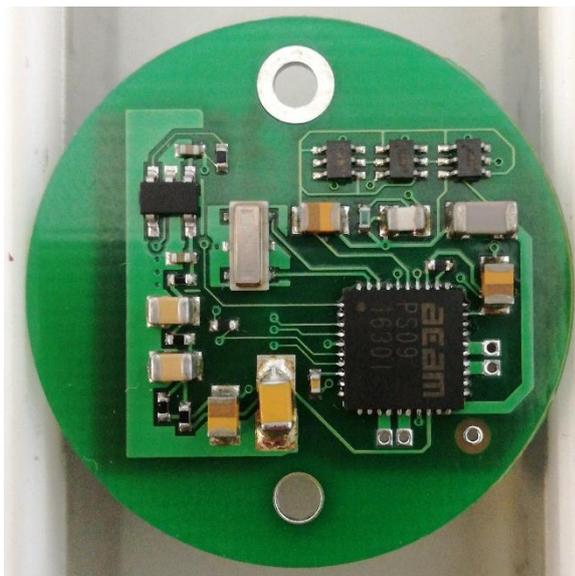


Figura 83. Circuito impreso de medición.  
Fuente: Elaboración propia.



Figura 84. Circuito impreso de medición colocado en la celda de carga.  
Fuente: Elaboración propia.

En las Figuras 85 y 86 se puede observar el circuito impreso Bluetooth y en las Figuras 87 y 88 un circuito impreso necesario para conectar los pines del circuito impreso Bluetooth con un conector de cable estándar.

Los factores de forma de los circuitos impresos tienen los diámetros requeridos para insertarse dentro del husillo y entre los dos circuitos impresos hay buen contacto.

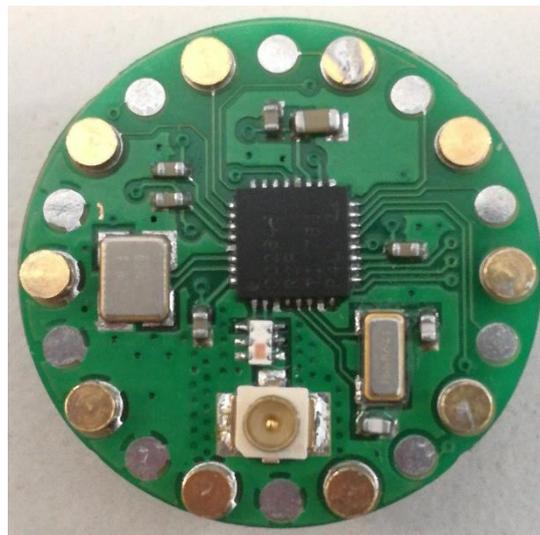


Figura 85. Vista frontal del circuito impreso Bluetooth.  
Fuente: Elaboración propia.

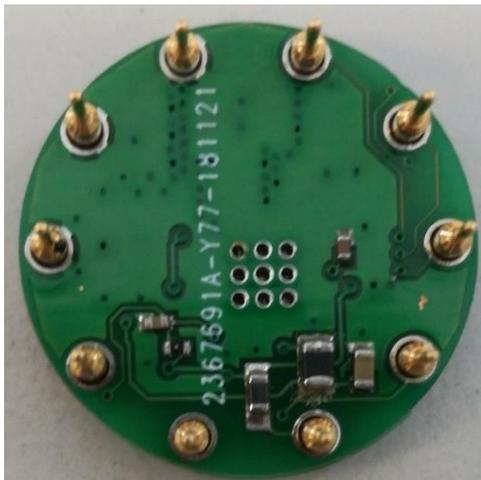


Figura 86. Vista posterior del circuito impreso Bluetooth.  
Fuente: Elaboración propia.

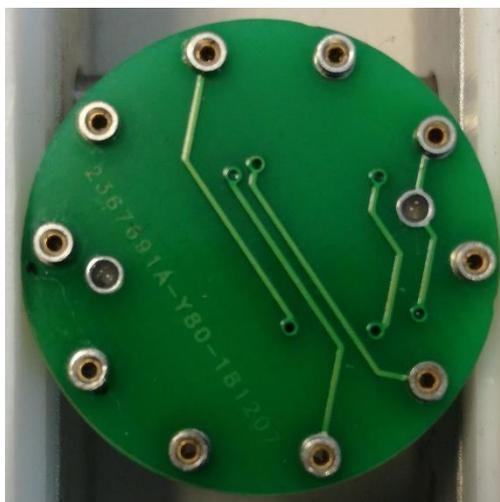


Figura 87. Vista frontal del circuito impreso necesario para conexión.  
Fuente: Elaboración propia.



Figura 88. Vista posterior del circuito impreso necesario para conexión.  
Fuente: Elaboración propia.

En la Figure 89 se puede observar la antena montada y conectada al circuito de comunicación Bluetooth. El sistema *clamp assist* diseñado y construido listo para montarse dentro del husillo se muestra en la Figura 90. Se puede observar el modularidad del sistema desarrollado a diferencia del *clamp assist* de Allmatic y Tecnotron mostrado en la Figura 2, cumpliendo con el objetivo previsto.

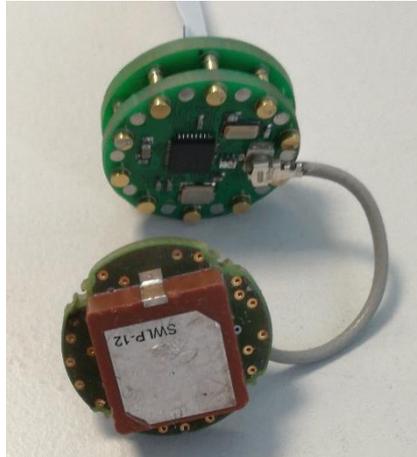


Figura 89. Antena conectada al circuito impreso Bluetooth.  
Fuente: Elaboración propia.



Figura 90. Sistema Clamp Assist.  
Fuente: Elaboración propia.

El *clamp assist* se monta dentro del husillo o *spindle* tal como se muestra en la Figura 91.

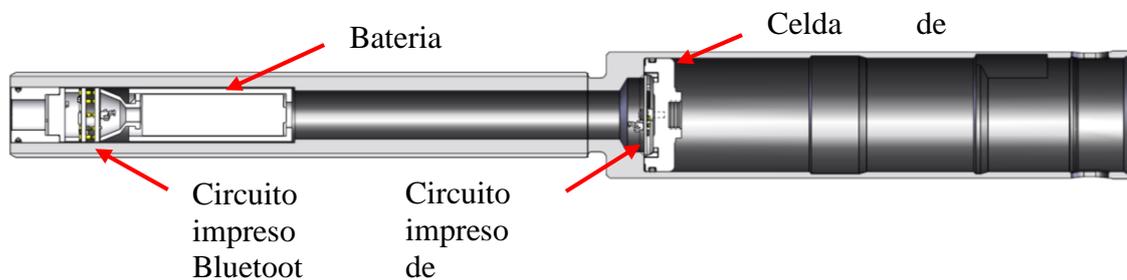


Figura 91. Modelo 3D del sistema Clamp Assist dentro del Husillo.  
Fuente: Elaboración propia.

## 4.2. Pruebas de medición de fuerza

Se procederá a medir la fuerza con un instrumento certificado, este valor será la referencia del experimento, el sensor diseñado en esta tesis se colocó dentro de una mordaza. La celda de carga del sensor cuenta solo con strein gauges que se deforman aumentando su resistencia, es decir cuando la celda está sometida a tensión, y se colocan resistencias fijas donde se produce la compresión, hacer esto no es recomendable si se necesita precisión puesto que será más sensible a variaciones de temperatura.

Las tomas de los datos se hacen aplicando de manera consecutiva las fuerzas: 0, 10, 20, 30, 40, 50. kN

La metodología del experimento será la siguiente:

- Poner a cero a la fuerza deseada y se espera que la señal se equilibre.
- Se aplica la fuerza deseada y se espera que la señal se equilibre
- Se empieza a tomar datos y se promedian.
- Los promedios obtenidos son tabulados.

Como parte del análisis es necesario verificar la linealidad de los datos

En la Figura 92 se muestran los datos obtenidos durante 5 min para una fuerza de 0 kN. La media resultante del raw value obtenido es 7907644, con un error de medida de 130-

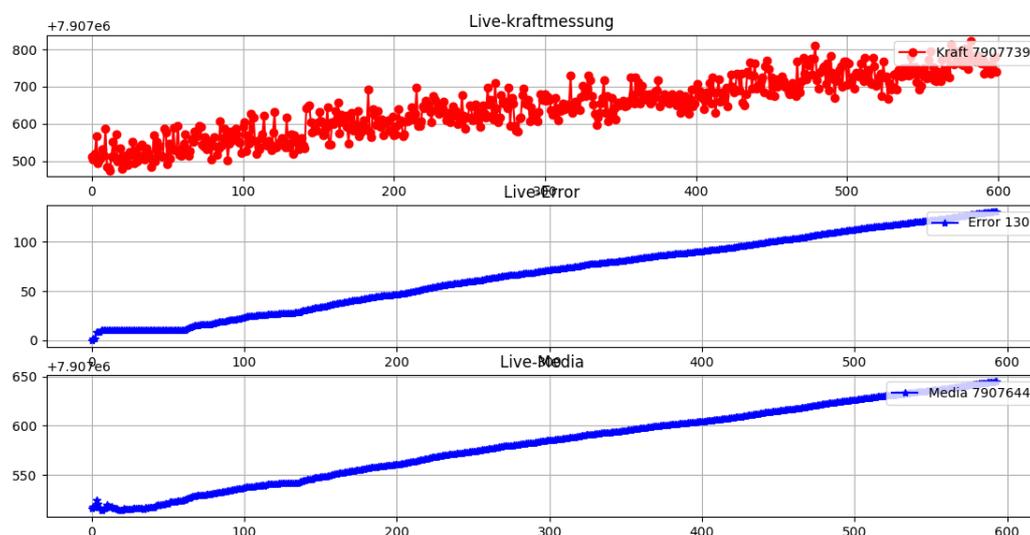


Figura 92. Medida de fuerza 0 kN, Media y error de Media.  
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 93 se muestra la medición la fuerza aplicada desde 0 a 10.08 kN. Los datos medidos para el análisis corresponden a los últimos 5 min. La media resultante del raw value obtenido es 8121131, con un error de medida de 175.

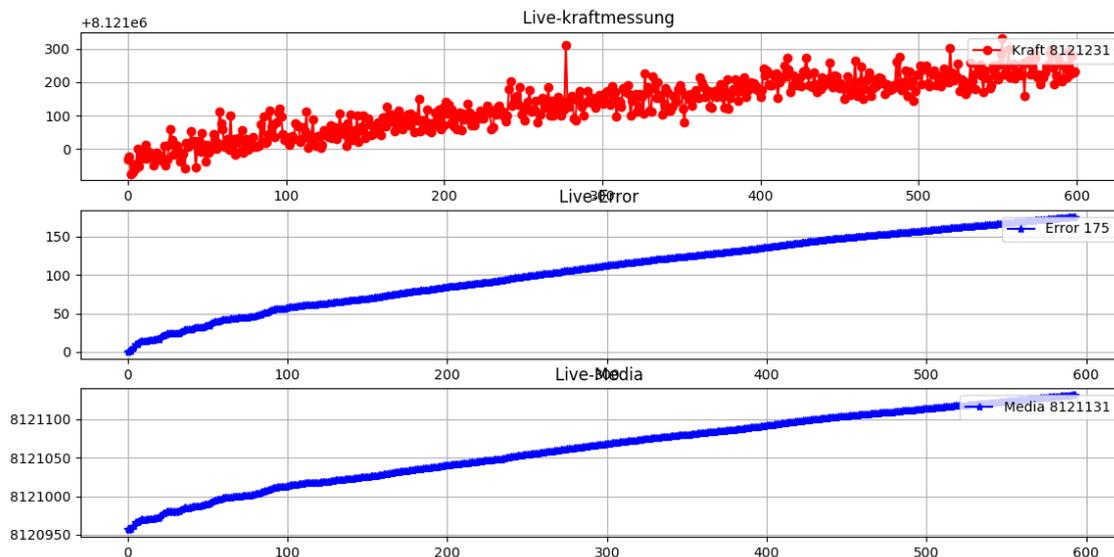


Figura 93. Medida de fuerza 10.08 kN, Media y error de Media.  
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 94 se muestra la medición la fuerza aplicada desde 0 a 20.35 kN. Los datos medidos para el análisis corresponden a los últimos 5 min. La media resultante del raw value obtenido es 8274584, con un error de medida de 204.

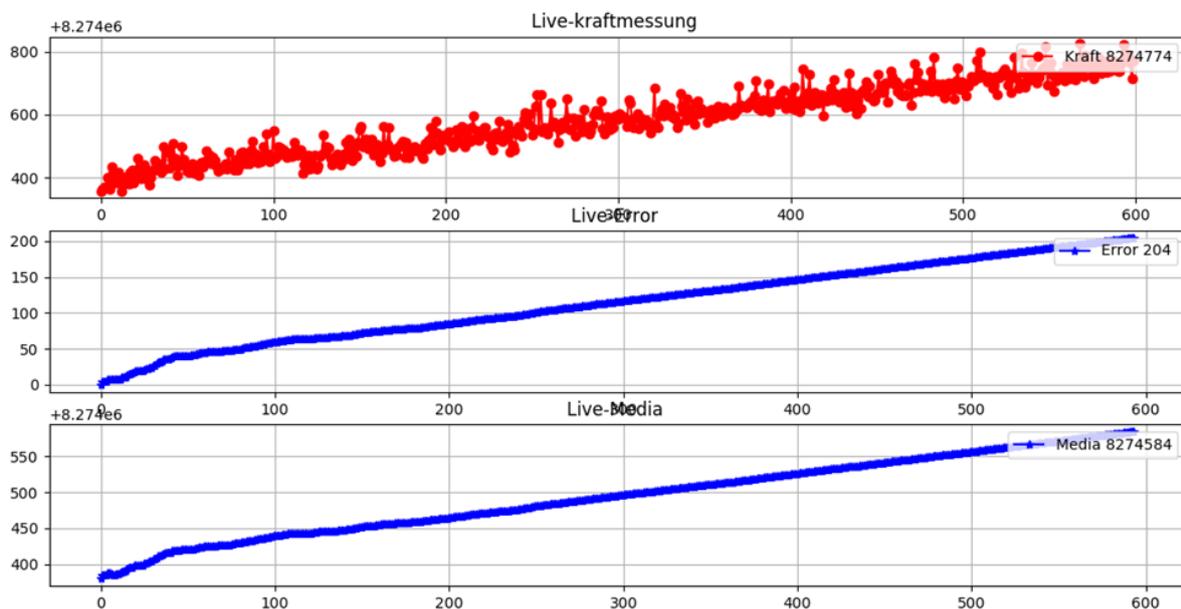


Figura 94. Medida de fuerza 20.35 kN, Media y error de Media.  
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 95 se muestra la medición la fuerza aplicada desde 0 a 30.01 kN. Los datos medidos para el análisis corresponden a los últimos 5 min. La media resultante del raw value obtenido es 8423665, con un error de medida de 201.

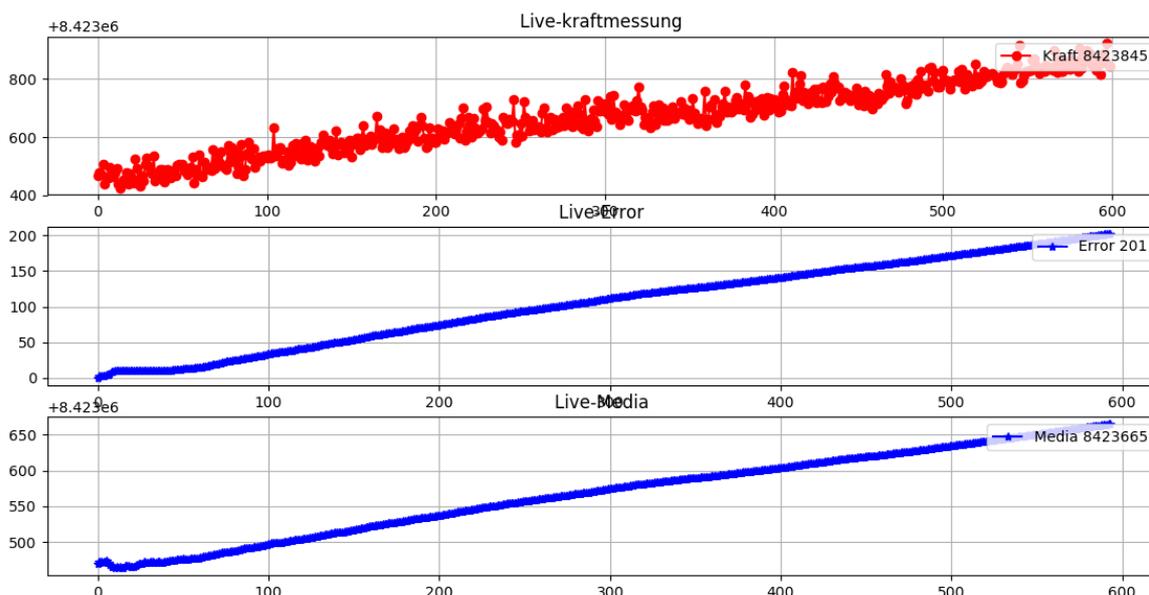


Figura 95. Medida de fuerza 30.01 kN, Media y error de Media.  
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 96 se muestra la medición la fuerza aplicada desde 0 a 40.22 kN. Los datos medidos para el análisis corresponden a los últimos 5 min. La media resultante del raw value obtenido es 8584753, con un error de medida de 308.

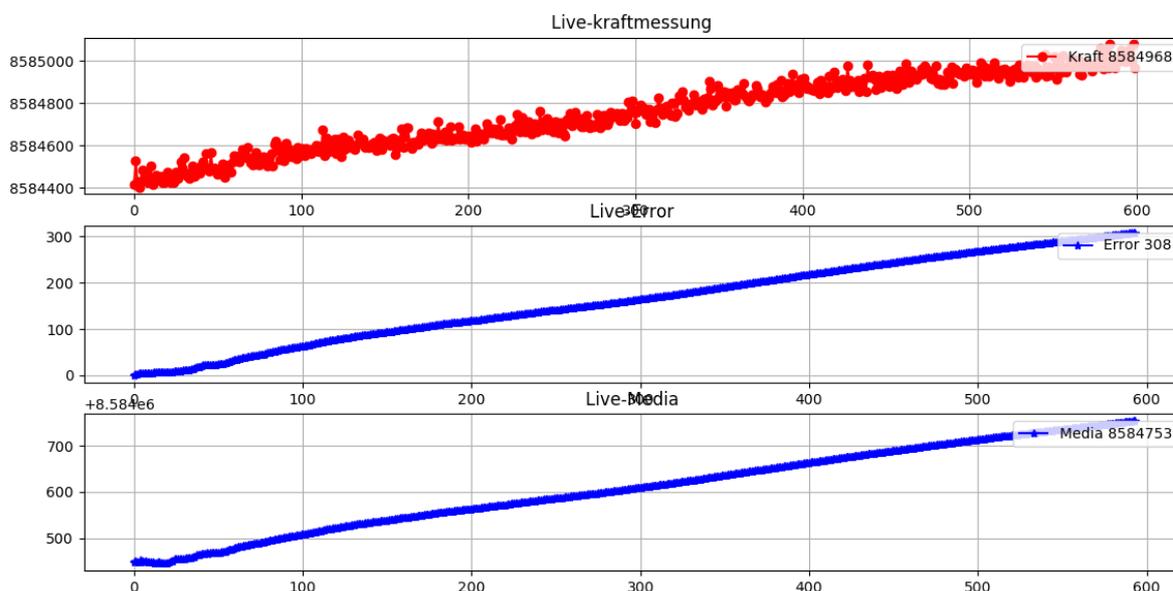


Figura 96. Medida de fuerza 40.22 kN, Media y error de Media.  
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 97 se muestra la medición la fuerza aplicada desde 0 a 50.31 kN. Los datos medidos para el análisis corresponden a los últimos 5 min. La media resultante del raw value obtenido es 8744529, con un error de medida de 322.

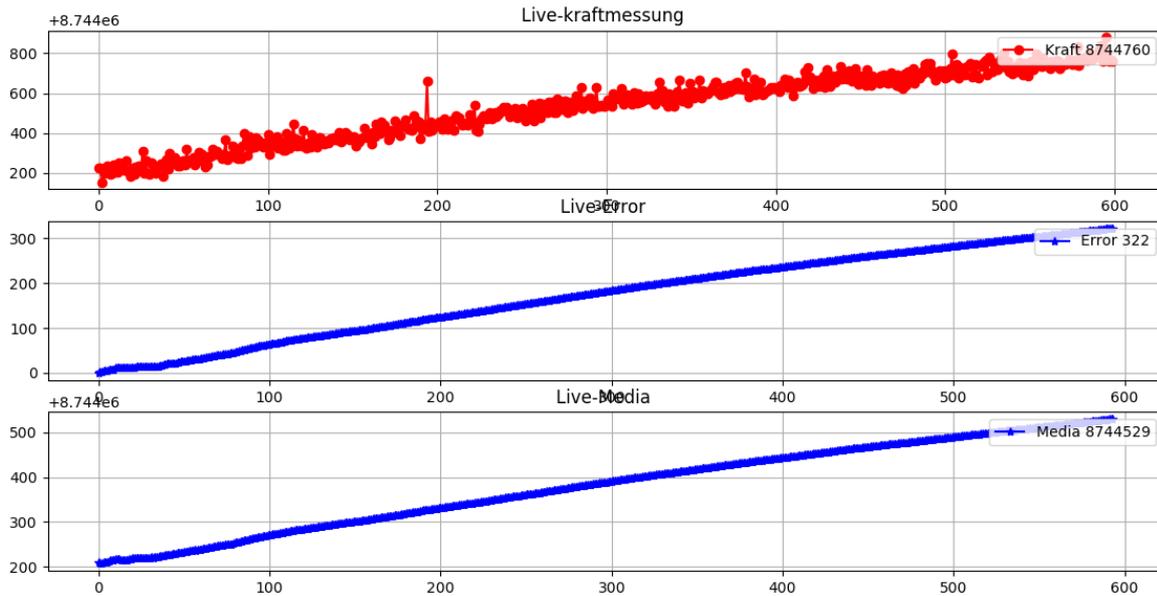


Figura 97. Medida de fuerza 50.31 kN, Media y error de Media.

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 3 se presentan los valores promedio obtenidos desde el sensor para cada una de las fuerzas del experimento luego de su estabilización, expresado como *raw value*. Durante los experimentos se pudo observar que, aunque no esté compensada la temperatura y nunca se estabilice del todo el valor medido, debido a que se han considerado resistencias fijas en la zona de compresión, sí existe una relación lineal entre la fuerza aplicada y el valor promedio del *raw value* medido, Figura 98. El inconveniente de estabilización se verá superado cuando se coloquen strain gauge en la zona de compresión, ya que las variaciones de los *raw value* se apreciarán como un ruido de media cero.

Tabla 3. Resultados experimentales.

Fuerza KN	Raw Value
0	7907644
10.08	8121131
20.35	8274584
30.01	8423665
40.22	8584753
50.31	8744529

Fuente: Elaboración propia.

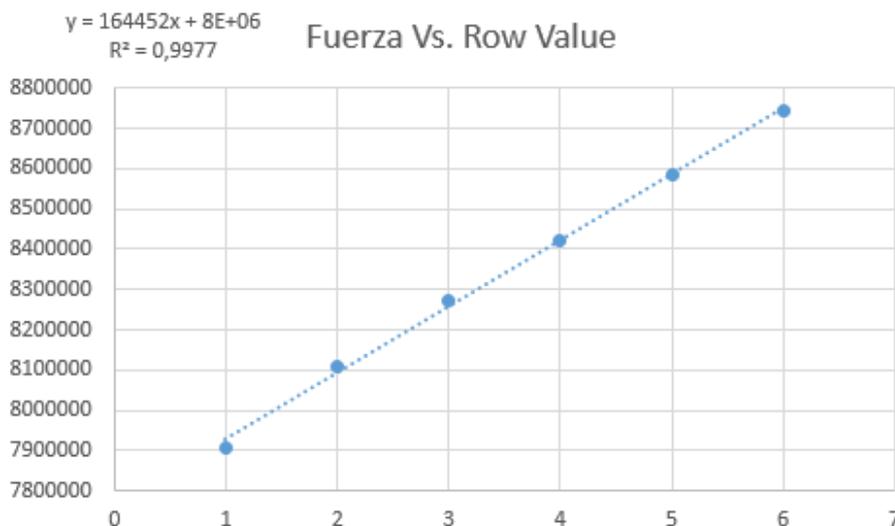


Figura 98. Relación lineal entre raw value Vs fuerza medida por el sensor.  
Fuente: Elaboración propia.

De los experimentos realizados se puede concluir lo siguiente.

Cada vez que la fuerza aumenta, el error al establecerse aumenta.

La variación de raw data, ya estabilizada, es máximo de 1000 unidades, esto debido a la variación de temperatura. Un cálculo rápido nos permite obtener el rango del error.

$$1000 * 50.31 / 8744529 = 0.0057 \text{ kN}$$

Esto equivale a 5.7 N cada 5 minutos. Un error despreciable, pero que con el tiempo se afectara el sistema. Para corregirlo se debe implementar un puente completo para la medición de la fuerza, es decir utilizar strain gauges tanto en la zona de tensión como en la zona de compresión.

### 4.3. Pruebas de comunicación

Una de las variables para definir qué tan buena será la comunicación que se establecerá entre el *clamp assist* y el receptor externo a través de Bluetooth, es determinar el RSSI (*Received Signal Strength Indicator*). El RSSI se puede entender como una medida de la potencia de los decibelios de la señal.

En equipos Bluetooth Low Energy, el valor del RSSI empieza de cero hacia negativo, mientras más cercano al cero mejor será la calidad de la conexión, sin embargo, la media de las medidas tomadas del RSSI, no es suficiente para entender la calidad de la señal; sino también, su distorsión o desviación estándar nos permitirá conocer si hay posibilidad de desconexión o no.

Las medidas fueron registradas de dos formas, con viruta en la antena y sin viruta en la antena. También a tres distancias diferentes 2m, 5m y 8m.

Es necesario probar la antena con viruta, puesto que en los procesos en los cuales se usará el Clamp Assist, habrá viruta que probablemente bloquee la antena.

En la Figura 99 se muestra la medida de RSSI sin viruta en la antena a 2 metros del receptor. Media del valor RSSI -64.6

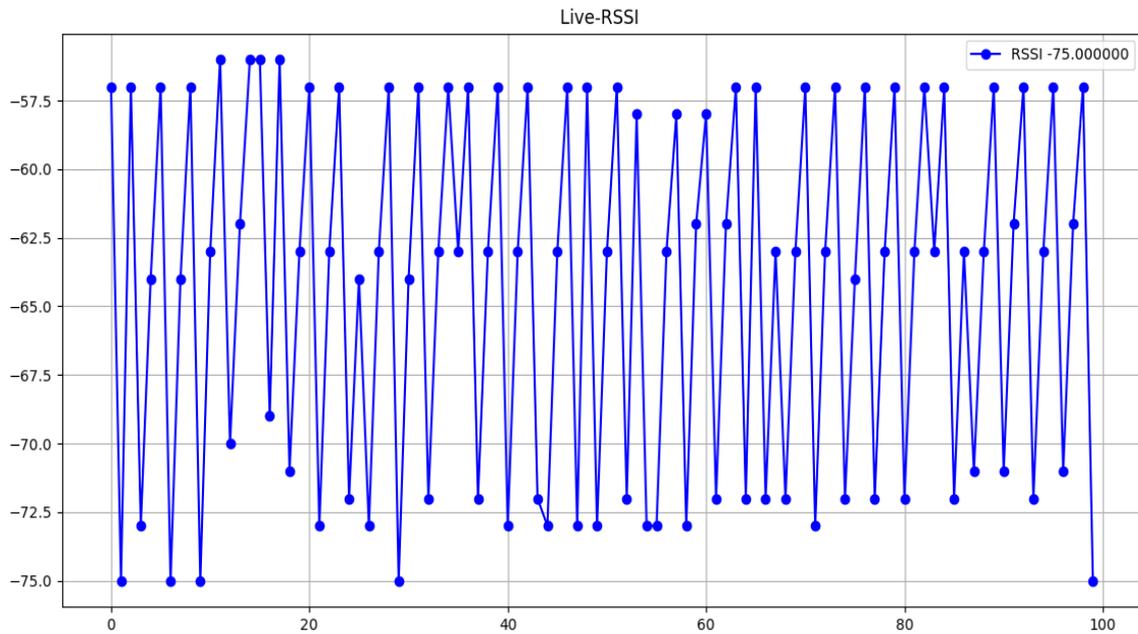


Figura 99. Grafica RSSI, 2m, sin viruta  
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 100 se muestra la medida de RSSI con viruta en la antena a 2 metros del receptor. Media del valor RSSI -63.89.

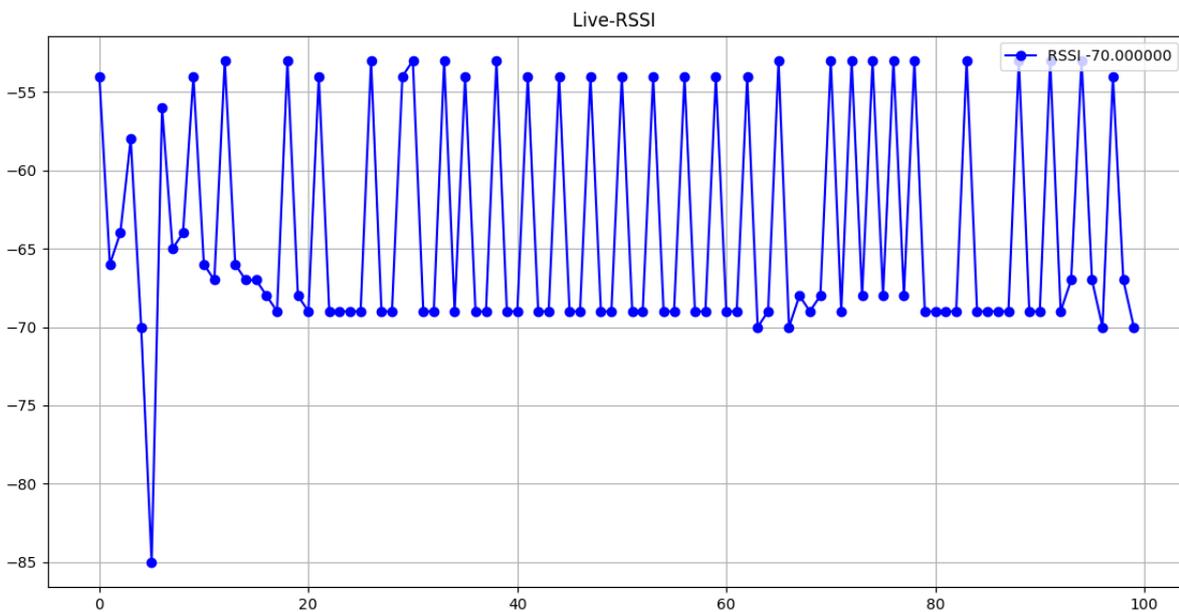


Figura 100. Grafica RSSI, 2m, con viruta.  
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 101 se muestra la medida de RSSI sin viruta en la antena a 5 metros del receptor. Media del valor RSSI -68.26.

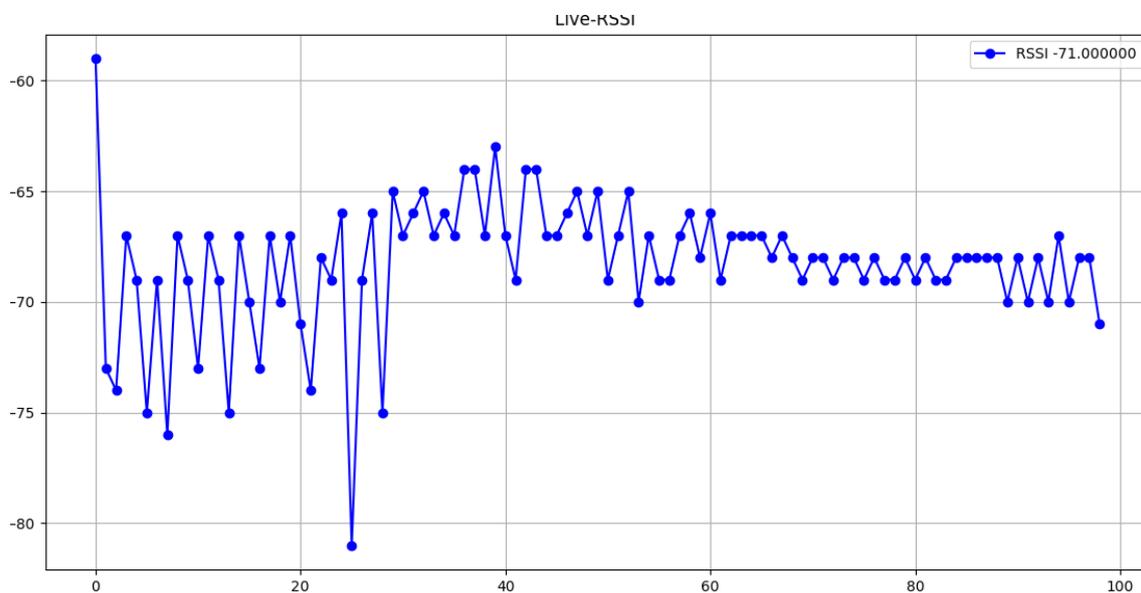


Figura 101. Grafica RSSI,5m, sin viruta.  
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 102 se muestra la medida de RSSI con viruta en la antena a 5 metros del receptor. Media del valor RSSI -66.69.

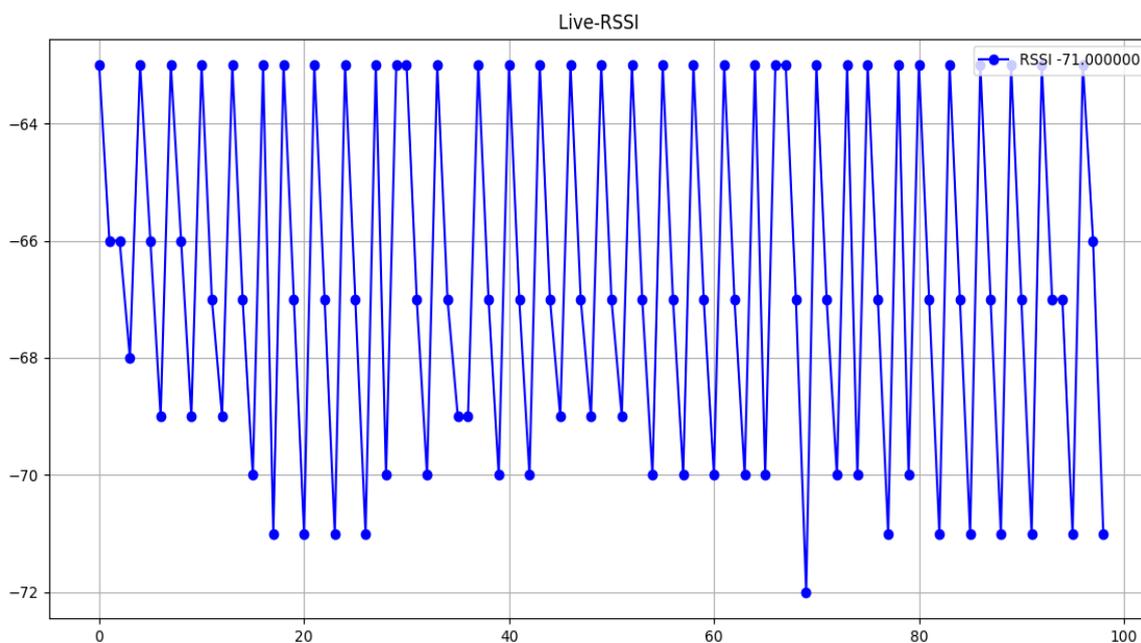


Figura 102. Grafica RSSI, 5m, con viruta.  
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 103 se muestra la medida de RSSI sin viruta en la antena a 15 metros del receptor. Media del valor RSSI -83.6.

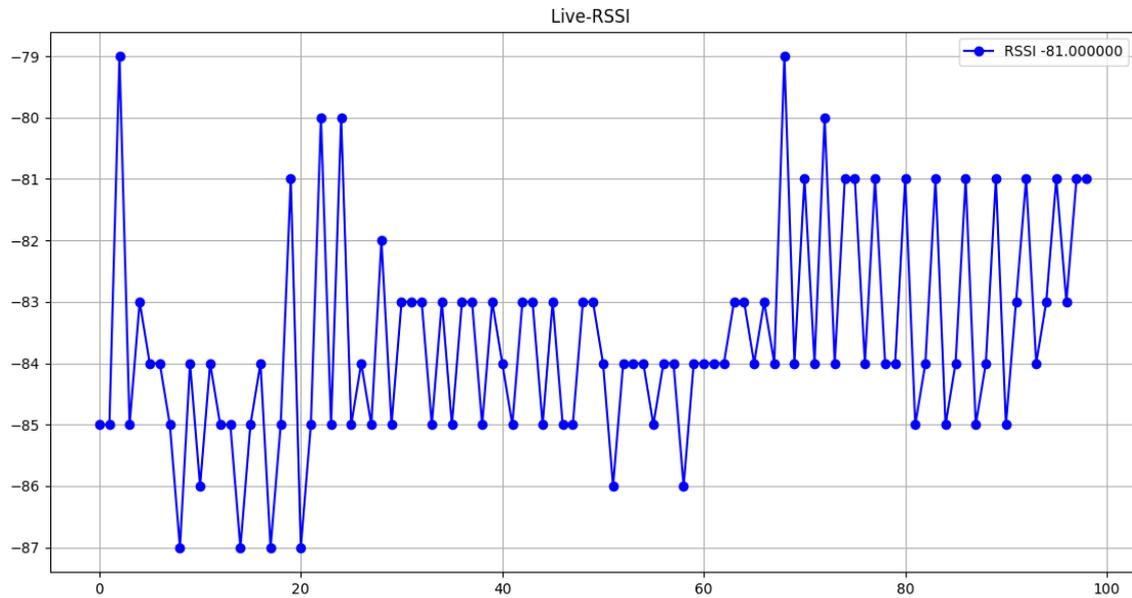


Figura 103. Grafica RSSI,15m, sin viruta.  
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 104 se muestra la medida de RSSI con viruta en la antena a 15 metros del receptor. Media del valor RSSI -87.09.

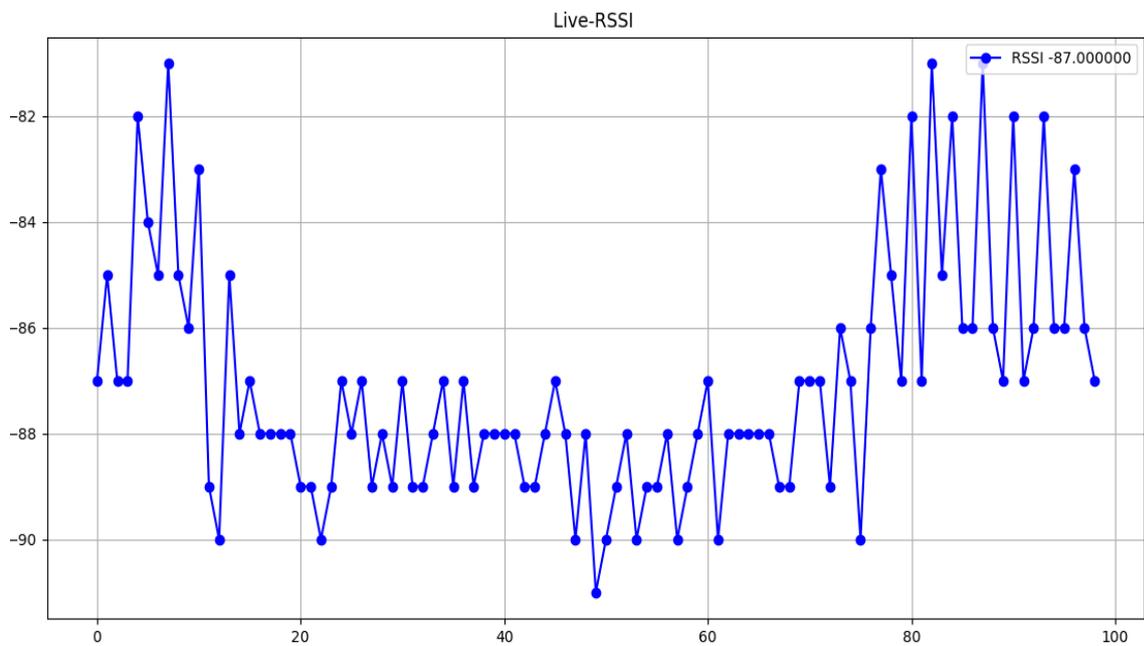


Figura 104. Grafica RSSI, 15m, con viruta.  
Fuente: Elaboración propia.

Se puede concluir que la antena trabaja bien incluso con virtualidad y tiene una buena potencia hasta 15 metros. También podemos observar que no solo es el valor RSSI al que se le debe prestar atención, sino también a la desviación estándar de este.

Si el RSSI una desviación grande, probablemente se pierda la conexión en algunos momentos o se pierda información en la comunicación.

El protocolo Bluetooth BLE, puede comprobar el valor RSSI y se puede implementar un programa de seguridad que decida si es conveniente conectarse o si existe el riesgo de perder información en el proceso de comunicación.



## Conclusiones y recomendaciones

Las conclusiones y recomendaciones descritas a continuación son importantes para fabricar un sistema de medición fuerza *clamp assist* industrial y comercial. Estos puntos se tomarán en cuenta en la empresa Allmatic para el desarrollo ágil de nuevos sensores.

La tecnología *Time Digital Converter* (TDC) garantiza un bajo consumo de corriente y una alta resolución para medir fenómenos físicos relacionados con la variación de resistencia y capacitancia eléctrica.

El chip PS09 comparado con un amplificador tradicional ha presentado un buen rendimiento en múltiples pruebas de funcionamiento. Una vez desarrollado el módulo de medición se probó con diferentes celdas de carga sin necesidad de cambios en el hardware, solo modificando la configuración del chip por software.

Es necesario un correcto análisis de la distribución de tierras en el circuito impreso de medición, así como de la frecuencia de las señales, ya que el chip de medición PS09 es bastante sensible a ruidos eléctricos. En aplicaciones donde las interferencias electromagnéticas son altas se tiene que evaluar el uso de bobinas de hoque.

En la actualidad el desarrollo de sistemas embebidos Wireless se vuelve más accesible para los desarrolladores, el MCU de Texas Instruments (CC2640R2F), es sencillo de utilizar y de ponerlo en marcha. Es uno de los mejores chips de la familia BLE de Texas instrumentos y uno de los más potentes. Los elementos electrónicos que se necesitan para su puesta en marcha son pocos, lo que favorece el diseño en áreas pequeñas.

Texas Instruments proporciona un ambiente de desarrollo interactivo de programación y diferentes herramientas de análisis como lectores de paquetes Bluetooth y medidores de consumo que hacen de TI un perfecto fabricante para el suministros de dispositivos.

El protocolo Bluetooth Low Energy es de los mejores protocolos estándar para comunicación Wireless, siendo actualmente uno de los más extendidos y también más seguros, se ha empezado a usar en diferentes ambientes industriales, así como en robots.

El protocolo BLE facilitó la conectividad del prototipo *clamp assist* con distintos dispositivos externos, se han realizado pruebas de comunicación utilizando un Smartphone, una PC y un Gateway Bluetooth de la empresa Schildknecht.

El circuito impreso de comunicación funciona bien, sin embargo, cada vez que se cambie la distribución de los elementos electrónicos en la tarjeta será necesario sintonizar la antena.

La fabricación de las celdas de carga es sumamente importante para medir de forma correcta la fuerza. Normalmente, en ciertos mecanismos, se puede insertar una celda de carga para medir la fuerza, pero en otras ocasiones, se necesita analizar todo el sistema y encontrar la pieza que puede funcionar como celda de carga, en ambos casos la simulación es necesario, los comportamientos de una pieza dependiendo del tamaño y la geometría es más o menos intuitivo. En casos más complejos no solo se debe de modelar la celda de carga sino también las piezas que generaran presión sobre la celda de carga.

El correcto pegado y curado de los strain gauge en la celda de carga es muy importante, si no se hace de manera adecuada puede ser perjudicial para su dinámica, puesto que el material que estará entre el strain gauge y el metal se comportará como amortiguador. En las pruebas realizadas las lecturas no convergían rápido cuando existía un exceso de material adhesivo.

La celda de carga diseñada para medir la fuerza, así como el lugar donde se colocaron y las formas como se posicionaron las galgas, permitieron obtener buenos resultados, con una amplitud apreciable, medidas repetibles y buen comportamiento mecánico.

Para una producción media los circuitos impresos se pueden fabricar en serie. Dado los tamaños y la buena calidad de los proveedores, los circuitos impresos se pueden diseñar y ensamblar en el laboratorio con ayuda de stencils y posicionadores. La supervisión de calidad se hace a través de pogo pins y un microscopio, el cual ayuda a ver la correcta soldadura de los elementos. En el laboratorio hasta la fecha se ha podido ejecutar micro reparaciones, en tamaños menores a 0,2 mm y diagnosticar futuras fallas en los circuitos.

La filosofía de desarrollo modular es esencial para un avance orgánico de diferentes proyectos. Al finalizar esta tesis, la tarjeta de medición no solo se está utilizando en las mordazas de ALLMATIC JACKOB GmbH, sino también en soportes para mordazas de la empresa JAKOB Antriebstechnik GmbH y se pretende utilizar en diferentes proyectos de la empresa. La modularidad del proyecto permite que no solo se mida fuerza con el protocolo Bluetooth BLE, sino que este abierto a otros protocolos de comunicación y medios físicos. La tarjeta de medición actualmente se comunica por SPI, cambiando el circuito impreso de comunicaciones podemos conectar el circuito impreso de medición a cualquier otro protocolo.

## Referencias bibliográficas

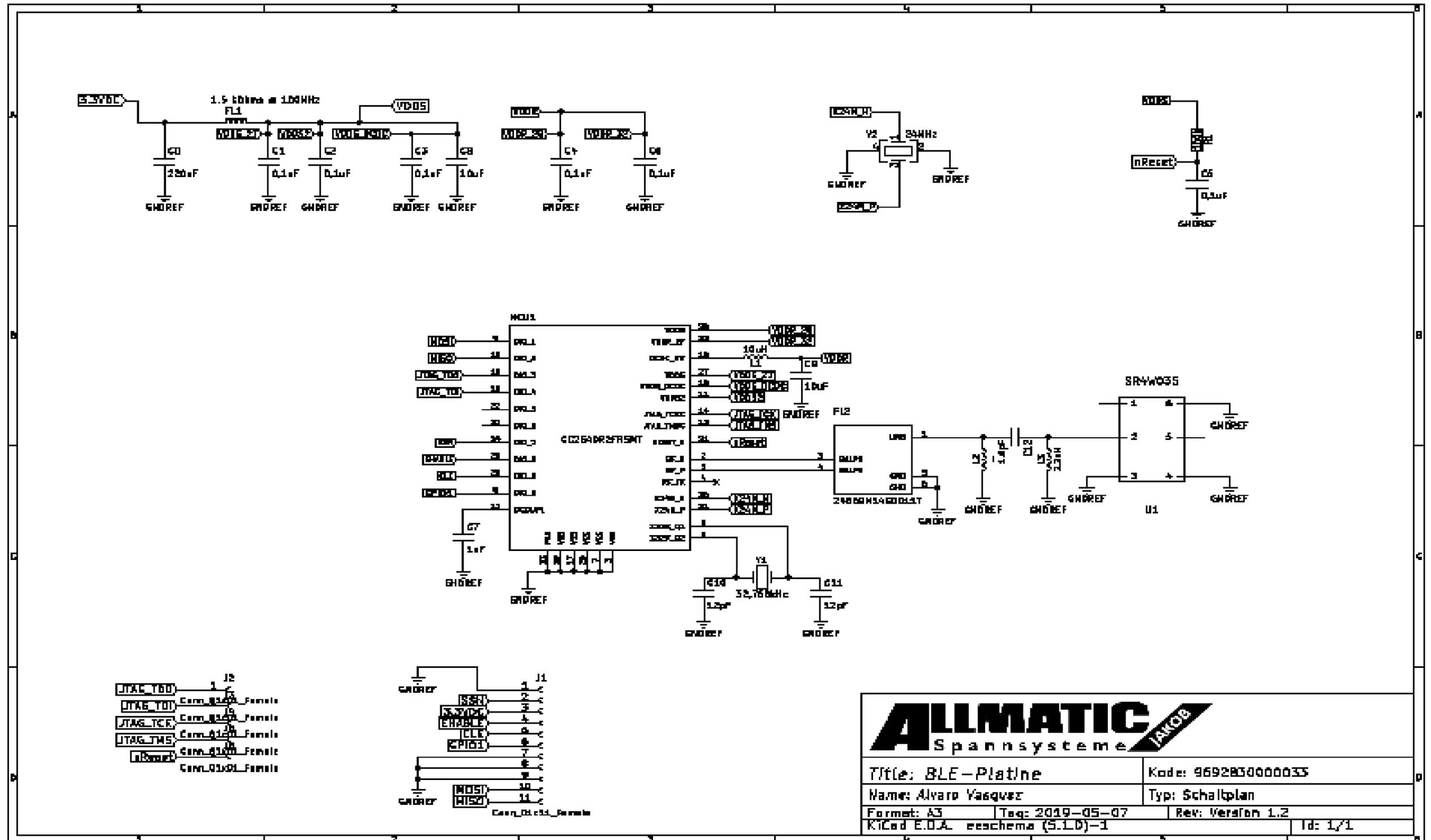
- [1] Omega engineering, Practical strain gauge measurement, 1999. [Online]. Available: [https://www.omega.co.uk/techref/pdf/StrainGage\\_Measurement.pdf](https://www.omega.co.uk/techref/pdf/StrainGage_Measurement.pdf)
- [2] Kinjal Dave, Optimizing ARM Cortex-A and Cortex-M based heterogeneous multiprocessor systems for rich embedded applications, 2016. [Online]. Available: [https://www.arm.com/files/event/2016\\_ATS\\_India\\_C5\\_Kinjal\\_Dave.pdf](https://www.arm.com/files/event/2016_ATS_India_C5_Kinjal_Dave.pdf)
- [3] Texas Instruments, CC2640R2F SimpleLink™ Bluetooth® low energy Wireless MCU, 2017.  
[Online]. Available: <http://www.ti.com/product/CC2640R2F>
- [4] Fredrik Kervel, CC26xx HW Training, 2017. [Online]. Available: [http://processors.wiki.ti.com/images/4/45/CC26xx\\_HW\\_training\\_RF\\_Frontends\\_and\\_Antennas.pdf](http://processors.wiki.ti.com/images/4/45/CC26xx_HW_training_RF_Frontends_and_Antennas.pdf)
- [5] Digikey. <https://www.digikey.com/>
- [6] STMicroelectronics, 2016. [Online].  
Available: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/balf-cc26-05d3.pdf>
- [7] Johanson Technology, Inc, High Frequency Ceramic Solutions, 2017. [Online]. Available:  
<https://www.johansontechnology.com/datasheets/2450BM14G0011/2450BM14G0011.pdf>
- [8] Sparkfun, Serial Peripheral Interface (SPI),  
<https://learn.sparkfun.com/tutorials/serial-peripheral-interface-spi/all>
- [9] Bluetooth Special Interest Group, Inc  
<https://www.bluetooth.com/specifications/gatt/generic-attributes-overview>
- [10] CPU - Single-chip solution for strain gauges, 2014. [Online]. Available: [https://www.pmt-fl.com/pmt-downloads#pst\\_ds](https://www.pmt-fl.com/pmt-downloads#pst_ds).
- [11] Picostrain, PSØ9 Single Chip Solution for Strain Gauges, 2012. [Online]. Available: [http://acam-e.ru/pdf/DB\\_PS09\\_en.pdf](http://acam-e.ru/pdf/DB_PS09_en.pdf)
- [12] Steve Hageman, Via spacing on high-performance PCBs, 2013. [Online]. Available: <https://www.edn.com/Pdf/ViewPdf?contentItemId=4406491>

- [13] Noise Suppression Products/EMI Suppression Filters.  
<https://www.murata.com/en-sg/products/emc/emifil/knowhow/basic/chapter06-p8>
- [14] IC power pin connection for noise immunity and decoupling.  
<https://electronics.stackexchange.com/questions/333191/ic-power-pin-connection-for-noise-immunity-and-decoupling>
- [15] James Murdock and Danielle Griffith, Crystal Oscillator and Crystal Selection for the CC26xx and CC13xx Family of Wireless MCUs, 2017. [Online]. Available:  
<http://www.ti.com/lit/an/swra495f/swra495f.pdf>

## **Anexos**



Anexo 1. Esquema BLE-Platine





Anexo 2. Esquema Messplatine

