

Universidad Tecnológica Nacional

Proyecto Final

**Sistema de Monitoreo Remoto de
Condiciones en Silo Bolsas**

Autores:

- *Kleng, David Gabriel*
- *Mare, Rodrigo*

Director:

- *Lencina, Adrián*

*Proyecto final presentado para cumplimentar los requisitos académicos
para acceder al título de Ingeniero Electrónico*

en la

Facultad Regional Paraná

Diciembre de 2021

Declaración de autoría:

Nosotros declaramos que el Proyecto Final “Sistema de Monitoreo Remoto de Condiciones en Silo Bolsas” y el trabajo realizado son propios. Declaramos:

- Este trabajo fue realizado en su totalidad, o principalmente, para acceder al título de grado de Ingeniero Electrónico, en la Universidad Tecnológica Nacional, Regional Paraná.
- Se establece claramente que el desarrollo realizado y el informe que lo acompaña no han sido previamente utilizados para acceder a otro título de grado o pre-grado.
- Siempre que se ha utilizado trabajo de otros autores, el mismo ha sido correctamente citado. El resto del trabajo es de autoría propia.
- Se ha indicado y agradecido correctamente a todos aquellos que han colaborado con el presente trabajo.
- Cuando el trabajo forma parte de un trabajo de mayores dimensiones donde han participado otras personas, se ha indicado claramente el alcance del trabajo realizado.

Firmas:

-
-
-

Fecha:

Agradecimientos:

Al Ingeniero Adrián Lencina por su tiempo y apoyo a lo largo del desarrollo de este proyecto.

Mis agradecimientos a mi familia por la ayuda y apoyo incondicional a lo largo de mi vida, a mi novia por acompañarme en este trayecto, a mis amigos por siempre estar presentes y a los integrantes de *AutoSolve* por toda la ayuda brindada.

Kleng, David Gabriel

Estoy agradecido con mi familia y amigos que me acompañaron en este largo proceso y creyeron en mí.

Mare, Rodrigo

Universidad Tecnológica Nacional

Abstract

Facultad Regional Paraná

Ingeniero en Electrónica

Sistema de Monitoreo Remoto de Condiciones en Silo Bolsas

Kleng, David Gabriel

Mare, Rodrigo

Abstract:

In Argentina there is a large need in the agricultural sector for grain storage. This need leads to the use of silo bags which in most cases are less secure than metal silos ending in up to a 4% loss of the produced grain. The system developed in this article provides a solution to these losses by monitoring the storage variables such as temperature, humidity, and carbon dioxide.

The system was developed following a dispersed nodes architecture. Every node, which is powered by batteries and is expected to be placed in a silo bag, has the required sensors in order to measure each storage variable. The acquired data is collected through RF by a gateway which later sends it to a cloud database using the mobile network. Finally, the data is displayed in a web page.

There was obtained a scalable, affordable and cutting-edge product capable of decreasing the losses in grain storage.

Keywords: LoRa, low power, environment monitoring, data acquisition, internet of things, data storage, grain storage.

Resumen:

En Argentina hay en el sector de agricultura una gran necesidad de almacenamiento de granos. Esto lleva al uso de silo bolsas que, en muchos casos, es menos seguro que los silos metálicos, produciendo pérdidas de hasta el 4% del grano producido. El sistema desarrollado en este artículo provee una solución a esas pérdidas mediante el monitoreo de variables de almacenamiento, tales como temperatura, humedad y dióxido de carbono. El sistema fue desarrollado usando nodos con sensores dispersos dentro del silo bolsa funcionando a baterías. Los datos obtenidos se recolectan a través de RF por un Gateway que los envía a la base de datos en la nube. Finalmente, los datos se muestran en una página web.

Se obtuvo un sistema escalable, económico y con tecnologías actuales capaz de reducir las pérdidas en el almacenamiento de granos.

Palabras Clave: LoRa, bajo consumo, monitoreo de almacenamiento, adquisición de datos, internet de las cosas, almacenamiento de datos, almacenamiento de granos.

Índice:

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1 ALMACENAMIENTO DE GRANOS	1
1.2 SILOBOLSAS PARA ALMACENAMIENTO DE GRANOS	3
1.3 CONDICIONES DE ALMACENAMIENTO	4
1.3.1 TEMPERATURA	5
1.3.2 HUMEDAD	5
1.3.3 DIÓXIDO DE CARBONO	7
1.4 FUNDAMENTACIÓN DEL SISTEMA	9
1.4.1 RANGOS DE LAS VARIABLES A MONITOREAR	10
CAPÍTULO 2: DESARROLLO	12
2.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA	12
2.1.1 NODO	13
2.1.1.1 ESTRUCTURA	13
2.1.1.2 COMPONENTES	13
2.1.1.3 CALCULO DURACIÓN DE BATERÍAS	26
2.1.1.4 DESARROLLO DEL FIRMWARE	27
2.1.1.5 PROBLEMAS ENCONTRADOS	29
2.1.2 GATEWAY	30
2.1.2.1 ESTRUCTURA	30
2.1.2.2 COMPONENTES	30
2.1.2.3 DESARROLLO DEL FIRMWARE	41
2.1.2.4 PROBLEMAS ENCONTRADOS	43
2.1.3 BASE DE DATOS	44
2.1.3.1 DESCRIPCIÓN	45
2.1.3.2 ESTRUCTURA	45
2.1.3.3 RECEPCIÓN DE DATOS	46
2.1.4 PÁGINA WEB	49
2.1.4.1 DESCRIPCIÓN	49
2.1.4.2 VISTA Y GRÁFICOS	50
2.2 DISEÑO COMPLETO	55
2.2.1 DISEÑO FINAL	55
2.2.2 PRESTACIONES	57
2.2.3 FOTOS DEL HARDWARE Y CAPTURAS DE PANTALLA DE SOFTWARE	58
2.2.3.1 UNIDAD NODO	58
2.2.3.2 UNIDAD GATEWAY	60
2.2.3.3 CARCASA NODO	61
2.2.3.4 PÁGINA WEB	63
CAPÍTULO 3: RESULTADOS	64
3.1 PRUEBAS COMUNICACIÓN POR RADIOFRECUENCIA	64
3.1.1 PRUEBA A CAMPO ABIERTO	64
3.1.2 PRUEBA CON OBSTÁCULOS	64
3.1.3 PRUEBAS SENSOR HUMEDAD Y TEMPERATURA	64
3.1.4 PRUEBAS SENSOR DIÓXIDO DE CARBONO	64
3.2 PRUEBAS CONSUMO Y DURACIÓN DE BATERÍAS	65
3.2.1 PRUEBAS SIN OPTIMIZAR CONSUMO	65
3.2.2 PRUEBAS CON MICROCONTROLADOR EN SLEEP	65
3.2.3 PRUEBAS CON MICROCONTROLADOR Y SENSORES EN SLEEP	65
CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE COSTOS	66
4.1 COSTO DE MATERIALES	66
4.2 COSTO MANO DE OBRA	67
4.3 COSTO TOTAL	67
CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN	68

Lista de Figuras:

Figura 1: Producción 2020 vs 20213

Figura 2: Histograma producción de 2007/2008 a 2020/20213

Figura 3: Curva humedad relativa de equilibrio para los principales granos a 25°C6

Figura 4: Humedad almacenamiento seguro en función de temperatura7

Figura 5: Concentración de CO₂ en bolsas de trigo a diferentes contenidos de humedad .8

Figura 6: Concentración de CO₂ en bolsas de soja a diferentes contenidos de humedad .8

Figura 7: Concentración de CO₂ de tres bolsas de soja con 11,5%, 12,9% y 14,9% de humedad y variación de la temperatura media del ambiente.....9

Figura 8: Esquema general.....12

Figura 9: Estructura de Nodo.....13

Figura 10: ATMEGA32814

Figura 11: Pinout de ATMEGA32815

Figura 12: Pinout de ATMEGA32815

Figura 13: Esquema comunicación SPI16

Figura 14: Módulo de radiofrecuencia LoRa17

Figura 15: Sensor Dióxido de Carbono CCS81118

Figura 16: Modulo de sensor de Dióxido de Carbono.....19

Figura 17: Sensor de temperatura y humedad AHT10.....20

Figura 18: Modulo de sensor de Humedad y Temperatura21

Figura 19: Circuito integrado TP405622

Figura 20: Modulo de carga de batería23

Figura 21: Circuito de carga de batería.....23

Figura 22: Ciclo de carga de batería.....25

Figura 23: Celda de litio formato 18650.....25

Figura 24: Consumo de corriente de Nodo26

Figura 25: Función setup de Nodo.....27

Figura 26: Función loop de Nodo.....28

Figura 27: Interrupción de watchdog timer en Nodo29

Figura 28: Diagrama de bloques de Gateway.....30

Figura 29: ESP32 WROOM3231

Figura 30: ESP32 en placa DevKitC32

Figura 31: Comunicación Serial.....33

Figura 32: Modulo de radiofrecuencia LoRa34

Figura 33: Modulo GSM/GPRS A635

Figura 34: Modulo GSM/GPRS A6 en placa DevKit36

Figura 35: Modulo de carga de batería37

Figura 36: Panel solar.....38

Figura 37: Fuente DC-DC reductora.....39

Figura 38: Celda de litio formato 18650.....40

Figura 39: Función setup en Gateway41

Figura 40: Función loop en Gateway42

Figura 41: Interrupción de LoRa en Gateway43

Figura 42: Firebase.....44

Figura 43: Diagrama en bloques de Base de Datos45

Figura 44: Diagrama de bloques de Nodo en Base de Datos46

Figura 45: Cloud Function.....48

Figura 46: Página web, inicio.....	49
Figura 47: Página web, lista de Gateways.....	50
Figura 48: Página web, visualización de datos de Gateway	51
Figura 49: Pagina web, gráficos	52
Figura 50: Página web, información en gráficos	53
Figura 51: Diagrama de flujo del sistema completo	56
Figura 52: Prototipo unidad Nodo	58
Figura 53: Diseño final unidad Nodo.....	59
Figura 54: Prototipo unidad Gateway	60
Figura 55: Diseño final unidad Gateway	61
Figura 56: Corte en perspectiva de carcasa	61
Figura 57: Vista frontal de carcasa	62
Figura 58: Corte vista lateral de carcasa	62
Figura 59: Vista en perspectiva de tapa de carcasa	62
Figura 60: Inicio de Pagina Web	63
Figura 61: Datos en Pagina Web	63

Lista de Tablas:

Tabla 1: Capacidad almacenamiento fijo. Mayo 2016.....	2
Tabla 2: Proyección cosecha 2020/2021	2
Tabla 3: Valores críticos de temperatura.....	10
Tabla 4: Valores críticos de CO ₂	10
Tabla 5: Valores críticos de humedad	11
Tabla 6: Consumos de estados en Nodo	26
Tabla 7: Tabla de consumos en Nodo	65
Tabla 8: Costos Nodo.....	66
Tabla 9: Costos Gateway	67
Tabla 10: Costos mano de obra	67
Tabla 11: Costos totales.....	67

Lista de Abreviaciones y Símbolos

DB: base de datos.

HTTP: hypertext transfer procol.

RF: radiofrecuencia.

HMI: Interfaz hombre-maquina.

Dedicado a:

Todas las personas que nos acompañaron, apoyaron y ayudaron a lo largo de estos años, en especial a familia y amigos.

Capítulo 1: Introducción

1.1 Almacenamiento de granos

La postcosecha es una actividad que comienza una vez que el grano ha sido cosechado, continúa durante el acondicionamiento y almacenamiento, y culmina en el momento del uso final del grano.

Todas las prácticas que se realizan durante la postcosecha tienen un objetivo común, minimizar las pérdidas de granos tanto en forma cuantitativa como en forma cualitativa durante esta etapa. [1]

En los inicios, la técnica de almacenamiento utilizada fue el uso de bolsas o sacos, los cuales eran utilizados de manera individual o familiar. Posteriormente, fueron desarrollados graneros comunales donde varias familias, o incluso diferentes comunidades, almacenaban sus bolsas de granos divididos en silos comunitarios, mientras el granero era protegido entre todos. Estos graneros eran cavados al costado de un acantilado o se construían como edificios intercomunicados.

Otra técnica efectiva fueron los pozos de almacenamiento, donde la capa externa del grano germinaba manteniendo el resto del grano seguro.

Tradicionalmente, los silos eran construidos como estructuras circulares con niveles internos para que el grano pudiese almacenarse sobre el suelo y reducir el riesgo de degradación ambiental.

Un gran avance en la infraestructura fueron los silos metálicos que mejoraron las condiciones y permitieron almacenar granos durante mayor tiempo. [2]

Debido a la creciente producción de granos en la Argentina, fue consolidado el silo bolsa como una alternativa para almacenar y conservar las cosechas debido a su bajo costo, fácil implementación y alta eficiencia.

Además de los beneficios antes mencionados, le fue dado al productor la posibilidad de flexibilizar la planificación de las ventas y manejar los tiempos en función de los precios. [3]

Si nos centramos puntualmente en la capacidad de almacenamiento en instalaciones fijas (silos y celdas), el último dato que se pudo constatar, en la

Bolsa de Comercio de Rosario en base al Ministerio de Agroindustria, fue de un total de 77.367.850 toneladas en mayo de 2016. (Tabla 1)

Capacidad instalada para la capacidad de granos mayo 2016	
Rubro	Capacidad(Tn)
Almacenaje comercial en silos fijos	61.367.850
Almacenaje estimado de productores agropecuarios en silos o estructuras fijas	16.000.000
Capacidad total de almacenaje en Argentina	77.367.850

Tabla 1: Capacidad almacenamiento fijo. Mayo 2016

Es notorio que estas capacidades de acopio están muy por debajo de la producción, que tuvo un importante crecimiento durante los últimos años, pasando de 61.628.868 toneladas en la campaña 1999/2000 a 135.616.764 de toneladas que fueron proyectadas para 2020/2021. [4] (Tabla 2)

Proyección total 20/21		
Cultivo	Superficie sembrada(Ha)	Producción(Tn)
Girasol	1.675.726	3.426.368
Maíz	9.742.230	60.525.805
Soja	16.650.093	46.217.911
Trigo	6.729.898	17.644.277
Cebada	1.237.023	4.483.062
Sorgo	985.533	3.319.341
Total	37.020.503	135.616.764

Tabla 2: Proyección cosecha 2020/2021

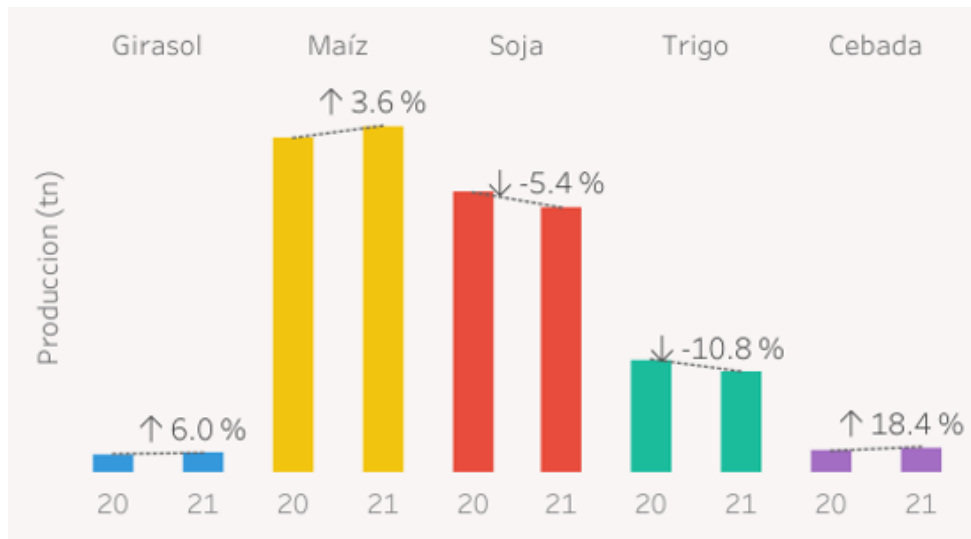


Figura 1: Producción 2020 vs 2021

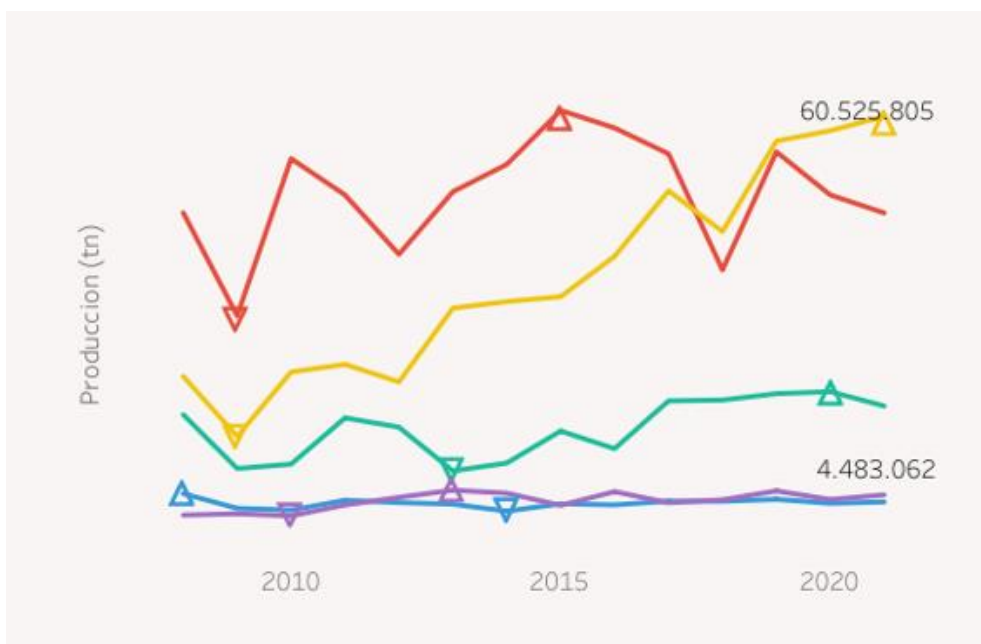


Figura 2: Histograma producción de 2007/2008 a 2020/2021

1.2 Silobolsas para almacenamiento de granos

El uso de silobolsas consiste en almacenar el grano en bolsas de plástico herméticamente cerradas de 235 micrones de espesor, conformadas por tres capas.

La capa exterior, es blanca para reflejar los rayos solares, la del medio es una capa neutra y la del interior negro es protectora de los rayos ultravioletas y evita la penetración de la luz.

Pueden contener hasta 400 toneladas de granos y se presentan de distintos diámetros que varían desde 1,52 a 3,65 metros de diámetro y una longitud de 60,75 o 100 metros. [5]

En este tipo de instalaciones, de atmosfera modificada, se generan condiciones tales que se produce una modificación de gases de la atmosfera intergranaria, causando una reducción de la concentración de oxígeno y un aumento en la concentración de dióxido de carbono, que actúa como controlador de los procesos respiratorios de hongos e insectos.

A pesar de las ventajas, se debe considerar que este tipo de almacenamiento genera mayores riesgos asociados a la disminución en la calidad del grano debido a la humedad del grano, la temperatura, el tiempo de almacenamiento y las concentraciones de O₂ y CO₂. [6]

Un relevamiento realizado por el INTA, estima que en nuestro país se echan a perder entre un 2% y 5% del grano durante el almacenamiento que resulta en pérdidas económicas. [7]

Asimismo, otras de las dificultades que presenta, viene dada del lado del productor, ya que necesita mayor atención que otros tipos de ensilado.

1.3 Condiciones de almacenamiento

Surge la necesidad de productores agrónomos, acopiadores de granos y exportadores de tener un control sobre su producto almacenado, principalmente en silo bolsa, pero también en otros tipos de silos, como los silos metálicos o bunker. Es esencial para el grano almacenado por medio de estos métodos mantener ciertos niveles ambientales dentro del silo con el fin de preservar la calidad del grano y evitar la pérdida de éste, lo que causaría un impacto económico muy profundo al propietario. Además, se contemplan dos factores muy importantes, el hecho de que estos silos se encuentren en lugares remotos, lo que demanda cierto tiempo de viaje al propietario para una inspección, y también, el hecho de que la cobertura de los proveedores de internet en estas zonas es extremadamente limitada o nula.

El objetivo del almacenamiento de granos es preservarlos por periodos prolongados de tiempo sin que se deterioren. Para esto, el factor a controlar es la respiración de granos, hongos e insectos presentes en el ecosistema del silo bolsa, que consumen el O_2 y generan CO_2 , calor y agua. La tasa de respiración se ve afectada por el tipo y la condición del grano, la humedad relativa, la temperatura, el tiempo de almacenamiento y las concentraciones de O_2 y CO_2 . [8]

1.3.1 Temperatura

La medición de la temperatura del grano es la principal herramienta usada para supervisar condiciones de almacenaje tradicional (silos y celdas) puesto que un aumento en temperatura del grano se correlaciona altamente con el aumento en la actividad biológica en la masa del grano.

Desafortunadamente, esta tecnología no es lo suficientemente útil para monitorear condiciones de almacenaje en silos bolsas. La temperatura del grano almacenado en las bolsas sigue el patrón de la temperatura media ambiental, variando con las estaciones. Esto se debe a que la bolsa tiene una mayor capacidad de intercambiar calor con el aire ambiente y con el suelo. De esta manera la relación de la temperatura del grano con la actividad biológica se puede enmascarar por el efecto de la temperatura ambiente. A su vez, el ecosistema generado en un ambiente hermético tiene una tasa de respiración disminuida respecto de un ecosistema de un silo convencional, por lo que la tasa de liberación del calor del grano en descomposición es menor. [9]

1.3.2 Humedad

Conocer el contenido de humedad de los granos resulta imprescindible para la adecuada conservación de los mismos, ya que determinará el periodo en el que puede ser almacenado el grano sin que se deteriore su calidad.

La humedad del grano depende de su humedad inicial, la entrada de humedad del exterior y la humedad liberada por la respiración. A su vez, debido a la diferencia de temperatura diurna y nocturna se puede producir

condensación de humedad en la capa superior, provocando manchas localizadas de grano más húmedo.

La humedad relativa del espacio intergranario será la que determine si los hongos pueden desarrollarse, ya que necesitan un valor mayor al 67% para crecer. [6]

Teniendo en cuenta esto, es posible observar con que humedad es recomendable almacenar cada grano. (Humedad de almacenamiento seguro).

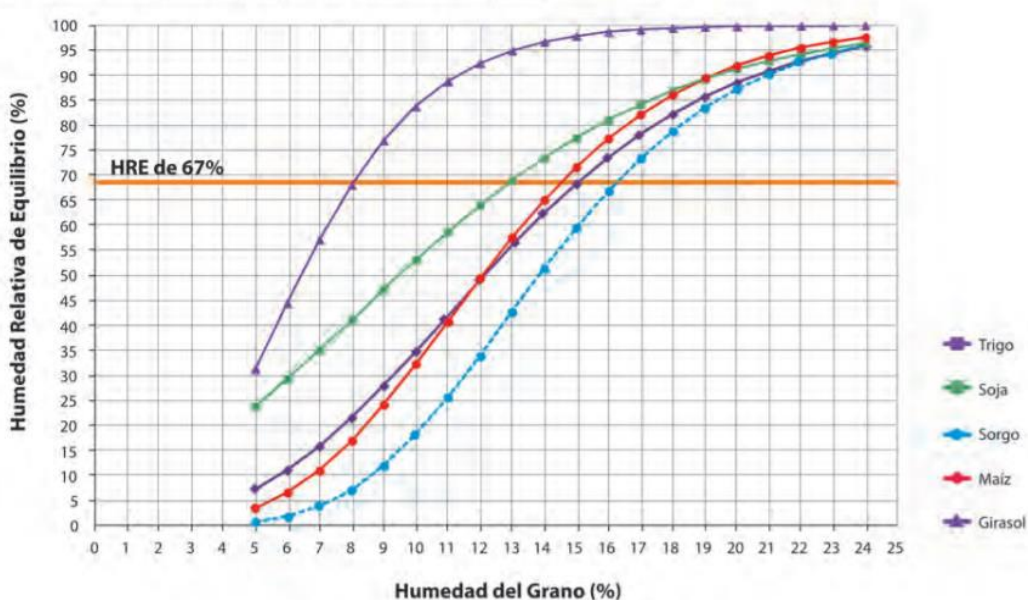


Figura 3: Curva humedad relativa de equilibrio para los principales granos a 25°C

Además, la humedad de almacenamiento seguro es afectada por la temperatura. Es decir, cuando la temperatura es mayor, la humedad de almacenamiento segura disminuye.

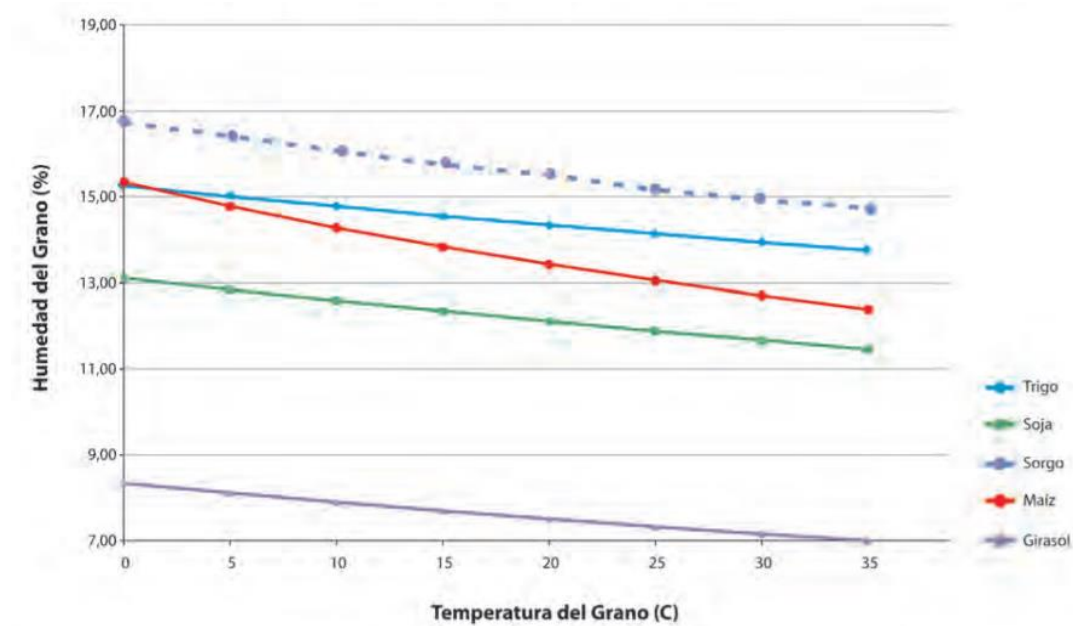


Figura 4: Humedad almacenamiento seguro en función de temperatura

Es debido a que los valores de humedad al momento de extracción son similares a los de almacenamiento que tomamos estos como parametro.

1.3.3 Dióxido de carbono

El monitoreo periódico de CO_2 puede ser utilizado como una herramienta para detectar el aumento en la actividad biológica en silo bolsa e identificar grano en proceso de descomposición.

El balance de gases (concentración de CO_2 y O_2) en el silo bolsa depende del equilibrio entre el ingreso de O_2 y la pérdida CO_2 al medio ambiente debido a la permeabilidad de la cubierta plástica y la relación que se establece con la respiración (consumo de O_2 y generación de CO_2) del ecosistema, la cual es dependiente de la temperatura y humedad del grano embolsado. [5]

Según estudio [10], la medición de la concentración de CO_2 puede ser una herramienta para detectar problemas tempranos de granos dañados.

Los resultados obtenidos, muestran las concentraciones típicas de CO_2 para bolsas de trigo y soja con evidencia de grano afectado y con condiciones de almacenaje seguras.

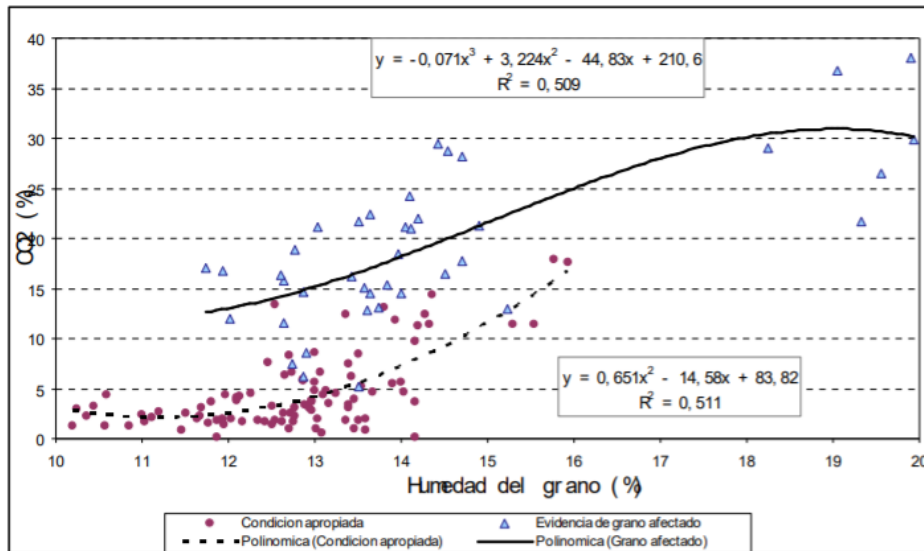


Figura 5: Concentración de CO₂ en bolsas de trigo a diferentes contenidos de humedad

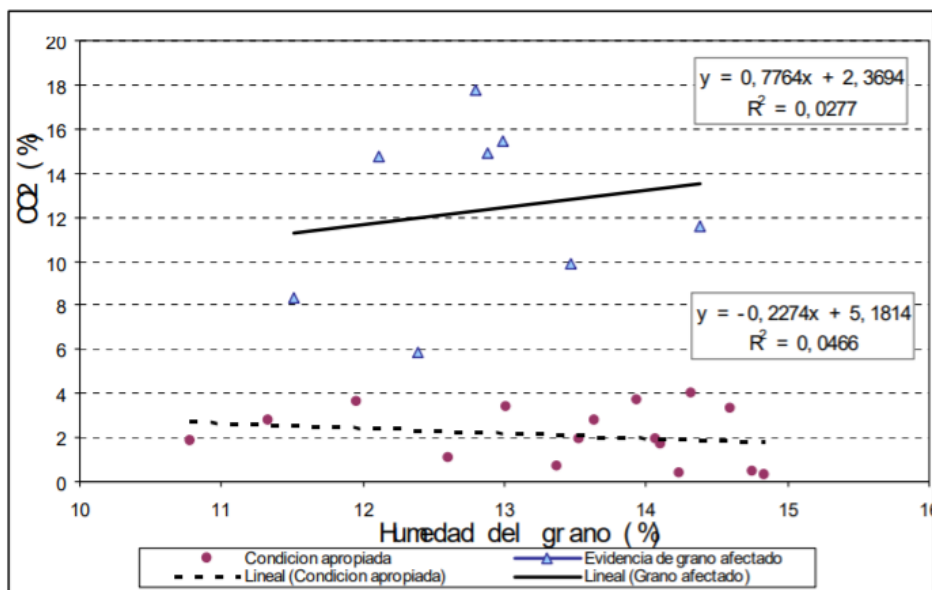


Figura 6: Concentración de CO₂ en bolsas de soja a diferentes contenidos de humedad

Por otro lado, se muestra que la humedad del grano de soja no afecta la concentración de CO₂ de bolsas con condiciones de almacenaje seguras (humedad entre 11 y 15%). Así, cualquier medida de concentración de CO₂ por debajo del 4% significa condición de almacenaje “seguro”, entre 4 y 12% condiciones “riesgosas” y por encima de 14% condiciones “inseguras”.

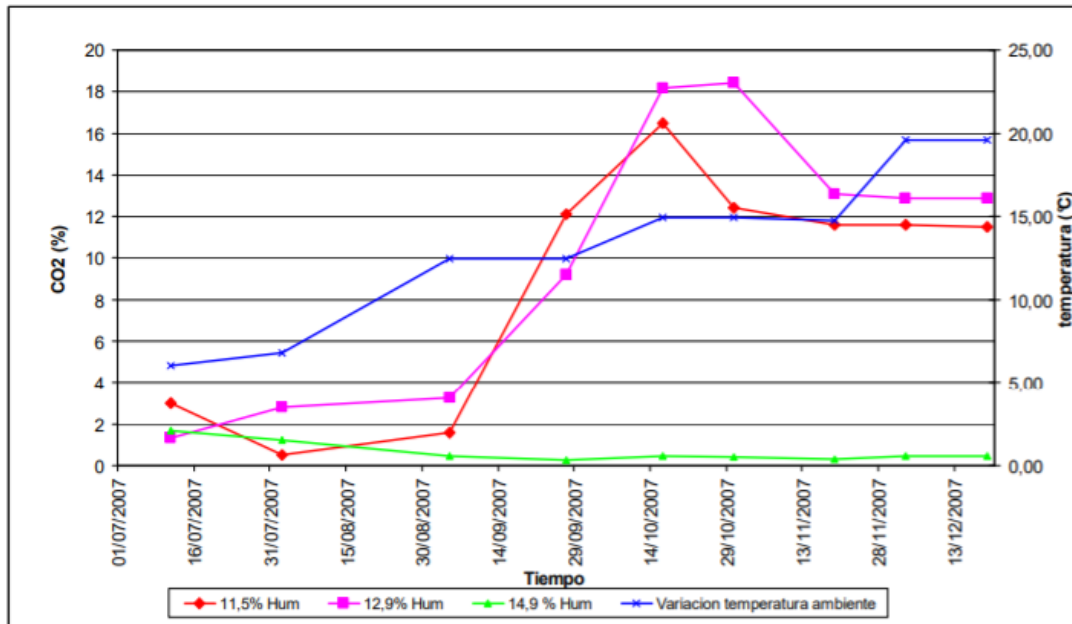


Figura 7: Concentración de CO₂ de tres bolsas de soja con 11,5%, 12,9% y 14,9% de humedad y variación de la temperatura media del ambiente

1.4 Fundamentación del sistema

El monitoreo del grano almacenado en bolsas mediante el calado tradicional es un proceso bastante fácil de implementar. Sin embargo, cada perforación hecha en la cubierta plástica disturba la hermeticidad del sistema, lo cual limita el número de muestras que se pueden recoger de cada bolsa y la frecuencia de muestreo. Además, este monitoreo es útil para obtener una idea de la calidad total del grano almacenado en la bolsa, pero no es conveniente para detectar problemas tempranos de almacenaje, ya que la mayor parte del proceso de descomposición del grano ocurre en lugares muy localizados de la masa del grano, típicamente en el fondo de la bolsa, donde la punta del calador no llega a recoger la muestra. Otra desventaja de esta metodología es la cantidad de mano de obra y tiempo implicado. [10]

Debido a esto, se propone un sistema de monitoreo del ambiente dentro del silo bolsa que cuenta con un conjunto de sensores distribuidos que permiten conocer el estado del grano almacenado de forma remota.

1.4.1 Rangos de las variables a monitorear

En base a la investigación sobre las condiciones de almacenamiento, se confeccionaron tablas de valores a fin de delimitar los rangos de las variables a monitorear dentro del silobolsa y que luego serán utilizadas por el sistema para brindar al usuario la información sobre el estado del grano.

TEMPERATURA		
VALOR	MENSAJE	DESCRIPCIÓN
TEMP < 35°C	NORMAL	Condiciones normales
35°C < TEMP < 50°C	ALTO	Posibilidad de deterioro del grano
50°C < TEMP < 70°C	MUY ALTO	Deterioro del grano
TEMP > 70°C	EXTREMO	Extremadamente alto

Tabla 3: Valores críticos de temperatura

CO ₂		
VALOR	MENSAJE	DESCRIPCIÓN
0% < CO ₂ <= 4%	NORMAL	Almacenamiento seguro
4% < CO ₂ <= 16%	ALTO	Almacenamiento riesgoso
16% < CO ₂ <= 30%	MUY ALTO	Almacenamiento muy riesgoso
CO ₂ > 30%	EXTREMO	Almacenamiento inseguro

Tabla 4: Valores críticos de CO₂

HUMEDAD RELATIVA		
VALOR	MENSAJE	DESCRIPCIÓN
0% < HUM < 67%	NORMAL	Almacenamiento seguro
HUM > 67%	ALTO	Almacenamiento riesgoso
HUMEDAD INTERGRANARIA		
TRIGO		
VALOR	MENSAJE	DESCRIPCIÓN
0% < HUM < 14%	NORMAL	Seguro
14% < HUM < 21%	ALTO	Riesgoso, posible deterioro del grano
HUM > 21%	MUY ALTO	Inseguro, posibles filtraciones
GIRASOL		
VALOR	MENSAJE	DESCRIPCIÓN
0% < HUM < 7,5%	NORMAL	Seguro
7,5% < HUM < 11%	ALTO	Riesgoso, posible deterioro del grano
HUM > 11%	MUY ALTO	Inseguro, posibles filtraciones
MAIZ		
VALOR	MENSAJE	DESCRIPCIÓN
0% < HUM < 14%	NORMAL	Seguro
14% < HUM < 19%	ALTO	Riesgoso, posible deterioro del grano
HUM > 19%	MUY ALTO	Inseguro, posibles filtraciones
SORGO		
VALOR	MENSAJE	DESCRIPCIÓN
0% < HUM < 13,5%	NORMAL	Seguro
13,5% < HUM < 21%	ALTO	Riesgoso, posible deterioro del grano
HUM > 21%	MUY ALTO	Inseguro, posibles filtraciones
SOJA		
VALOR	MENSAJE	DESCRIPCIÓN
0% < HUM < 12%	NORMAL	Seguro
12% < HUM < 20%	ALTO	Riesgoso, posible deterioro del grano
HUM > 20%	MUY ALTO	Inseguro, posibles filtraciones

Tabla 5: Valores críticos de humedad

Capítulo 2: Desarrollo

2.1 Descripción del Sistema

El sistema desarrollado se compone principalmente por dos componentes, un sistema de adquisición de datos que incluye a los Gateways y Nodos y un sistema virtual que integra la base de datos, la página web y el enlace entre el Gateway y la base de datos.

El sistema de adquisición de datos distribuye Nodos dentro del silo bolsas cuyo objetivo es obtener mediciones de Temperatura, Humedad y CO2. Estos datos son posteriormente transmitidos al Gateway asociado a estos Nodos a través de Radio Frecuencia. Una vez recibidos, el Gateway los procesa y transmite la base de datos por medio de la red de telefonía móvil disponible.

El sistema virtual comienza por la Cloud Function, la cual recibe transmisiones de los Gateways y las procesa con el fin de almacenarlas adecuadamente en la Base de Datos. Además, el sistema provee al usuario una interfaz a través de una Página Web que toma la información de la Base de Datos y la muestra de forma simple e intuitiva.

A continuación, se incluye un diagrama en bloques general del sistema completo.

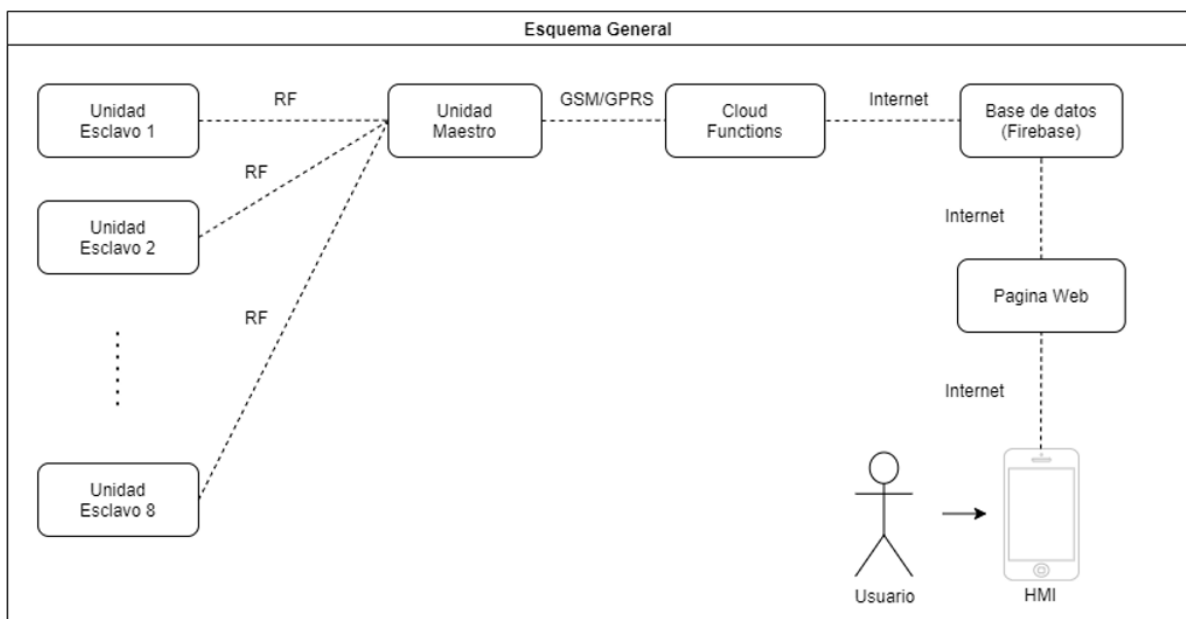


Figura 8: Esquema general

2.1.1 Nodo

2.1.1.1 Estructura

Las unidades del tipo Nodo se componen de un circuito impreso con los componentes electrónicos necesarios y una carcasa cilíndrica que protege las partes internas de la presión provocada por los granos del silo bolsa.

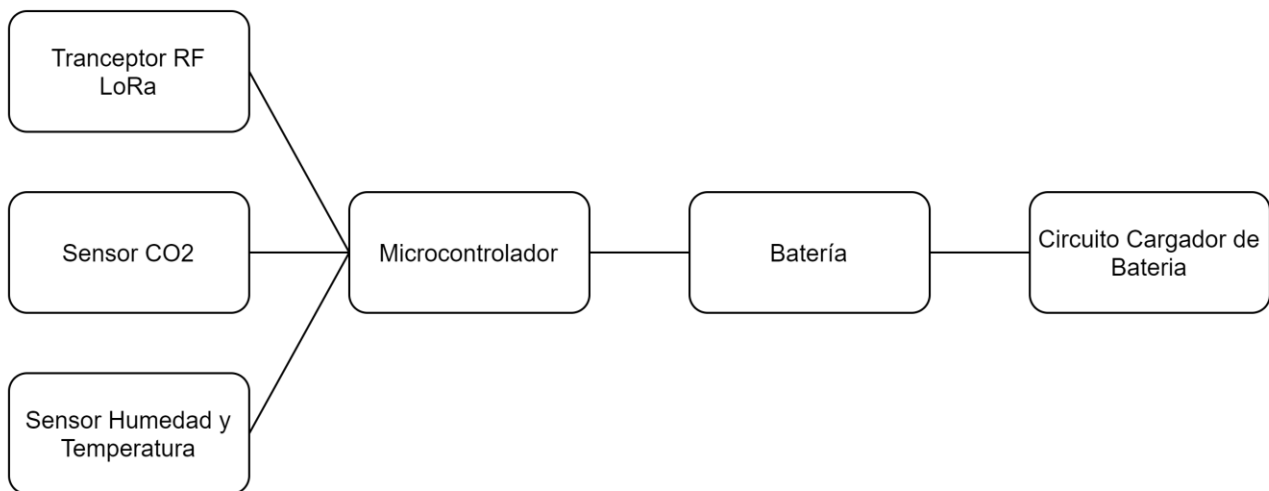


Figura 9: Estructura de Nodo

Estas unidades funcionaran a batería durante todo el periodo de tiempo que permanezcan dentro del silo bolsa, y es por esto por lo que se diseñaron para tener un consumo de corriente muy bajo. Además, su modo de operación está pensado para lograr el mayor ahorro de batería posible.

2.1.1.2 Componentes

Los módulos del tipo Nodo están compuestos por:

- Microcontrolador

Para la selección del microcontrolador se optó por la utilización del ATMEGA328P [11], actualmente fabricado por Microchip.

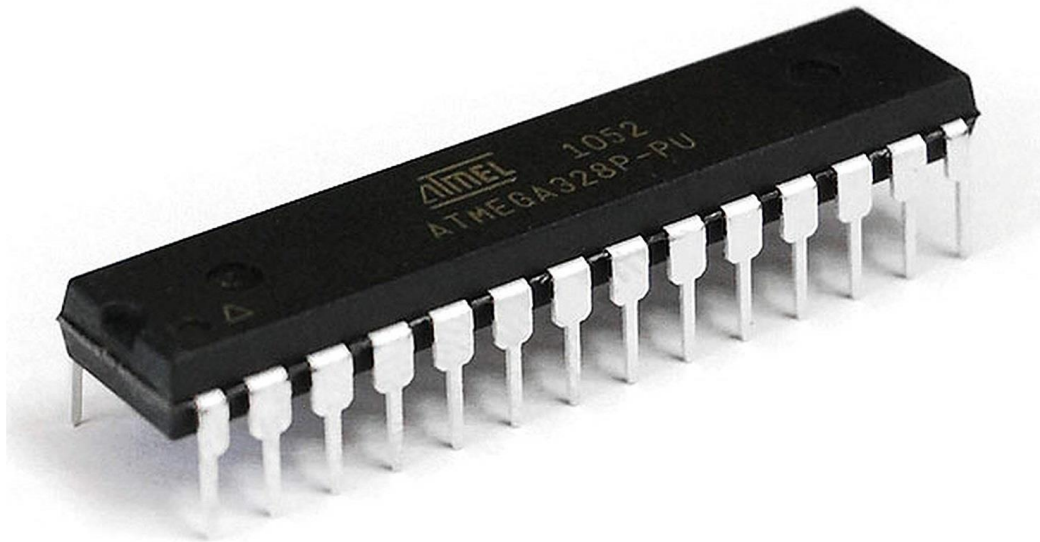


Figura 10: ATMEGA328

Las características de este microcontrolador satisfacen las necesidades de las unidades tipo Nodo y son las siguientes:

- 23 pines de entrada/salida
- Interfaz serial Two-Wire
- Puerto SPI
- Conversor analógico digital de 10 bits
- Watchdog Timer programable
- 5 modos de ahorro de energía
- Oscilador interno
- Tensión de trabajo de 1,8 voltios a 5,5 voltios

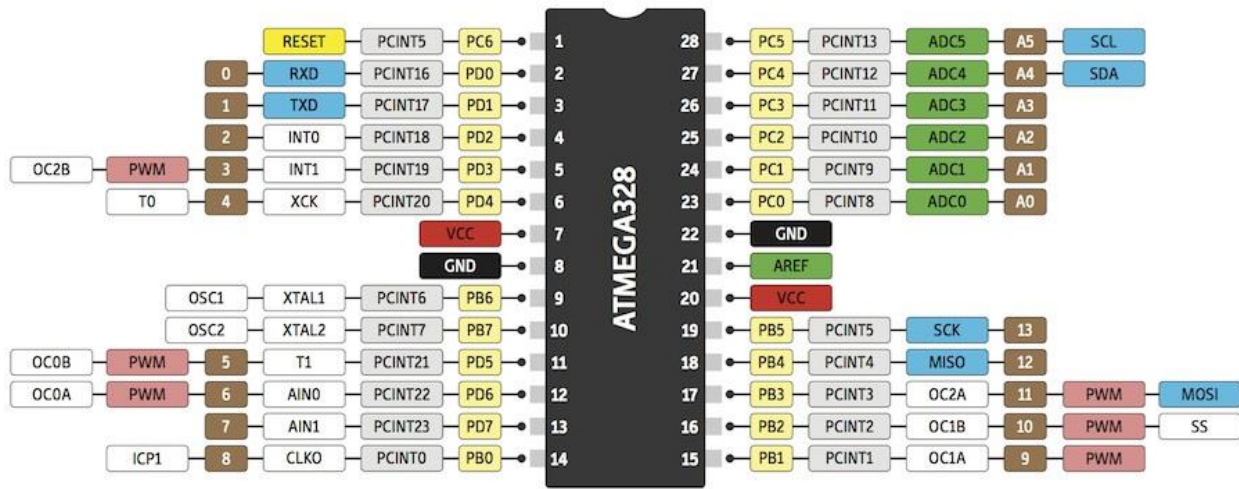


Figura 11: Pinout de ATMEGA328

La interfaz serial Two-Wire es la que permite la comunicación por medio del protocolo i2c, el cual es utilizado por los sensores selectos para este sistema. En el protocolo i2c cada esclavo tiene una dirección única, usualmente denotada en hexadecimal.

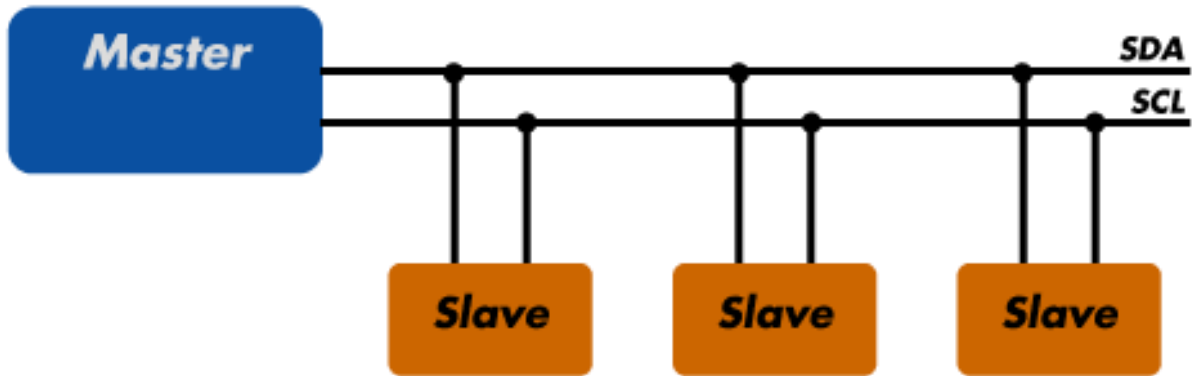


Figura 12: Pinout de ATMEGA328

El puerto SPI se utiliza para la comunicación entre el microcontrolador y el módulo RF LoRa. A diferencia del i2c, este método de comunicación necesita una línea extra por cada esclavo, la cual le indica que el mensaje es dirigido a él.

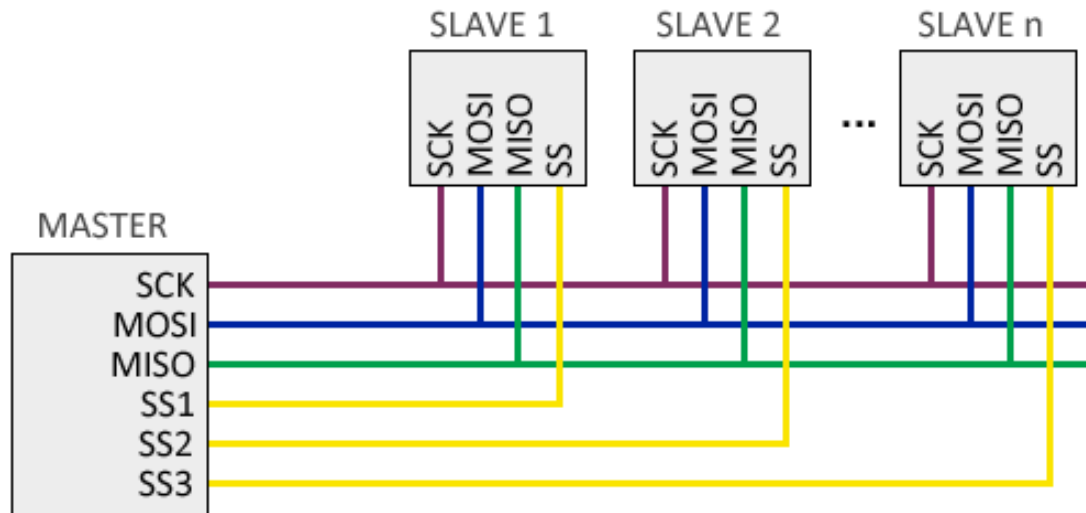


Figura 13: Esquema comunicación SPI

A fin de reducir el consumo eléctrico, el microcontrolador se configura para la utilización del oscilador interno a la frecuencia de 1 MHz, que es la menor posible, logrando así la eliminación del cristal oscilador externo. Esta práctica en conjunto con el modo de ahorro de energía “sleep” consiguen llevar la corriente del microcontrolador a 4 micro amperes.

Cuando se utiliza uno de los modos de ahorro de energía es necesario también que se emplee un modo de reactivar microcontrolador. Por esto, se optó por la utilización del Watchdog Timer, que es una interrupción dentro del código del microcontrolador. Dado que en este caso los periodos de tiempo en los que el microcontrolador debe permanecer en estado de reposo son extensos, del orden de horas, se configura la interrupción del Watchdog Timer en el periodo más alto, que equivale a 8 segundos.

La tensión de funcionamiento es un factor importante al momento de seleccionar una fuente de alimentación para el sistema. Siendo este un sistema que funciona a baterías se debe tener en cuenta que la tensión de la batería disminuye proporcionalmente a la carga restante en esta.

La tensión de la batería es monitoreada por medio de una de las entradas del convertor analógico digital del microcontrolador para asegurar que el sistema funcione solo mientras el nivel de tensión de la batería sea el adecuado, evitando así sobre descarga de la batería o malfuncionamiento de los sensores.

- Módulo de Radio Frecuencia

En cuanto a transmisión de datos por Radio Frecuencia se seleccionó un módulo LoRa, el SX1278 de SEMTECH [12]. Este funciona a una frecuencia de 433 MHz, es de pequeñas dimensiones, pero capaz de transmitir y recibir mensajes a kilómetros de distancia en las condiciones adecuadas. Su comunicación con el microcontrolador es por medio del puerto SPI, como se mencionó anteriormente y tiene la capacidad de emitir una interrupción al momento de recibir un mensaje.

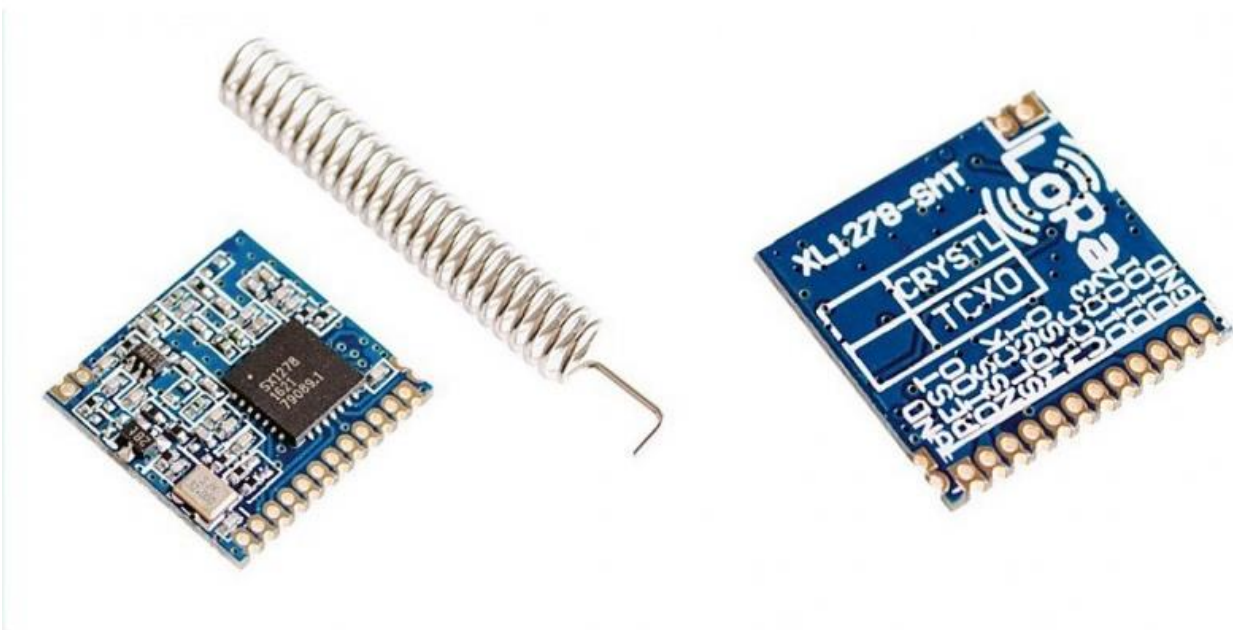


Figura 14: Módulo de radiofrecuencia LoRa

El módulo SX1278 funciona en un rango de tensión de los 1,8 a los 3,6 volts, lo que lo hace adecuado para este sistema y su consumo es de 1 micro amper en estado de espera.

Además, se incluye en su montaje una antena helicoidal adecuada para la frecuencia de trabajo.

- Sensor de CO₂

Para la medición CO₂ se seleccionó el sensor CCS811 [13], el cual es un sensor de gas digital de ultra bajo consumo diseñado para el monitoreo de calidad de aire. Este sensor detecta un amplio rango de Compuestos Orgánicos Volátiles y calcula mediante algoritmos propios del sensor la concentración equivalente de CO₂ en el ambiente.

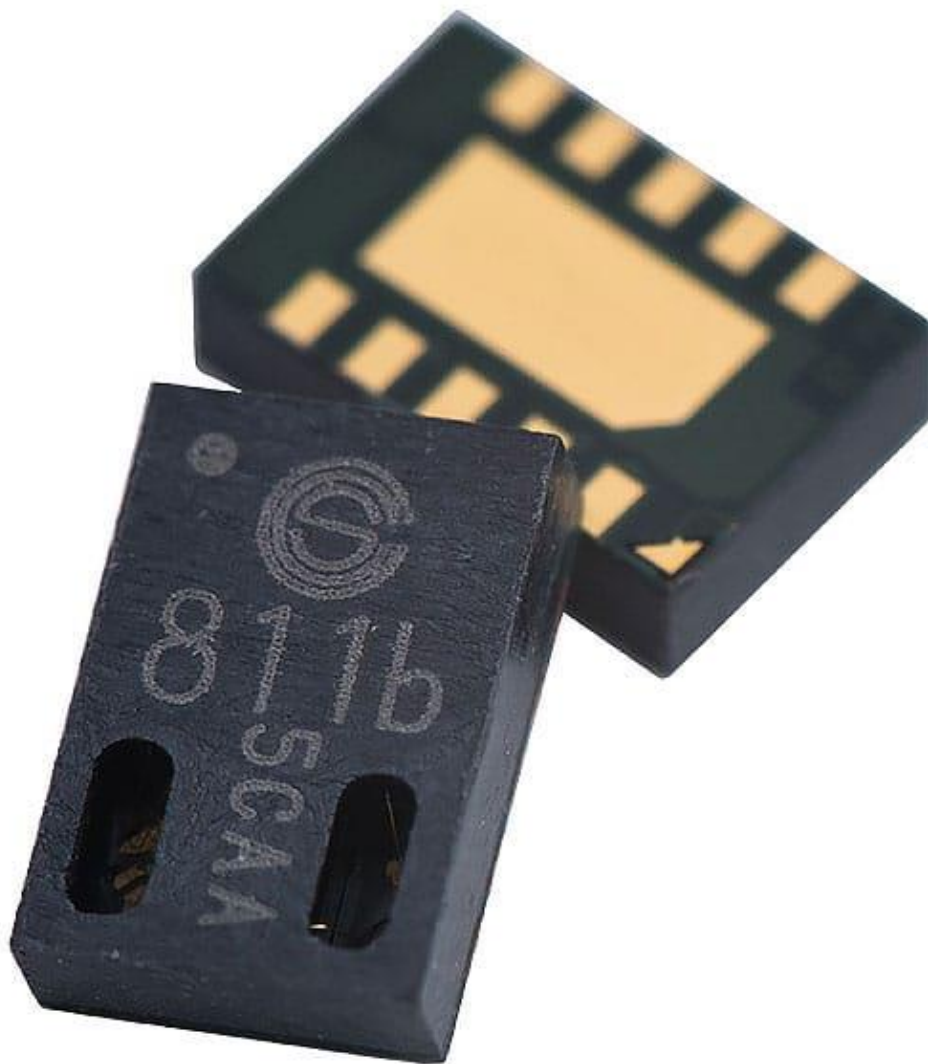


Figura 15: Sensor Dióxido de Carbono CCS811

Este sensor permite su lectura mediante comunicación i2c, así como también un modo de espera en el que su consumo energético se reduce resultando óptimo para sistemas a batería.

El sensor CCS811 permite una tensión de alimentación desde 1,8 hasta 3,6 volts. El consumo de este es de hasta 30 miliamperes al momento de realizar la lectura y necesita un periodo de precalentamiento de 20 minutos.

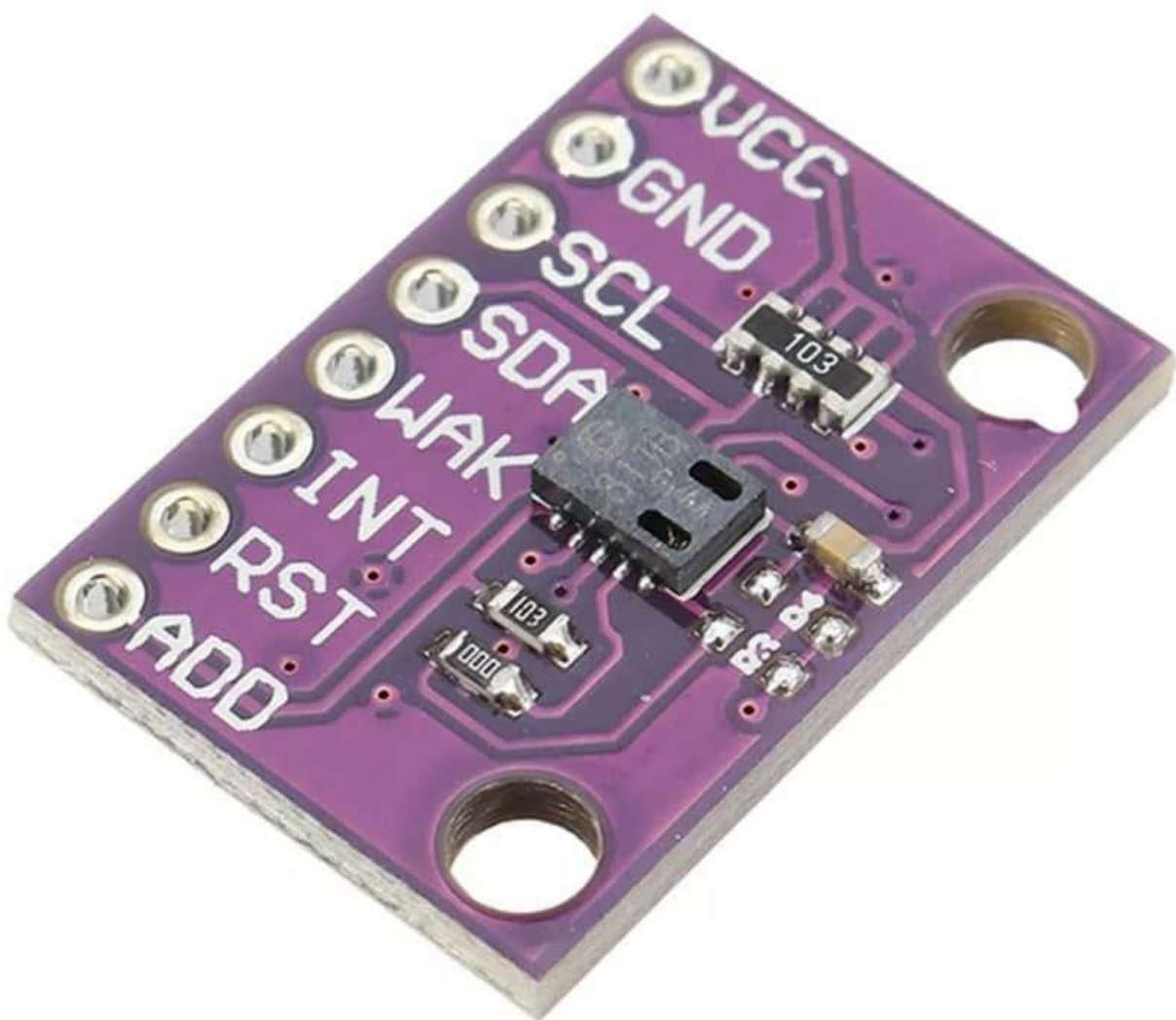


Figura 16: Modulo de sensor de Dióxido de Carbono

Los rangos de medición de este sensor son:

- 400 ppm a 32768 ppm de eCO₂ o equivalente CO₂, ya que es una medición indirecta.
- 0 ppb a 29206 ppb de eTVOC o equivalente de compuestos orgánicos volátiles.

- Sensor de Humedad y Temperatura

El AHT10 [14] es un sensor de temperatura y humedad de nueva generación, de un tamaño muy reducido, calibrado de fábrica y estable a lo largo de su tiempo de uso. Puede medir humedad relativa y temperatura con una repetibilidad de +/- 0,1 %, en rangos de 0% a 100% y -40°C a 85°C, respectivamente. La comunicación entre este sensor y el microcontrolador es a través de i2c.

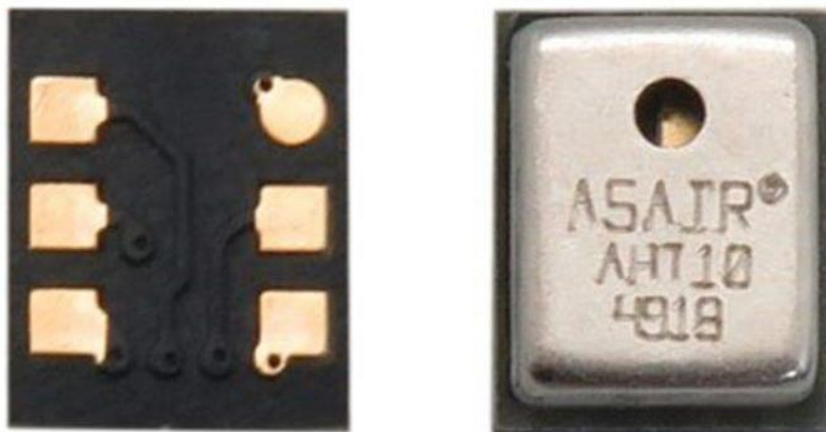


Figura 17: Sensor de temperatura y humedad AHT10

Su rango de tensión de alimentación varía desde 1,8 hasta los 3,6 volts y su consumo máximo de 23 micro amperes se da durante la medición, mientras que en reposo consume 0,25 micro amperes.

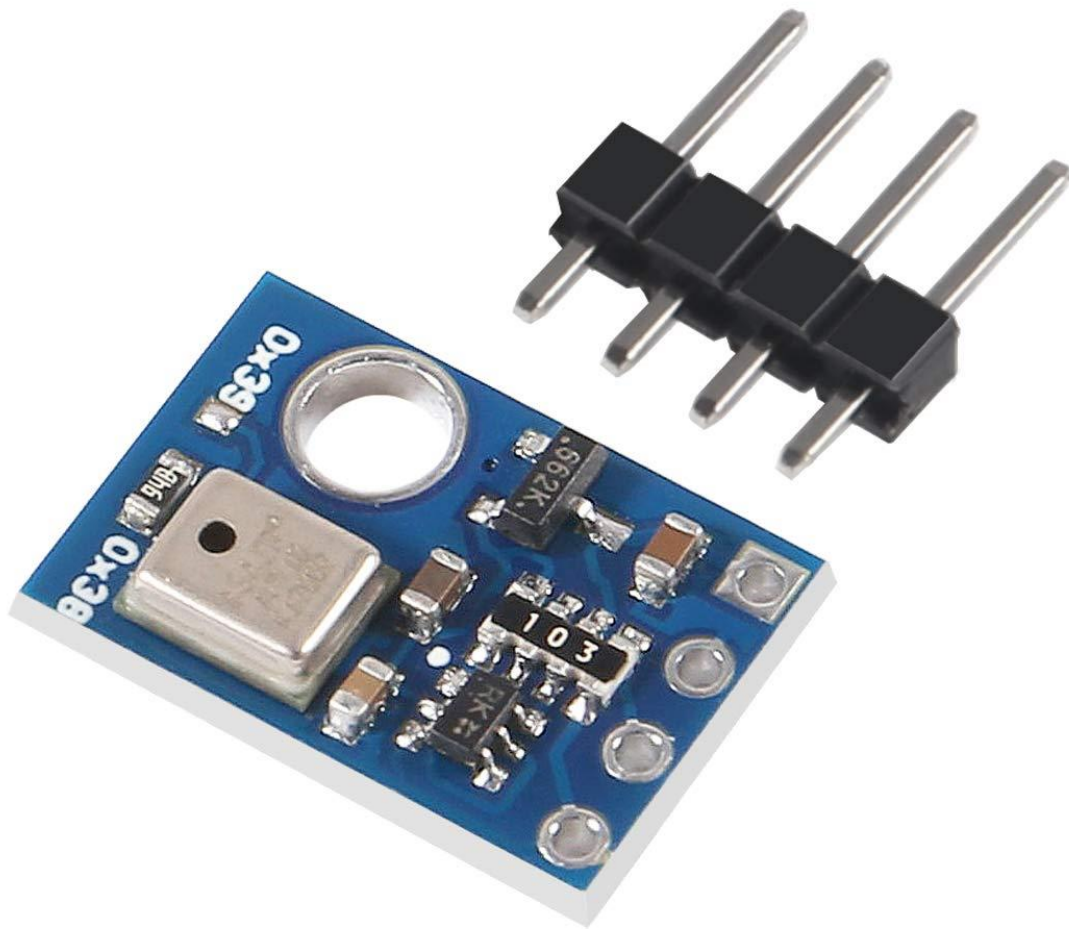


Figura 18: Modulo de sensor de Humedad y Temperatura

- Circuito de Carga de Batería

El circuito de carga de la batería se basa en el integrado TP4056 [15], este es un chip dedicado a la carga de celdas de Litio.



Figura 19: Circuito integrado TP4056

Este integrado puede obtenerse solo o en un módulo de carga que incluye los componentes pasivos necesarios además de un conector micro USB o USB C.

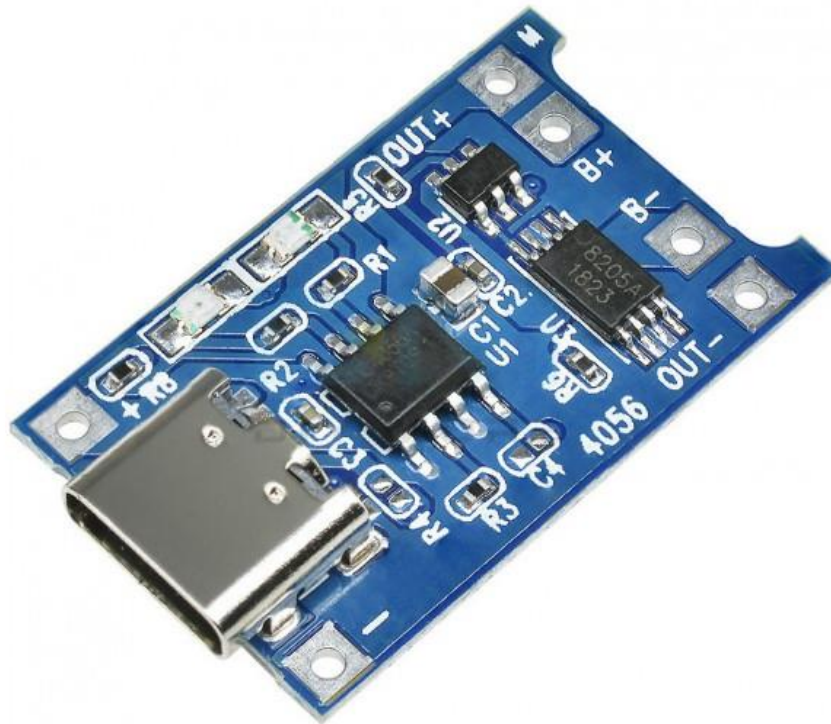


Figura 20: Modulo de carga de batería

El módulo sigue el esquema sugerido por el fabricante, que puede verse en la siguiente figura.

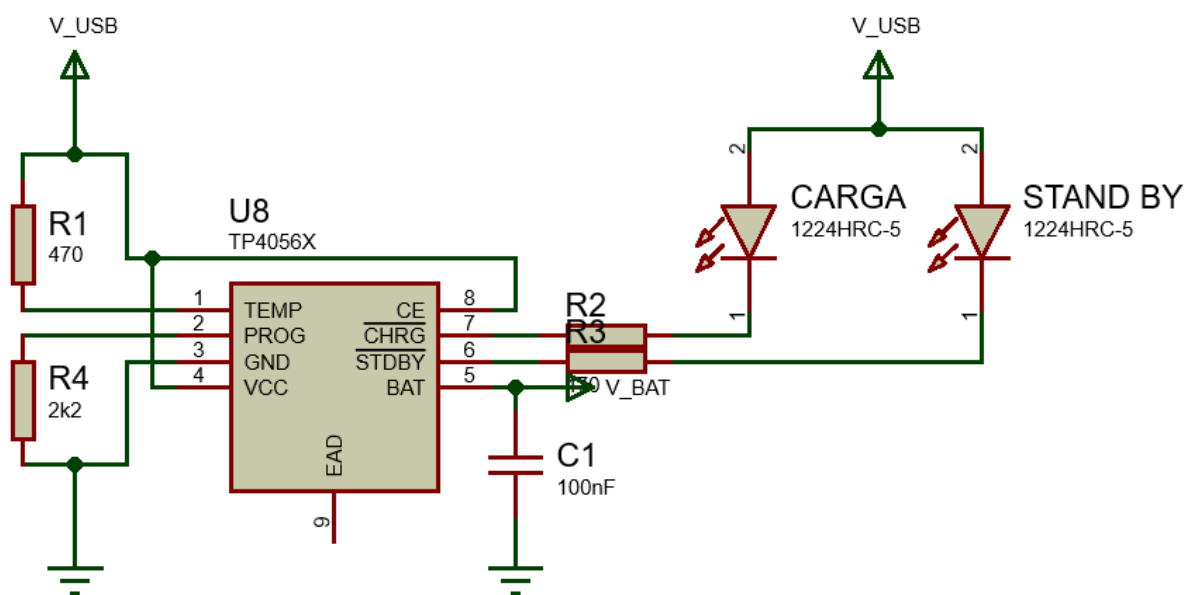


Figura 21: Circuito de carga de batería

La alimentación del circuito proviene de un conector USB hembra, el cual provee un voltaje de 5 volts. El integrado TP4056 controla el inicio y fin de la carga de la batería, así como también la corriente de carga, que está dada por la resistencia R4. En este caso, un valor de 2200 ohms equivale a una corriente de carga de aproximadamente 500 miliamperes, según la tabla proporcionada por el fabricante.

Rprog Current Setting

R _{PROG} (k)	I _{BAT} (mA)
10	130
5	250
4	300
3	400
2	580
1.66	690
1.5	780
1.33	900
1.2	1000

Ademas, el fabricante en su datasheet presenta una tabla con las distintas combinaciones de los dos LEDs indicadores del circuito, tal como se muestra en la siguiente imagen.

indicator light state

Charge state	Red LED $\overline{\text{CHRG}}$	Green LED $\overline{\text{STDBY}}$
charging	bright	extinguish
Charge Termination	extinguish	bright
Vin too low; Temperature of battery too low or too high; no battery	extinguish	extinguish
BAT PIN Connect 10u Capacitance; No battery	Green LED bright, Red LED Coruscate T=1-4 S	

La carga de la batería se da en dos tramos, en primer lugar se hace por medio de corriente constante y finalmente por tensión constante hasta alcanzar el voltaje máximo de la batería. Una gráfica de la corriente y tensión de la batería durante la carga puede apreciarse en la siguiente imagen.

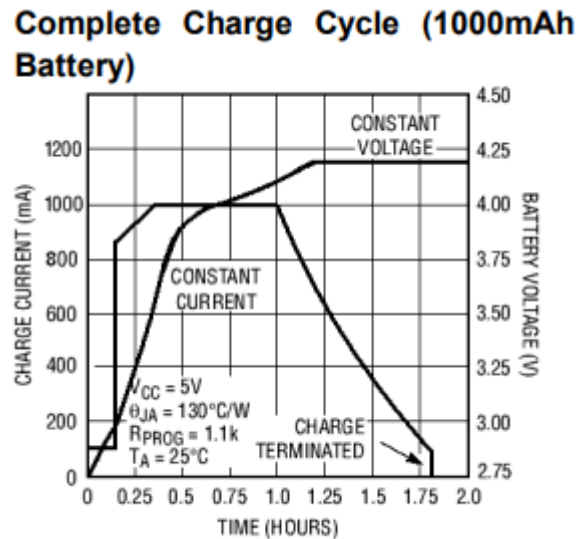


Figura 22: Ciclo de carga de batería

- Batería

En cuanto a baterías, se utilizaron dos celdas en paralelo del tipo 18650. Estas cuentan con las siguientes características:

- 2200 mAh de Capacidad
- 3,6 volts nominales
- 4,2 volts máximos, al cargar
- 2,75 volts mínimos, al descargar
- 2200 mA corriente máxima de carga.



Figura 23: Celda de litio formato 18650

2.1.1.3 Calculo duración de baterías

Se graficó el consumo del circuito durante un ciclo completo de 12 horas. La mayor parte del ciclo el dispositivo se encuentra en modo de reposo (sleep). Se necesitan 20 minutos con los sensores encendidos para realizar el precalentamiento (preheat) de estos. La transmisión (Tx) de los datos mediante radiofrecuencia es la parte más breve del ciclo, pero con el consumo más alto.



Figura 24: Consumo de corriente de Nodo

Se elaboró una tabla con los consumos y el respectivo porcentaje de tiempo dentro del ciclo, a fin de encontrar un promedio de consumo en las 12 horas.

Estado	Consumo	Porcentaje en el ciclo
Sleep	0,043 [mA]	97,228%
Preheat	21,9 [mA]	2,77%
Tx	140 [mA]	0,002%

Tabla 6: Consumos de estados en Nodo

Los datos dieron como resultado un consumo promedio de 0,65 [mA]. Si la batería tiene un total de 8800 [mAh], la duración estimada es de 14 meses. Este valor es teórico ya que la batería pierde capacidad dependiendo de la temperatura, corriente de descarga, y tiempo desde la última carga.

2.1.1.4 Desarrollo del firmware

Setup

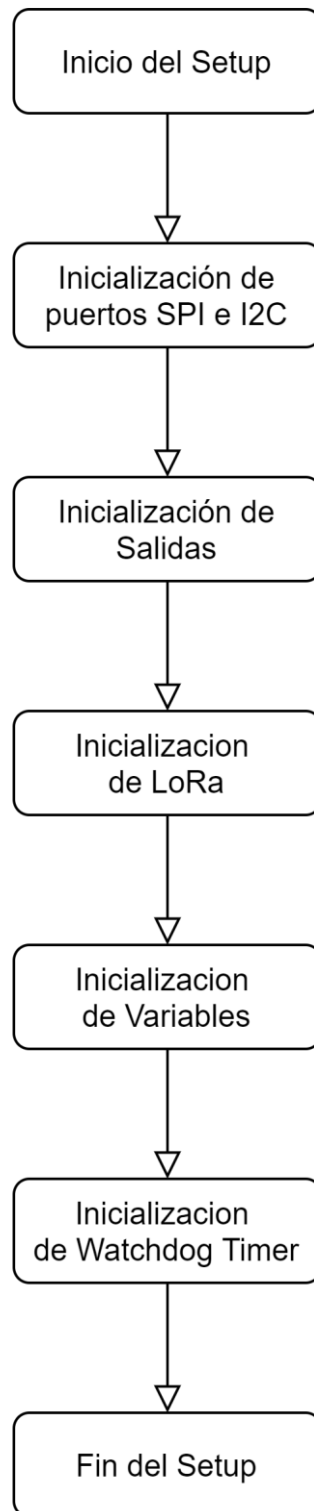


Figura 25: Función setup de Nodo

Loop

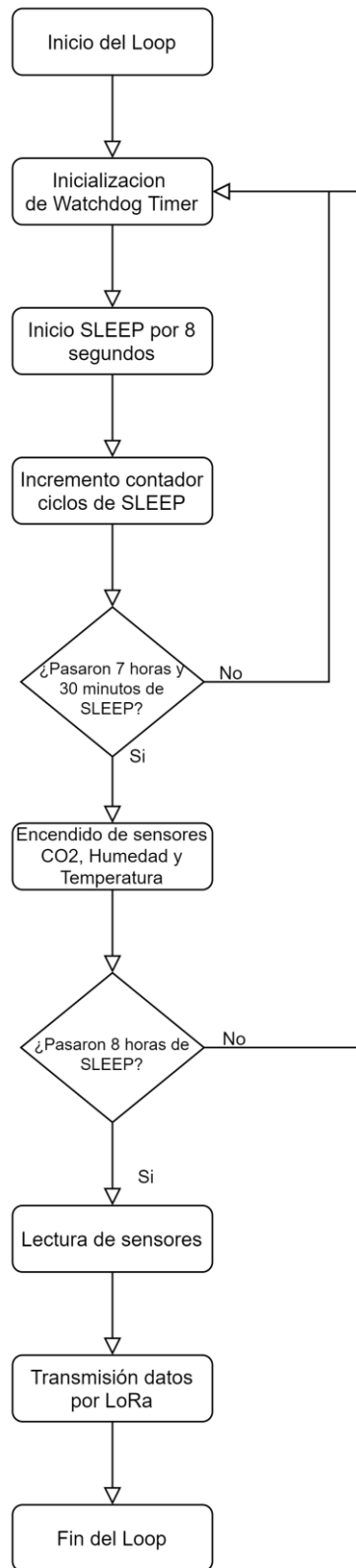


Figura 26: Función loop de Nodo

Interrupción Watchdog Timer

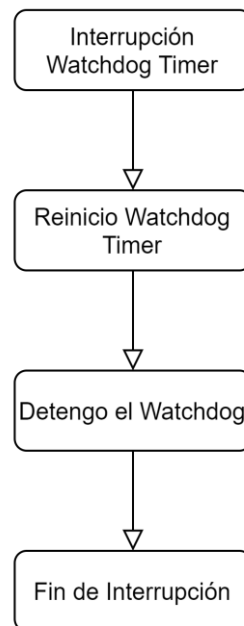


Figura 27: Interrupción de watchdog timer en Nodo

2.1.1.5 Problemas encontrados

Uno de los principales problemas fue el consumo del circuito, que debió reducirse todo lo posible para maximizar la duración de la batería. A fin de lograr esto se implementó lo siguiente:

- Utilizar el modo sleep del microcontrolador
- Utilizar el modo sleep del módulo LoRa
- Apagar los sensores durante el sleep del microcontrolador
- Reducir la frecuencia y voltaje de trabajo del microcontrolador

Todas aportaron a la solución, reduciendo el consumo durante el modo sleep a valores de microamperios. Sin embargo, el apagado de los sensores trajo un nuevo problema, fallas en las mediciones.

Para solucionar el nuevo problema en las mediciones, se inician los sensores 20 minutos antes de la medición, incrementando levemente el consumo

durante ese tiempo, pero permitiendo el precalentamiento de estos, y así, una correcta lectura de las variables.

2.1.2 Gateway

2.1.2.1 Estructura

La unidad de tipo Gateway resulta más sencilla que los Nodos ya que su trabajo es hacer la conexión entre los datos obtenidos por los sensores y la base de datos, recibiendo los mensajes a través de radiofrecuencia y retransmitiéndolos por la red telefónica hacia la base de datos.

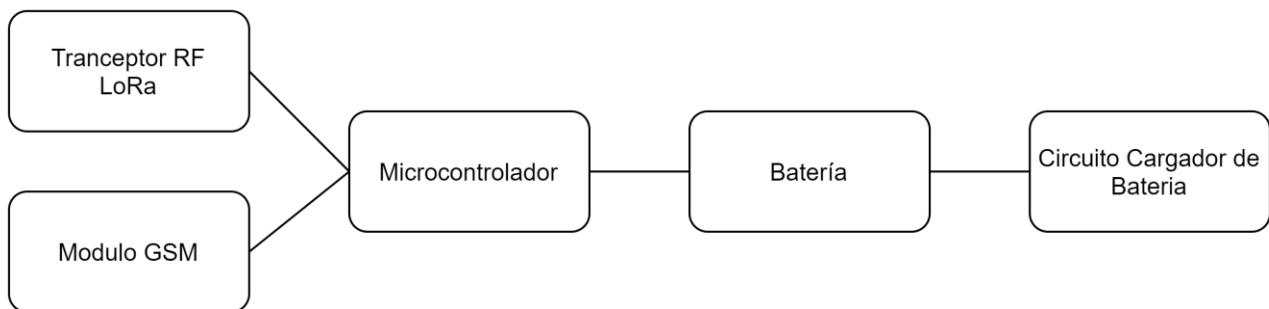


Figura 28: Diagrama de bloques de Gateway

2.1.2.2 Componentes

- Microcontrolador

El microcontrolador seleccionado para las unidades tipo Gateway es el ESP32 [16], de la marca Espressif.



Figura 29: ESP32 WROOM32

Este es un microcontrolador muy potente y de muy buenas características, las cuales serán listadas a continuación:

- CPU de 32-bit de doble núcleo, que puede operar a 80, 160 o 240 Mega Hertz.
- WiFi
- Bluetooth
- 4 interfaces SPI
- 2 interfaces I2C
- 3 UART
- Corriente de 5 μ A en modo de suspensión
- Despierta por interrupción de GPIO, temporizador, medidas de ADC, interrupción por sensor de tacto capacitivo

De estas, la más importante es la comunicación SPI, la cual habilita al microcontrolador la conexión con el módulo de radiofrecuencia LoRa y los múltiples puertos serie o UART, los cuales se utilizan para la comunicación

con el módulo GSM. Además, un puerto serie quedará disponible para ser conectado a una PC a fin de realizar correcciones o detección de errores al momento de instalar el sistema.

Para una mayor simplicidad, se utiliza en el sistema uno de los Kits de Desarrollo que implementan el microcontrolador ESP32 con el hardware mínimo necesario para su funcionamiento, como un conversor USB a TTL para conexión al ordenador, regulador de voltaje de 3,3 voltios, LEDs para indicación, entre otros.

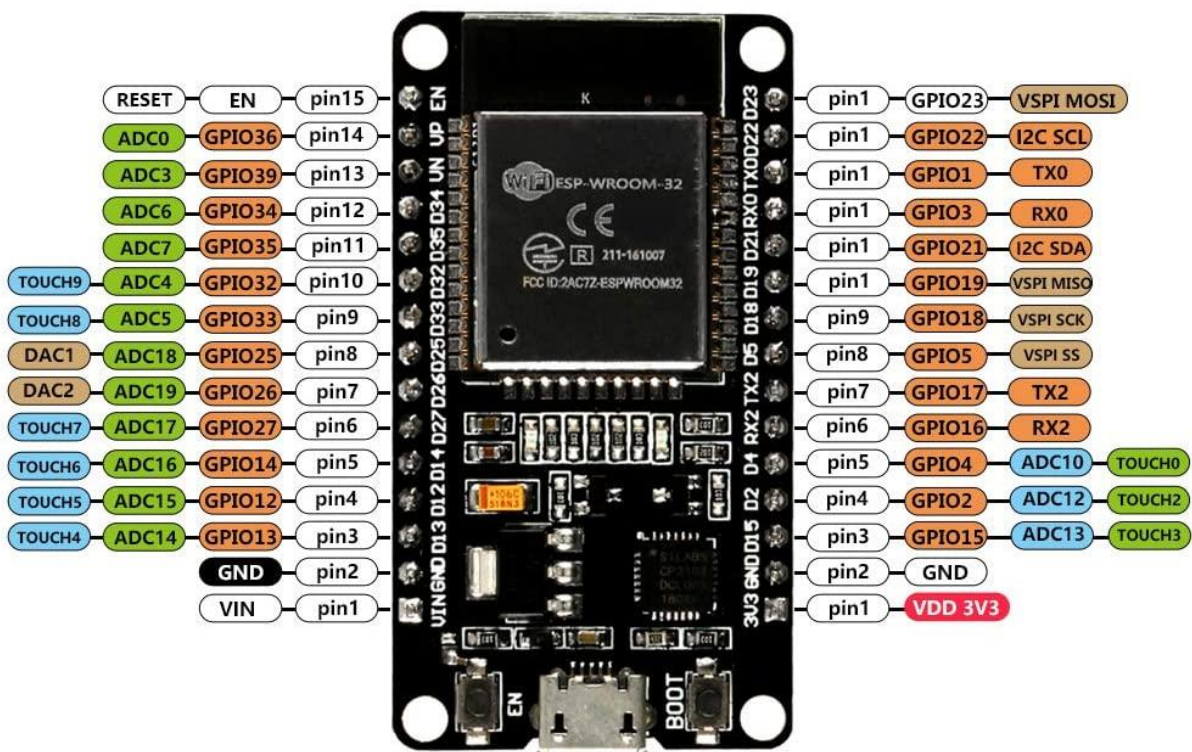


Figura 30: ESP32 en placa DevKitC

Comunicación Serie:

Como se mencionó, la comunicación entre el microcontrolador y el módulo GSM es serie o serial. La comunicación serie o comunicación secuencial, en telecomunicaciones e informática, es el proceso de envío de datos de un bit a la vez, de forma secuencial, sobre un canal de comunicación o un bus.

SERIAL

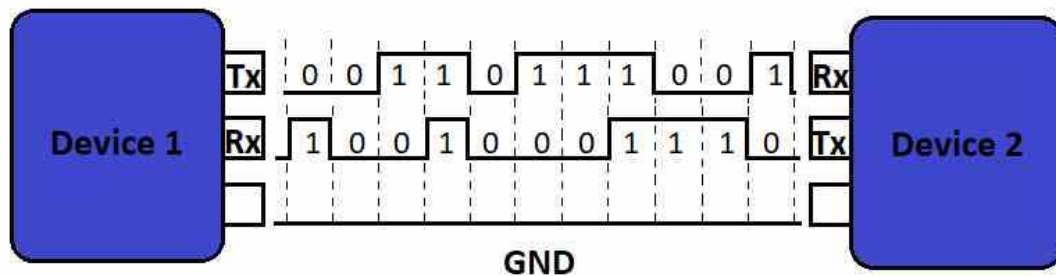


Figura 31: Comunicación Serial

La comunicación WiFi y Bluetooth no son utilizadas actualmente, pero se plantean como una mejora a futuro dando lugar a la posibilidad de visualización de los datos adquiridos en el lugar, sin necesidad de acceder a la web a través de internet. Esto podría realizarse mediante una aplicación móvil o un servidor web embebido en el microcontrolador.

- Modulo de Radio Frecuencia

El módulo de Radio Frecuencia seleccionado es el SX1278 de SEMTECH, al igual que el utilizado en las unidades tipo Nodo.

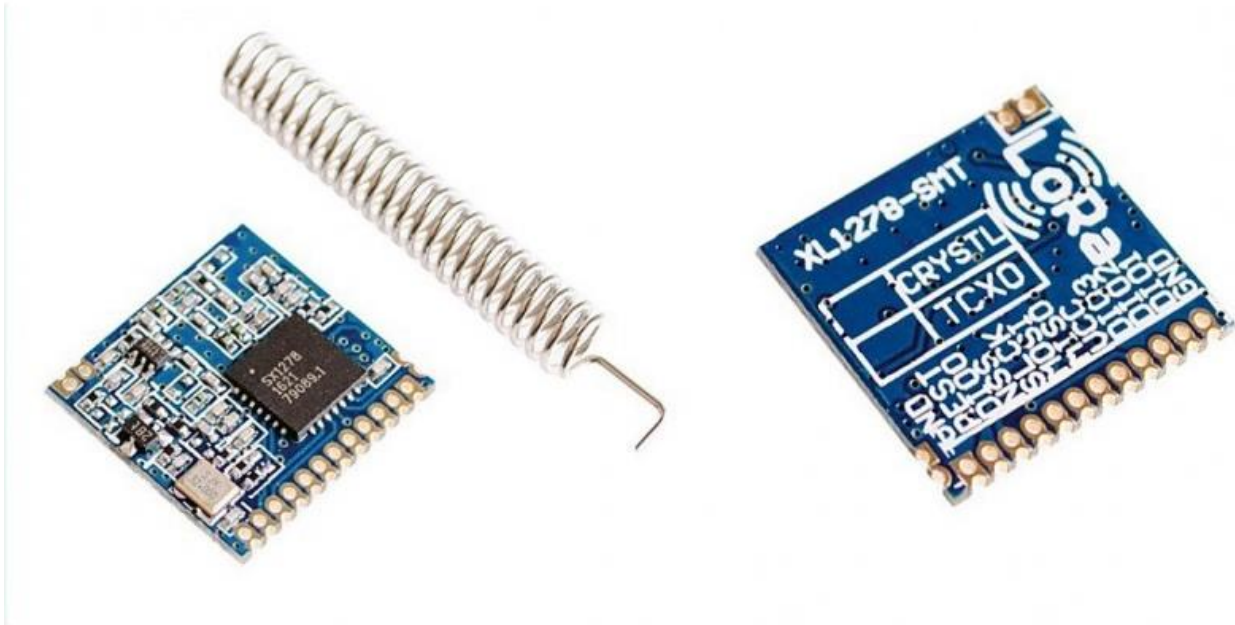


Figura 32: Modulo de radiofrecuencia LoRa

La diferencia yace en la implementación, mientras que en las unidades tipo nodo realiza la tarea de transmitir el mensaje cada vez que el ciclo de suspensión termina, en esta unidad debe estar encendido constantemente y siempre a la espera de un mensaje para no tener pérdidas en la recepción de estos. Cada vez que un mensaje es recibido, el módulo emite una interrupción al microcontrolador para dar aviso a este de que hay un nuevo mensaje y debe ser leído.

- Modulo GSM

La comunicación GSM es un elemento clave del sistema, ya que le permite operar en zonas remotas sin acceso a Internet cableado. El módulo GSM/GPRS A6 [17] de la marca Ai-Thinker provee conexión a internet, envío de SMS e incluso llamadas a través de redes de operadoras telefónicas.



Figura 33: Módulo GSM/GPRS A6

La comunicación entre este módulo y el microcontrolador es serial, a través de comandos AT o Hayes. El conjunto de comandos Hayes es un lenguaje desarrollado por la compañía Hayes Communications que prácticamente se convirtió en estándar abierto de comandos para configurar y parametrizar módems. Los caracteres AT, que preceden a todos los comandos, significan Atención, e hicieron que se conociera también a este conjunto de comandos como comandos AT.

Dado que este módulo resulta delicado a la hora de usarse, se optó por la utilización de un kit de desarrollo que contiene el A6, la antena, sócalo para tarjeta SIM y regulador de voltaje.



Figura 34: Modulo GSM/GPRS A6 en placa DevKit

- Circuito de Carga de Batería

El circuito de batería se reutiliza del implementado en las unidades tipo Nodo, basado en el TP4056.

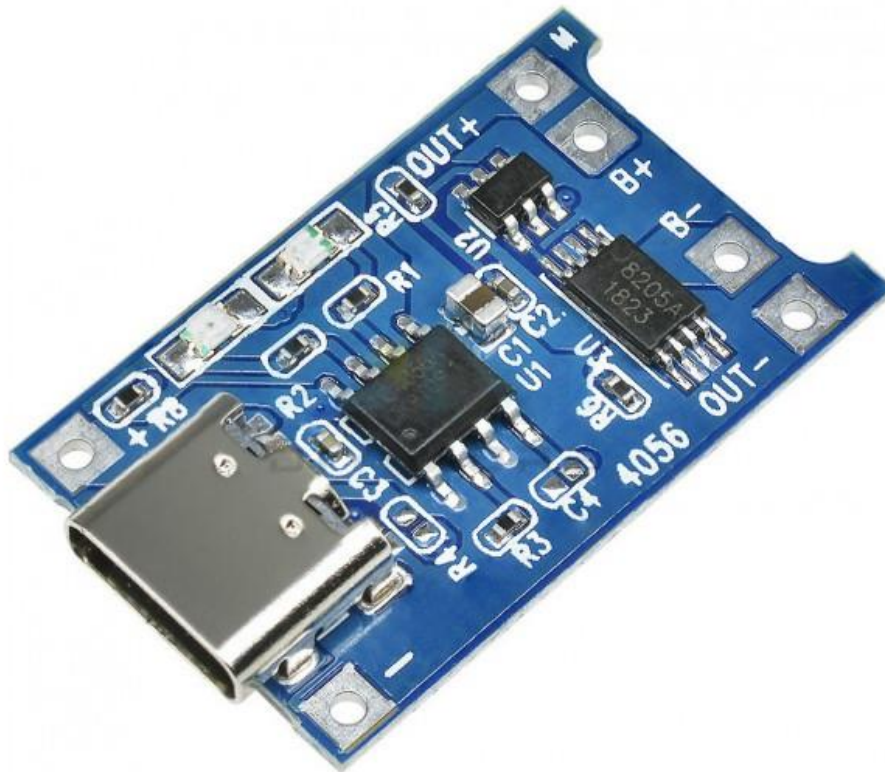


Figura 35: Modulo de carga de bateria

Se aprovecha como una ventaja que la unidad Gateway está ubicada en el exterior del silo y, gracias a esto, se permite agregar un panel solar que cargue la batería y proporcione energía durante el día, resultando en una menor cantidad de celdas de litio. Adicionalmente, no sería necesario trasladar esta unidad para cargarla una vez retirado el sistema ya que podría cargarse por sí sola.



Figura 36: Panel solar

En cuanto a las características del panel, se soportará hasta 24 voltios de entrada, que serán acondicionados por una fuente DC-DC a los 5 voltios necesarios por el cargador de batería.

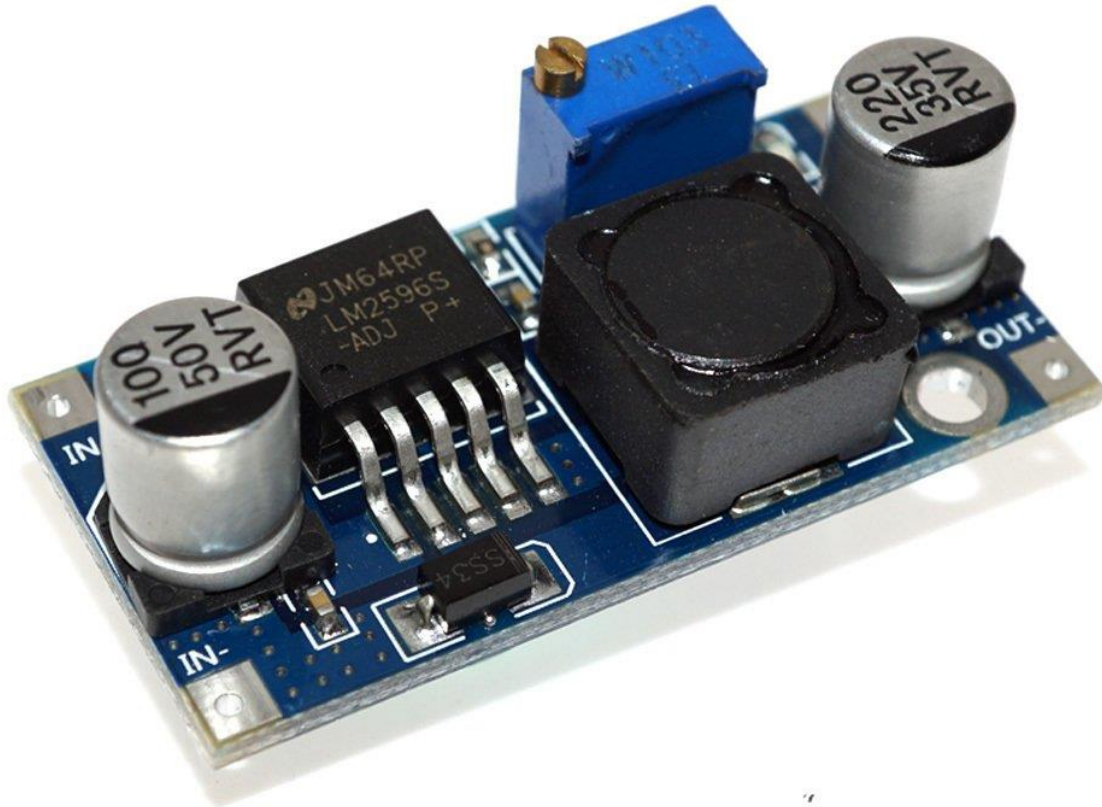


Figura 37: Fuente DC-DC reductora

Sin embargo, la corriente está limitada por la capacidad de carga del sistema, que es un máximo de 2 amperes.

- Batería

Para las baterías se utilizan seis celdas en paralelo del tipo 18650. Estas cuentan con las siguientes características:

- 2200 mAh de Capacidad
- 3,6 volts nominales

- 4,2 volts máximos, al cargar
- 2,75 volts mínimos, al descargar
- 2200 mA corriente máxima de carga.



Figura 38: Celda de litio formato 18650

2.1.2.3 Desarrollo del firmware

Setup

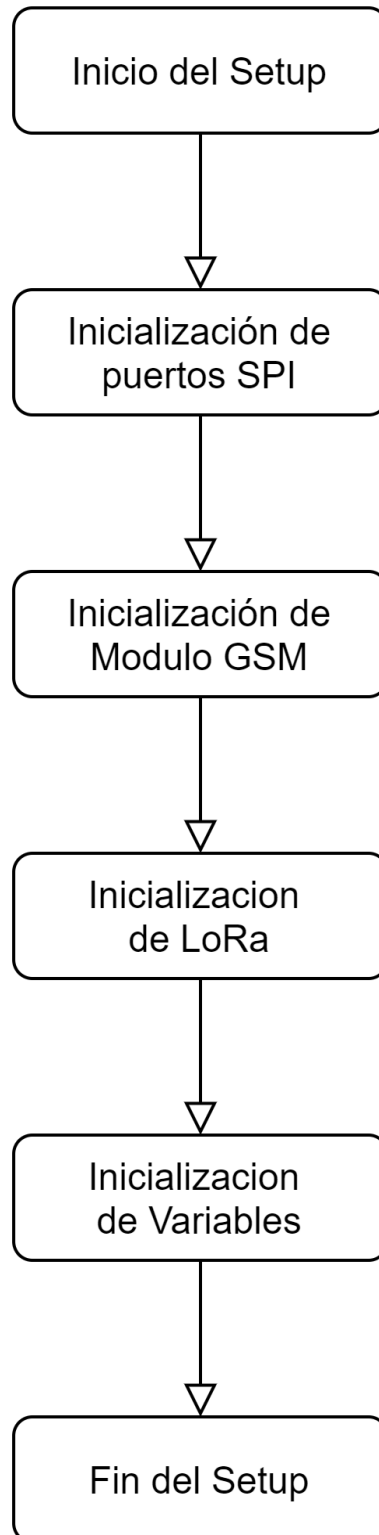


Figura 39: Función setup en Gateway

Loop

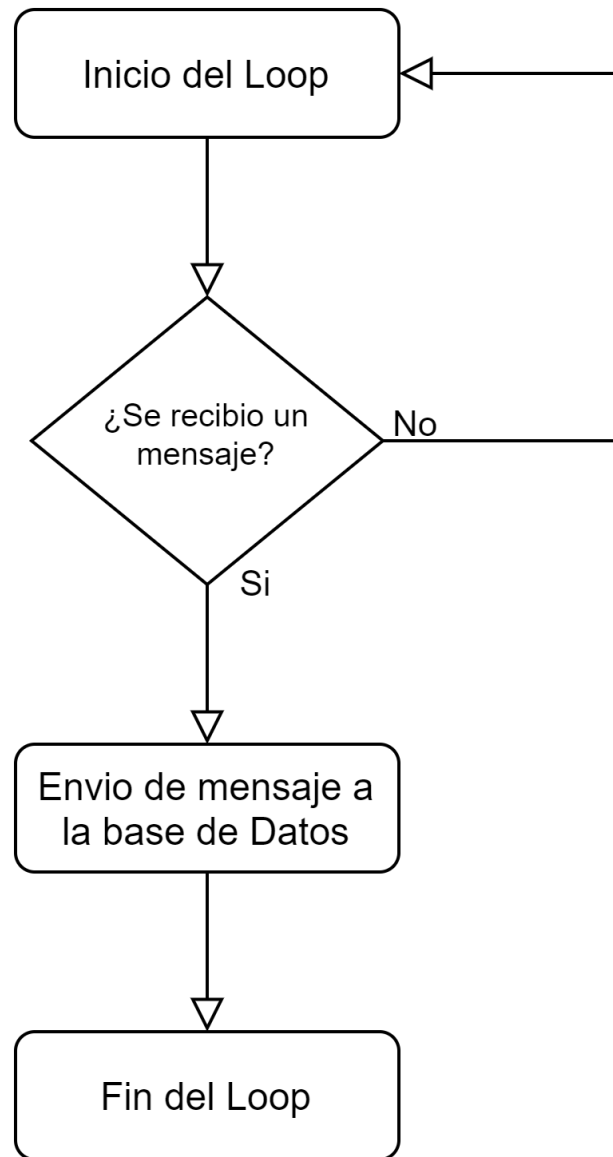


Figura 40: Función loop en Gateway

Interrupción LoRa

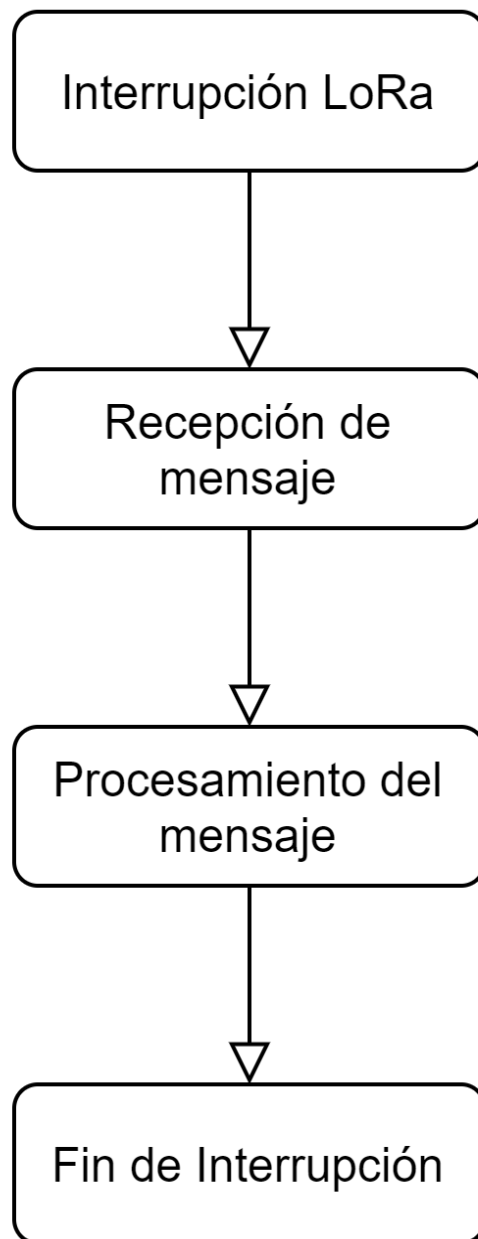


Figura 41: Interrupción de LoRa en Gateway

2.1.2.4 Problemas encontrados

En la unidad Gateway solo se presentó un problema respecto a la fuente de alimentación, donde el voltaje caía por debajo del necesario por el circuito para funcionar. Esto se daba en dos ocasiones: al enviar un paquete por la red GSM/GPRS o al recibir un paquete por LoRa. La solución fue la colocación de un capacitor lo suficientemente grande para suministrar la corriente necesaria en esos eventos y el resultado fue satisfactorio.

Al investigar sobre el problema se encontró que esto es una falla común en estos módulos, ya que tienen un consumo muy alto al momento de enviar o recibir un mensaje.

2.1.3 Base de Datos

Ya que este sistema se basa en la adquisición, almacenamiento y visualización de información, una base de datos en tiempo real es imprescindible. Por este motivo es que se eligió Firebase [18], una plataforma de Google para el desarrollo de aplicaciones web, para cumplir ese propósito, que no solo brinda la base de datos sino también el hosting para la página web que será descrita más adelante.



Figura 42: Firebase

2.1.3.1 Descripción

La utilización de Firebase en este proyecto puede dividirse en tres partes:

- Base de datos en tiempo real
- Cloud Functions [19]
- Hosting web

2.1.3.2 Estructura

La base de datos en tiempo real almacena los datos en una forma estructurada y puede ser accedida por distintos métodos para su lectura y su escritura. Lleva una estructura muy simple, como puede verse en la siguiente imagen.

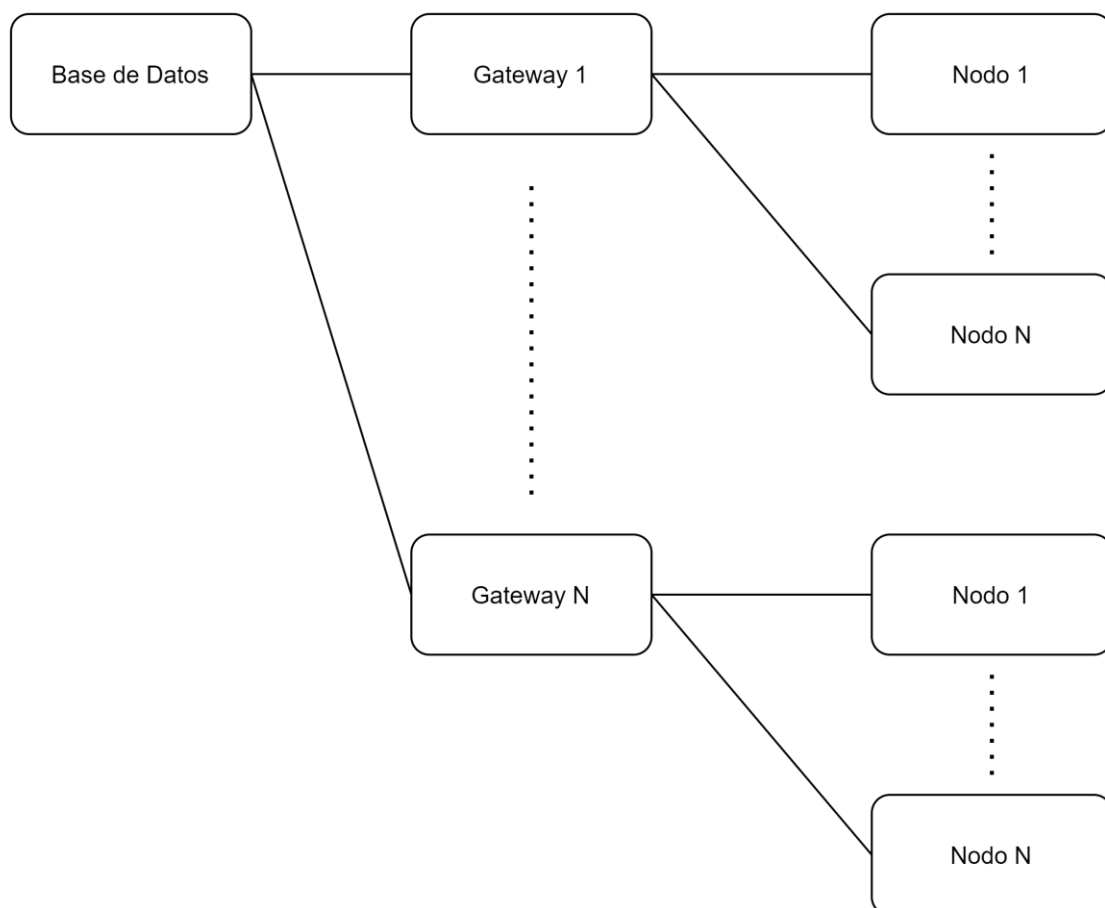


Figura 43: Diagrama en bloques de Base de Datos

Dentro de esta base de datos puede haber prácticamente infinita cantidad de Gateways, los cuales pueden contener hasta 100 nodos cada uno. El tamaño de almacenamiento que ofrece Firebase es ilimitado y su costo es gratuito para una baja tasa de escrituras y lecturas como es el caso de este sistema.

A su vez, cada Nodo tiene una estructura del tipo historial dentro de la base de datos donde los valores de Temperatura, Humedad y Dióxido de Carbono son almacenados en conjunto con un Timestamp. Este Timestamp es un valor numérico, y equivale a la cantidad de segundos que han pasado desde el 1ro de enero de 1970, lo que se conoce como tiempo Unix. La utilización de una marca de tiempo de este estilo es muy común en el entorno de Firebase y, en este caso, el valor se obtiene directamente del servidor cuando los datos llegan a la base de datos.

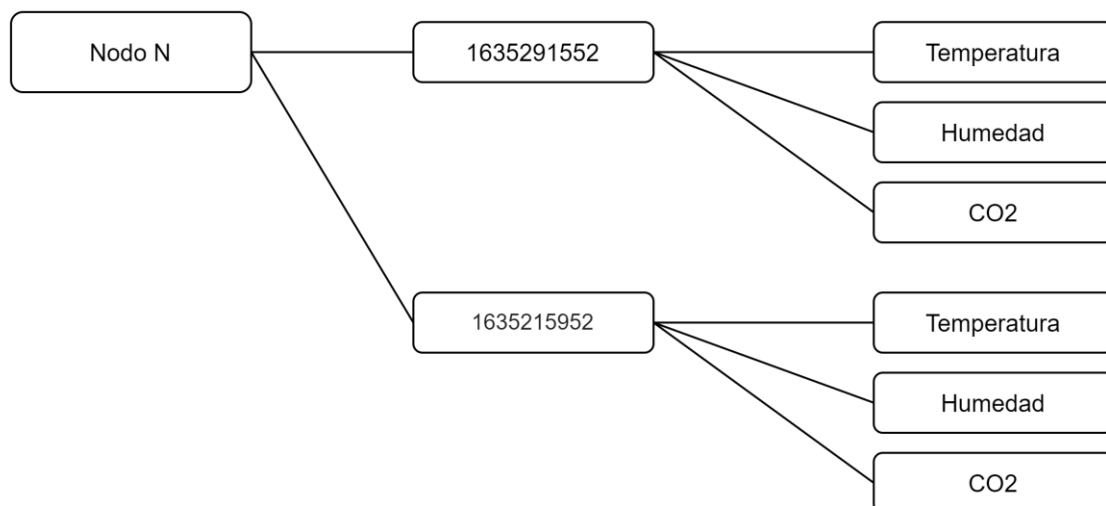


Figura 44: Diagrama de bloques de Nodo en Base de Datos

En la anterior imagen puede verse a modo de ejemplo la estructura de un Nodo N, con Timestamps de las fechas 26 de octubre de 2021 a las 20:39:12 y 25 de octubre de 2021 a las 20:39:12, correspondientemente.

2.1.3.3 Recepción de Datos

El enlace entre los Gateways del sistema y la base de datos está dado por las Cloud Functions. Estas funciones en la nube, son fragmentos de código que se ejecutan en el servidor de Firebase tras un evento a fin de realizar un

procesamiento y una vez terminado la función se extingue. Este sistema utiliza una Cloud Function que se dispara por un evento del tipo HTTP Post, el cual parte de un Gateway, viaja a través de la red de telefonía y es recibido por el servidor de Firebase. Cuando la Cloud Function se dispara, esta recibe los siguientes datos:

- Gateway que origino el evento
- Nodo al que corresponden los datos
- Valor de Temperatura
- Valor de Humedad
- Valor de Dióxido de Carbono

Además, la Cloud Function obtiene la fecha y hora actual del servidor en formato de Timestamp y organiza los datos de manera adecuada para finalmente almacenarlos en la Base de Datos.

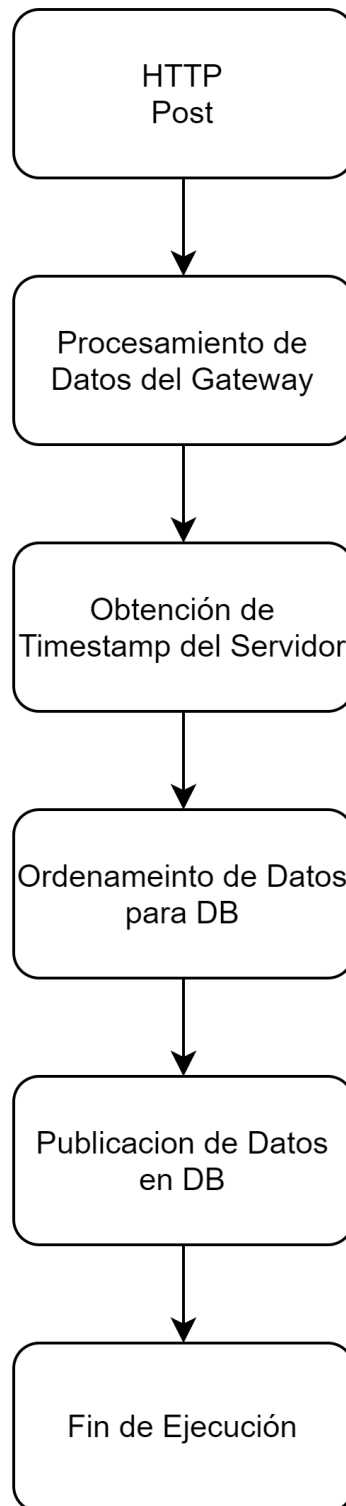


Figura 45: Cloud Function

2.1.4 Página Web

Una parte esencial de todo sistema es la HMI o Interfaz Hombre Máquina, donde el usuario puede interactuar con las variables y los procesos. En el caso de este sistema la interfaz está dada por una Aplicación Web Progresiva. Las Aplicaciones Web Progresivas son aplicaciones similares a las nativas pero que se ejecutan desde un navegador con conexión a internet.

La Aplicación Web fue desarrollada mediante la utilización del framework Quasar [20] y es alojada en Firebase, que además de proporcionar la base de datos también ofrece hosting web.

2.1.4.1 Descripción

La web del sistema fue diseñada para un acceso libre por el usuario que conozca su dirección web y todos los datos del sistema estarán disponibles al ingresar.

La web obtiene los datos directos de la Base de Datos para luego separarlos y procesarlos para su fácil interpretación.

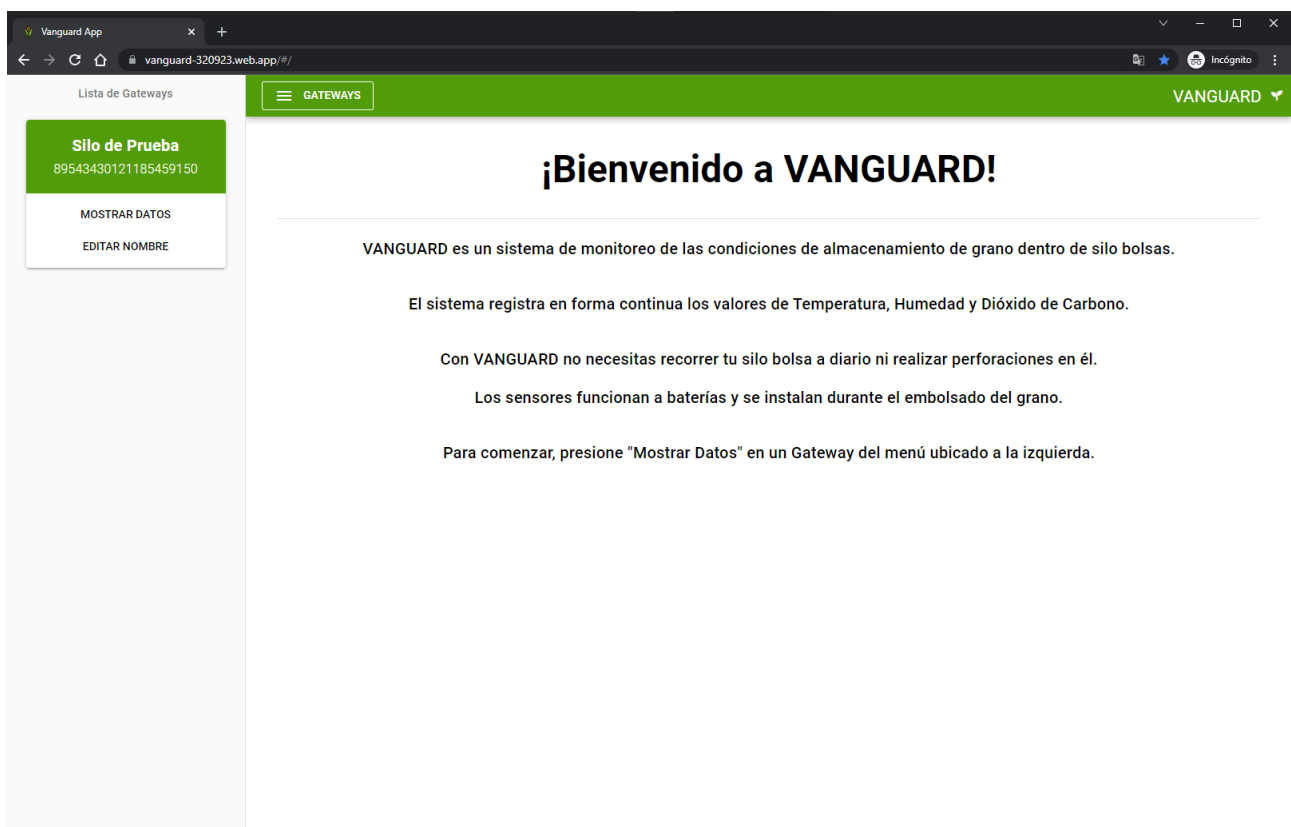


Figura 46: Página web, inicio

2.1.4.2 Vista y gráficos

La página web contiene en un menú lateral la lista completa de los Gateways con su correspondiente CCID, como se muestra en la imagen.

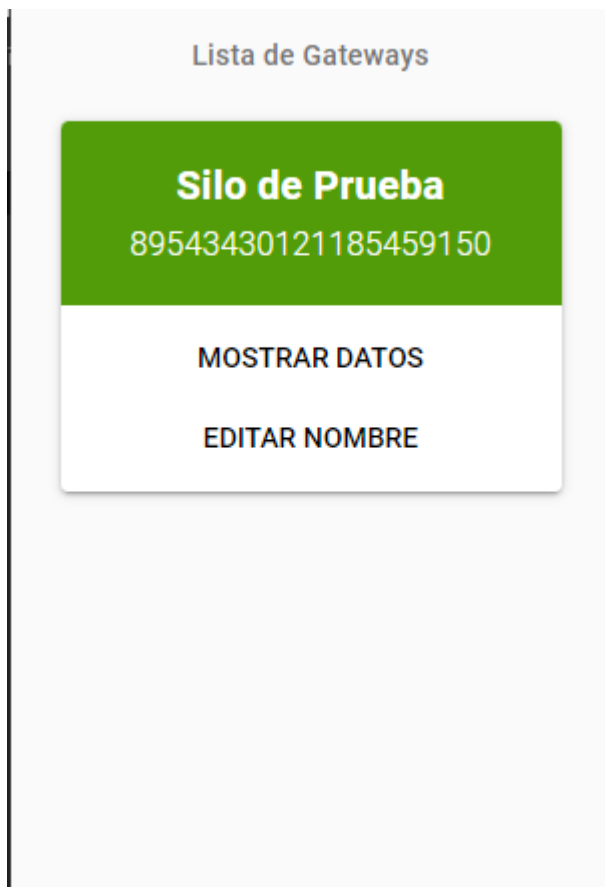


Figura 47: Página web, lista de Gateways

Al hacer click sobre el boton MOSTRAR DATOS, los datos son visualizados en la pantalla principal.

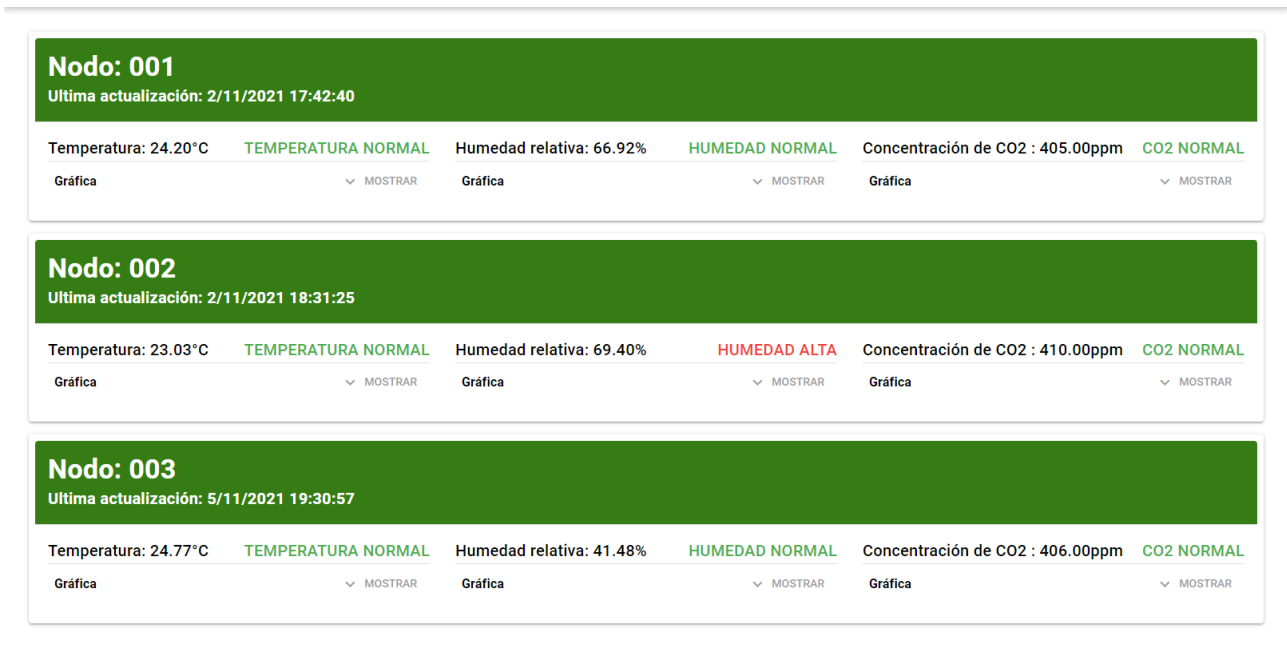


Figura 48: Página web, visualización de datos de Gateway

Los datos son separados en tarjetas por Nodo, donde se visualizan los datos mas recientes, junto el número de identificación del Nodo, la hora y fecha de la ultima actualizacion y un mensaje resaltado en color que ofrece una rápida noción sobre el estado actual del nodo.

Los mensajes de estado aplican para los valores de Temperatura, Humedad y Dióxido de Carbono, según la siguiente tabla.

Para un análisis mas profundo, las gráficas con los valores historicos de Temperatura, Humedad y Dioxido de Carbono del Nodo pueden ser visualizadas por separado, con un rango automático entre los valores mayor y menor. Todas las gráficas tienen sobre su eje de abscisas la fecha y hora en la que el dato fue recibido.

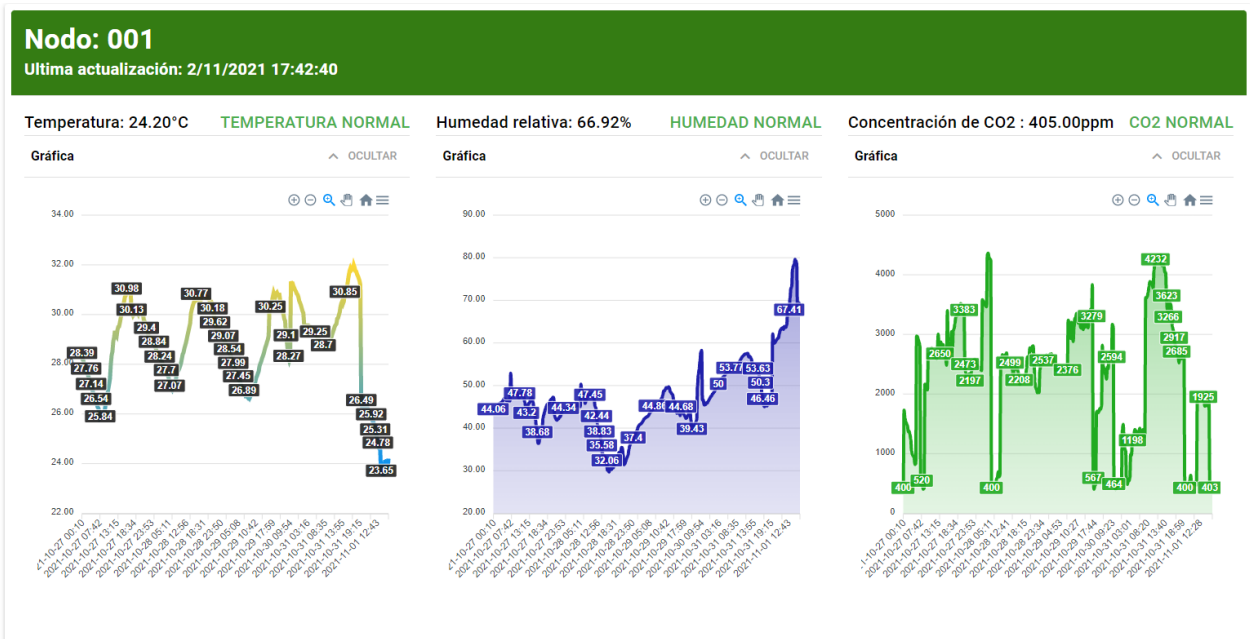


Figura 49: Pagina web, gráficos

Las gráficas ofrecen la posibilidad de ser descargadas en distintos formatos, asi como tambien de hacer acercamientos sobre ellas y de resaltar el valor sobre el cual se posiciona el puntero.

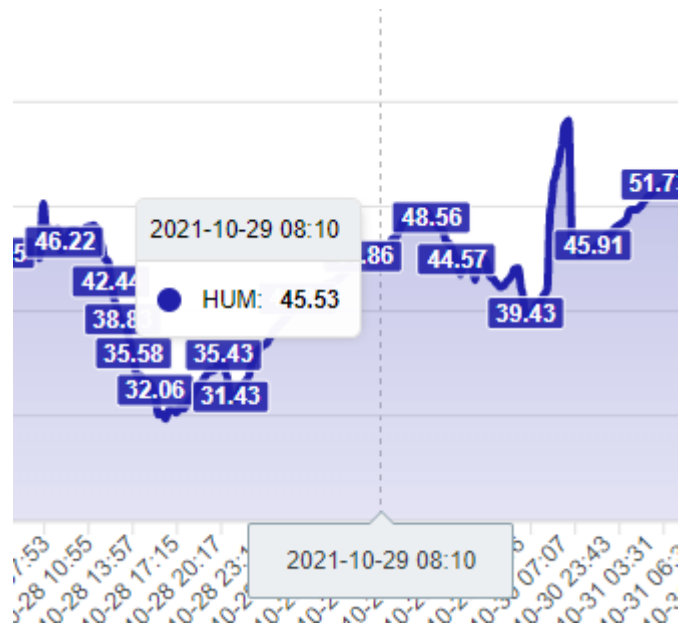


Figura 50: Página web, información en gráficos

Los formatos posibles para la descarga son:

- SVG: imagen vectorial.
- PNG: formato típico de imagen.
- CSV: valores separados por coma, este tipo de archivo puede ser procesado por software, como por ejemplo Excel.



2.2 Diseño Completo

2.2.1 Diseño final

El diseño final del sistema consta de múltiples Nodos conectados a un Gateway, cada Gateway soporta hasta cien Nodos. A su vez, pueden existir múltiples Gateways, los cuales enviarán información a la misma Base de Datos.

La web en su estado actual se podría atribuir a una web para usuario Administrador donde este puede visualizar todos los Gateways y sus Nodos, sin restricción alguna. En caso de expandirse el sistema a distintos usuarios, sería necesario un control de usuarios y la asignación de los correspondientes Gateways a estos para limitar los datos visibles.

El sistema sigue un flujo de trabajo lineal, sin una realimentación desde la parte Web hacia el hardware. El flujo de trabajo se puede describir con el siguiente gráfico.

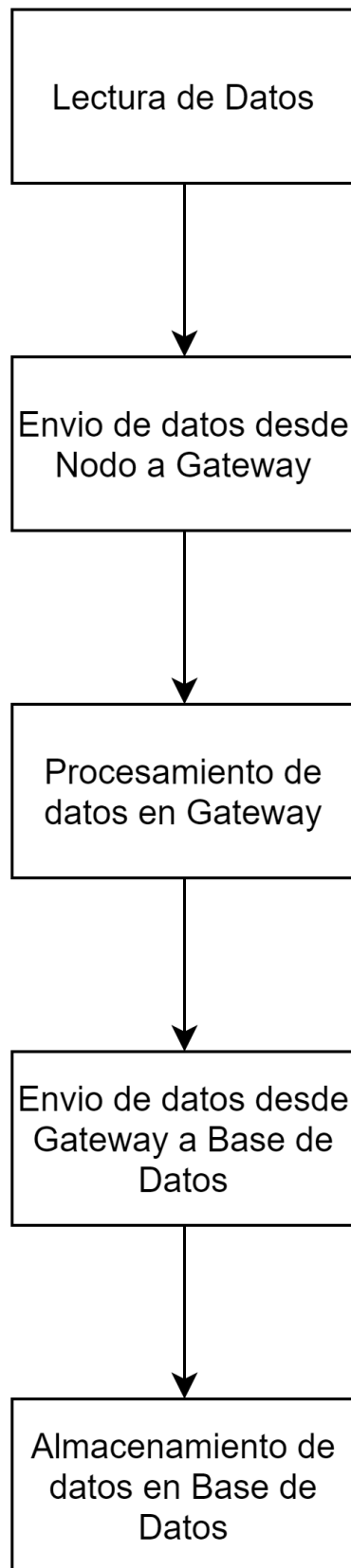


Figura 51: Diagrama de flujo del sistema completo

2.2.2 Prestaciones

Las prestaciones finales del sistema se pueden dividir en la parte de hardware y la de software.

En cuanto al hardware, tenemos las siguientes:

- Duración de batería de al menos 1 año, recargable.
- Dos lecturas por nodo diarias, más una extra en caso de un error en la comunicación o corrimiento del periodo de tiempo.
- Alcance mínimo de cien metros.
- Soporte estimado de hasta cien Nodos por cada Gateway.

Por el lado del software:

- Visualización rápida del estado de cada Nodo.
- Costo mínimo de mantenimiento de base de datos y pagina web.
- Gráfica histórica de los datos adquiridos por cada nodo.
- Posibilidad de descargar imagen vectorizada de la gráfica.
- Posibilidad de descargar datos históricos en formato CSV.

2.2.3 Fotos del hardware y capturas de pantalla de software

En cuanto al Hardware, se realizaron placas de prototipo y los diseños correspondientes en software. La página web se encuentra hosteada en Firebase y en línea.

2.2.3.1 Unidad Nodo

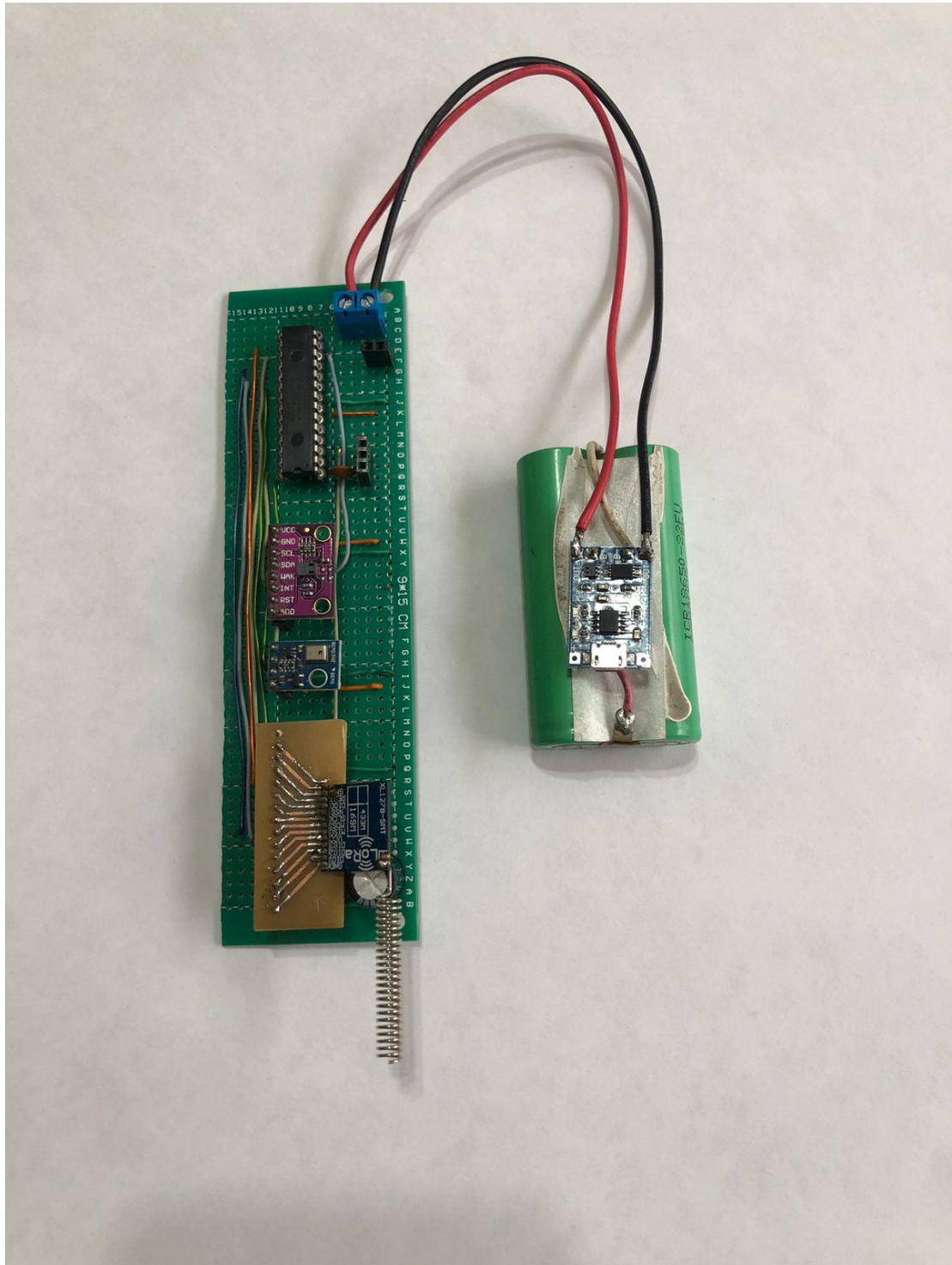


Figura 52: Prototipo unidad Nodo

2.2.3.2 Unidad Gateway

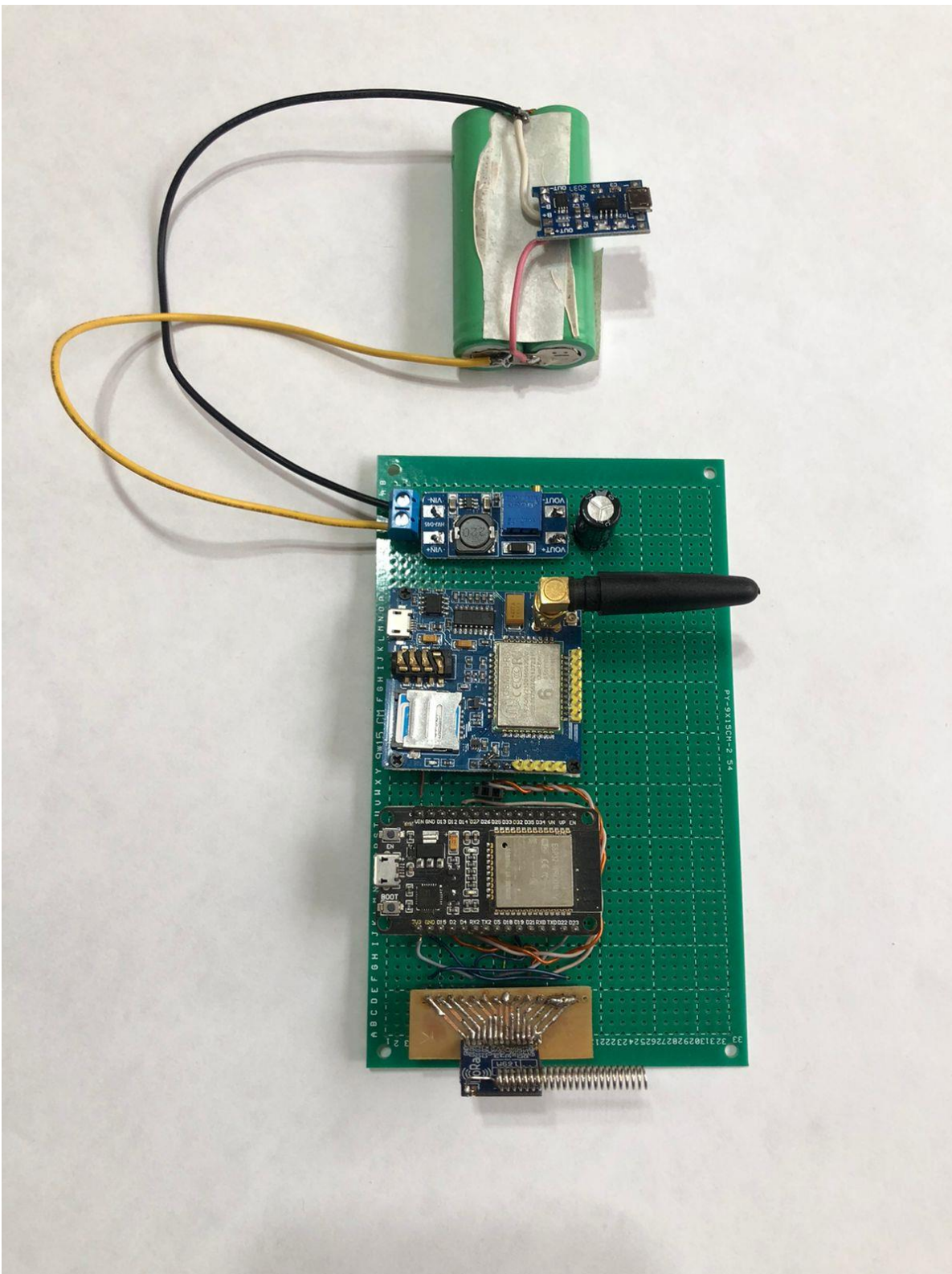


Figura 54: Prototipo unidad Gateway

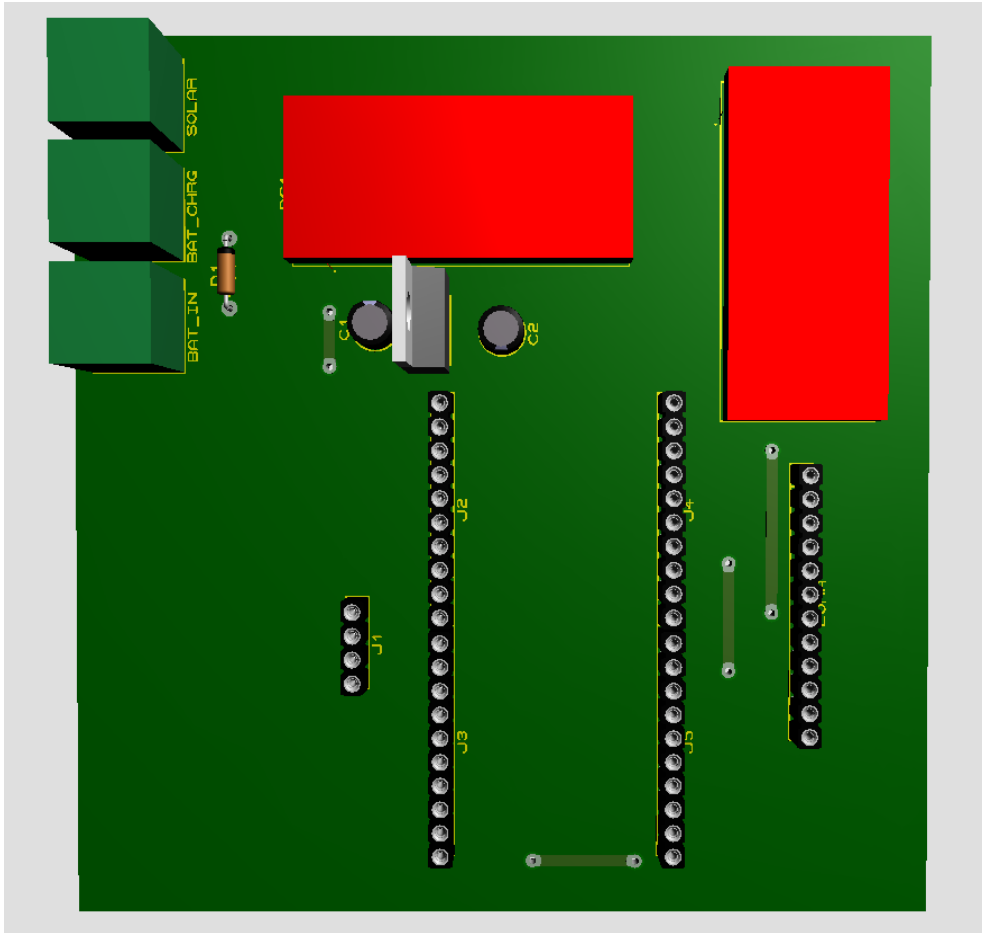


Figura 55: Diseño final unidad Gateway

2.2.3.3 Carcasa Nodo

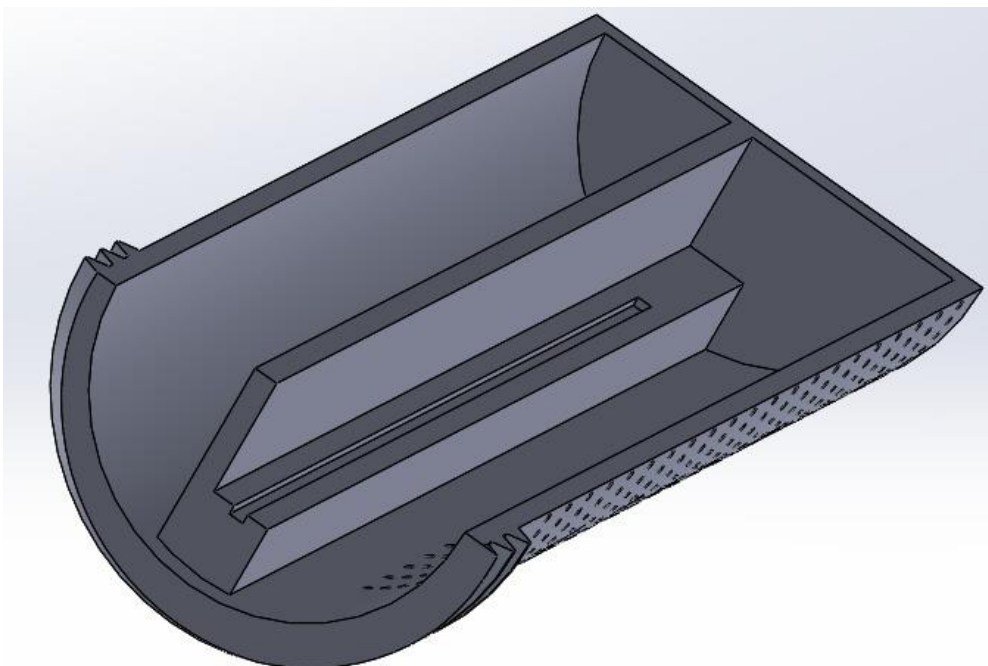


Figura 56: Corte en perspectiva de carcasa

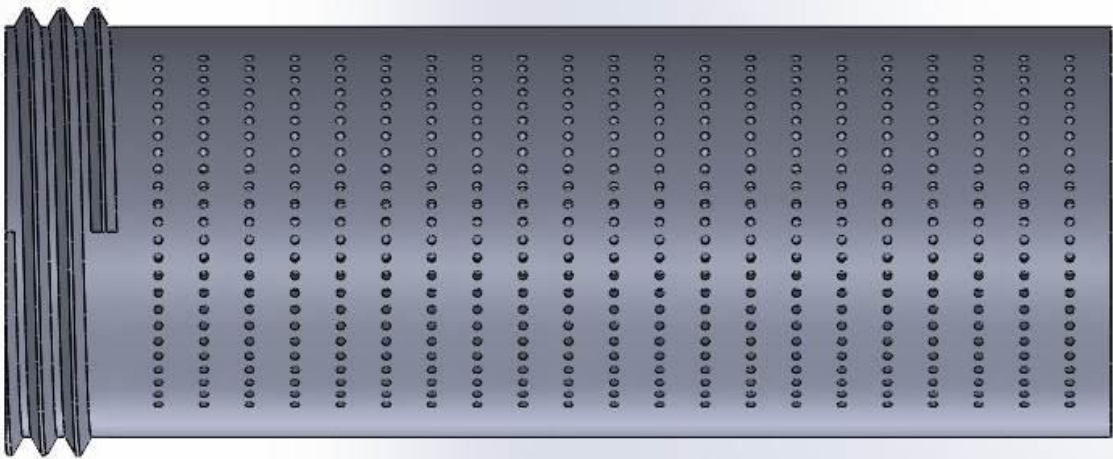


Figura 57: Vista frontal de carcasa

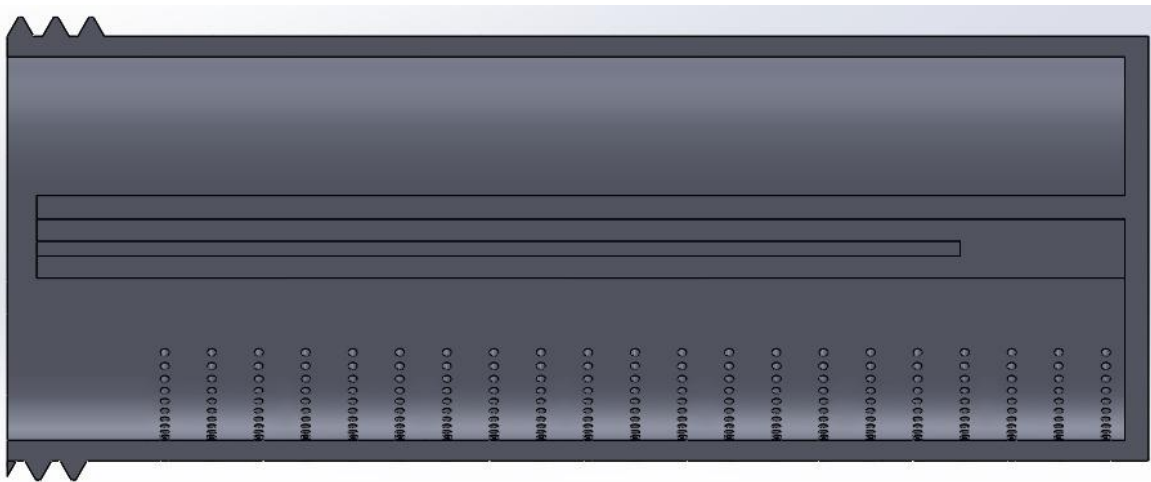


Figura 58: Corte vista lateral de carcasa

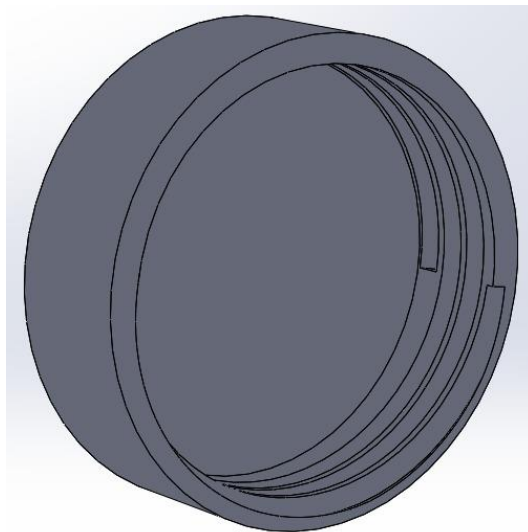


Figura 59: Vista en perspectiva de tapa de carcasa

2.2.3.4 Página Web

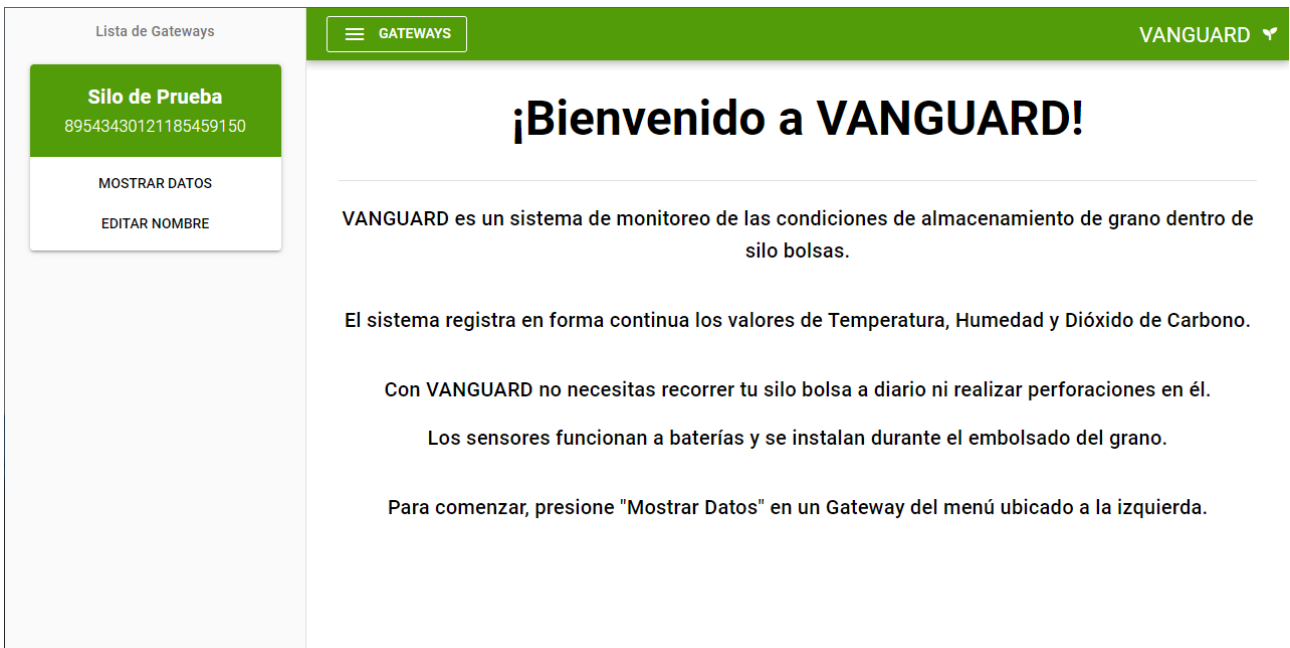


Figura 60: Inicio de Pagina Web

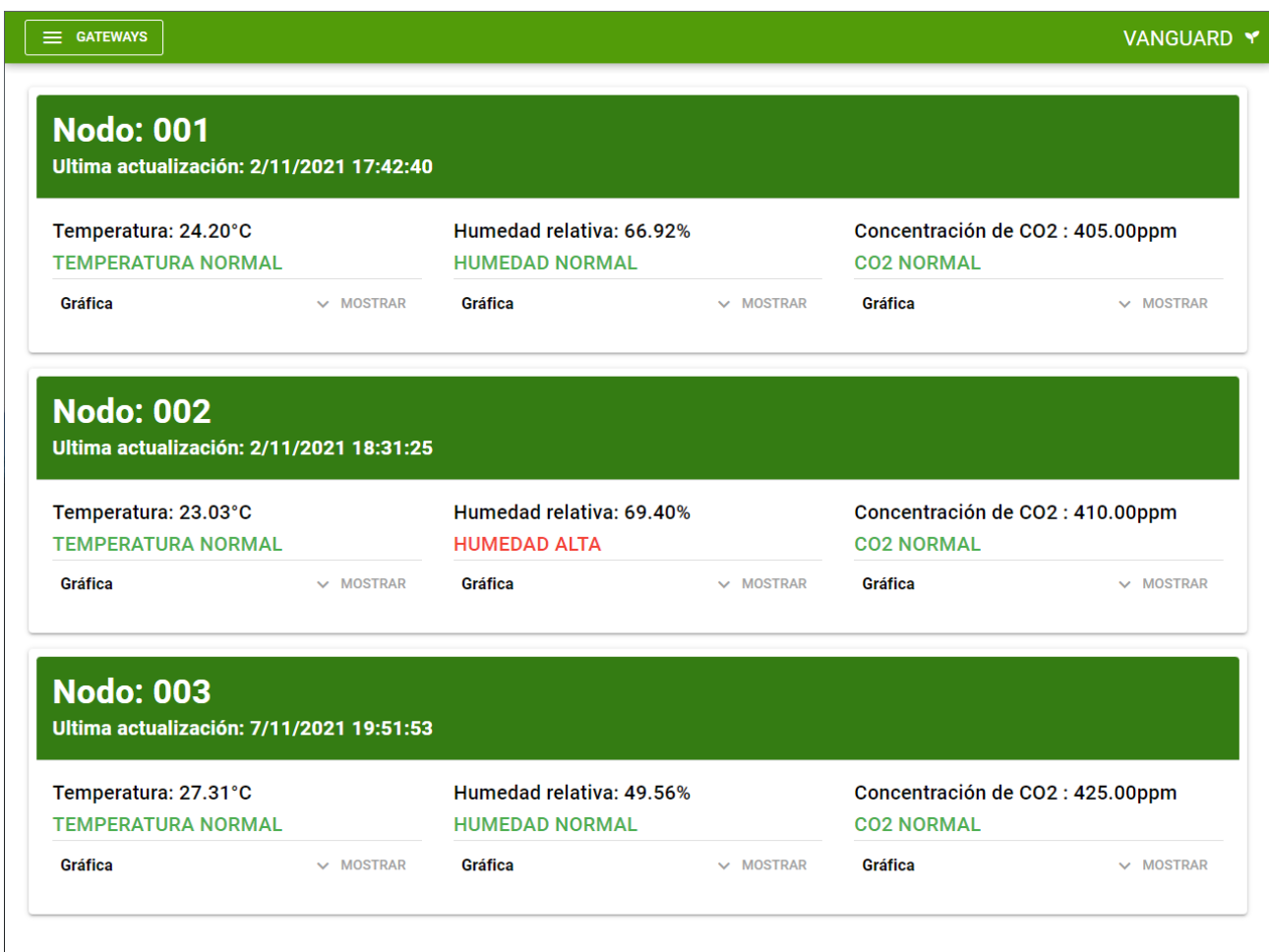


Figura 61: Datos en Pagina Web

Capítulo 3: Resultados

Durante el desarrollo del sistema diversas pruebas fueron realizadas, dando diversos resultados. Basados en los resultados de estas pruebas se realizaron ajustes al sistema para alcanzar las características deseadas.

3.1 Pruebas comunicación por Radiofrecuencia

3.1.1 Prueba a campo abierto

La prueba a campo abierto se realizó con un módulo LoRa como transmisor y uno como receptor. Ambos fueron alimentados con fuentes de 5 volts y 500 miliamperes con sus respectivos reguladores a 3,3 volts. Además, cada uno tenía conectada una antena helicoidal apta para la frecuencia de 433 mega Hertz.

Bajo estas condiciones el equipo tuvo un alcance superior a los 500 metros.

3.1.2 Prueba con obstáculos

Manteniendo las condiciones de la prueba anterior, se realizó la misma, pero con obstáculos en medio. En este caso, entre el transmisor y el receptor había 2 paredes de una vivienda y dos árboles. El alcance superó los 300 metros.

Dentro de una vivienda, la comunicación atraviesa fácilmente 5 paredes sin errores en los mensajes.

3.1.3 Pruebas sensor Humedad y Temperatura

Estas pruebas fueron realizadas en conjunto ya que un único sensor realiza la medición de ambas variables.

Las mediciones de humedad y temperatura resultaron correctas, el sensor responde correctamente sin errores en la medición ni fallas.

3.1.4 Pruebas sensor Dióxido de Carbono

Las mediciones de dióxido de carbono resultaron tediosas de realizar ya que el sensor es sensible a la humedad y temperatura ambiente. Se notó gran desviación en la medición de dióxido de carbono respecto a las dos variables mencionadas.

Para mejorar la calidad de los valores obtenidos se implementó una compensación de las mediciones según la temperatura y humedad medidas actuales en el ambiente donde se encuentra el sensor.

3.2 Pruebas consumo y duración de baterías

3.2.1 Pruebas sin optimizar consumo

En esta prueba se conectó y encendió la unidad Nodo, la cual funcionará solo a baterías por un tiempo prolongado a fin de realizar mediciones sobre el consumo de la misma. Sin realizar ninguna optimización del consumo, con el microcontrolador funcionando, los sensores y el módulo LoRa encendidos, se registró un consumo de 80 miliamperes.

3.2.2 Pruebas con microcontrolador en sleep

Como primera medida se implementó un modo sleep o de suspensión en el microcontrolador. Esto redujo el consumo en 20 miliamperes mientras el microcontrolador no está tomando mediciones o enviando datos.

El consumo en modo sleep es de 50 miliamperes.

3.2.3 Pruebas con microcontrolador y sensores en sleep

Implementando ahora el mismo método del microcontrolador en los sensores de Temperatura y Humedad, Dióxido de Carbono y en el transmisor LoRa, se redujo el consumo a 86 microamperios.

Módulos en sleep	Consumo
Ninguno	80 [mA]
Microcontrolador	50 [mA]
Microcontrolador, sensores y LoRa	86 [uA]

Tabla 7: Tabla de consumos en Nodo

Capítulo 4: Análisis de Costos

4.1 Costo de Materiales

Los materiales utilizados en la elaboración de los módulos Nodo fueron seleccionados tal que pudiesen ser adquiridos en el país. La cantidad de estas unidades dependerá del tamaño del silo, pero cada una contendrá la misma cantidad de componentes, siendo el costo el mismo para cada una.

En la siguiente tabla se aprecia la cantidad y costo de los componentes usados.

Producto	Precio	Cantidad	Total
Sensor CO2 CCS811	\$2871	1	\$2.871
Sensor Humedad y Temperatura AHT10	\$644	1	\$644
Modulo cargador celda de Litio	\$172	1	\$172
Fuente switching 5v 2A	\$1220	1	\$1.220
Batería litio 3.7v 2200mAh	\$910	4	\$3.640
ATMEGA328	\$892	1	\$892
Modulo LoRa SX1278	\$998	1	\$998
Componentes electrónicos varios	\$	1	\$800
Total			\$11.237

Tabla 8: Costos Nodo

En cuanto a las unidades tipo Gateway, se siguió la preferencia de componentes que puedan ser adquiridos dentro del país. Los costos y cantidades se muestran a continuación.

Producto	Precio	Cantidad	Total
Modem Gsm/Gprs A6 con Antena	\$2600	1	\$2.600
Modulo cargador celda de Litio	\$172	1	\$172
Panel solar 6v	\$1220	1	\$1.220
Batería litio 3.7v 2200mAh	\$910	4	\$3.640
ESP32-WROOM32	\$1684	1	\$1.684
Modulo LoRa SX1278	\$998	1	\$998

Fuente DC-DC Step up	\$200	1	\$200
Componentes electrónicos varios	\$	1	\$800
Total			\$11.314

Tabla 9: Costos Gateway

4.2 Costo mano de obra

La mano de obra del proyecto puede dividirse en cuatro tareas diferentes, con distintos costos cada una. El costo de la mano de obra representa la mayor parte del costo total del sistema.

Producto	Precio	Cantidad	Total
Horas de desarrollo	\$600	480	\$288.000
Horas de ensamblaje	\$550	120	\$66.000
Horas de documentación	\$400	65	\$26.000
Horas de pruebas	\$550	170	\$93500
Total			\$473.500

Tabla 10: Costos mano de obra

4.3 Costo total

Si se supone un silo bolsa de 100 metros de largo con una distribución de un Nodo cada 10 metros, además del Gateway, el costo fijo del sistema sería el siguiente.

Producto	Precio	Cantidad	Total
Nodos	\$11.237	10	\$112.370
Gateways	\$11.314	1	\$11.314
Mano de obra	\$473.500	1	\$473.500
Total			\$597.184

Tabla 11: Costos totales

Capítulo 5: **Discusión y Conclusión**

El objetivo planteado era la realización de un sistema capaz de monitorear un silo bolsa sin la necesidad realizar perforaciones en este, totalmente autónomo tras ser instalado y fundamentalmente que el sistema sea remoto, capaz de enviar la información aun en lugares donde no hay acceso a internet, como lo son la mayoría de las ubicaciones de los campos donde se instalan silo bolsa.

Los objetivos fueron alcanzados desarrollando un sistema que obtiene los valores de Humedad, Temperatura y Dióxido de Carbono en distintos puntos del silo bolsa. El sistema solo debe ser instalado al momento de embolsar el silo bolsa y este funcionará hasta agotar su batería o ser retirado del silo. La conexión mediante antenas GSM/GPRS lo hace apto para la mayoría del territorio del país donde haya cobertura de telefonía móvil, la cual es mucho mayor al área de cobertura del internet por cable.

El desarrollo de una base de datos online y una página web permiten al usuario visualizar los datos de manera rápida y sencilla, advirtiéndolo un problema en el silo horas después de haber sucedido, dado margen a que el propietario pueda tomar medidas y prevenir el deterioro o pérdida del grano almacenado.

La posibilidad de descargar los gráficos y datos históricos de las variables medidas en cada punto del silo bolsa permiten un análisis profundo de la evolución de la calidad del grano en la post cosecha y una comparación directa respecto a otras campañas de producción u otros silo bolsa si se quisiera.

Un silo bolsa de cien metros de largo repleto de soja contiene cien toneladas de esta que, a precio de USD 470 la tonelada, dan hoy al silo bolsa un valor de USD 47.000. Al cambio oficial del día 3 de noviembre de 2021, equivaldría a más de 4,5 millones de pesos argentinos, por lo que el costo del sistema resulta bajo al considerar que este puede cubrir tal valor en grano durante su vida útil de aproximadamente cinco años.

Dentro de las mejoras posibles al sistema se destacan la inclusión de un servidor web embebido en el Gateway, dando posibilidad al usuario de visualizar los datos en forma local sin la necesidad de la conexión GSM/GPRS e Internet. Otro aspecto para considerar como mejora es el uso de una tarjeta de memoria del tipo microSD en el Gateway a fin de almacenar un registro completo de los datos adquiridos por el sistema.

Capítulo 6: Literatura Citada

- [1] C. Casini y J. Rodriguez, «Eficiencia de cosecha y almacenamiento de granos,» INTA, Manfredi, 2009.
- [2] N. Newman, «Milling and grain: Breve historia del almacenamiento de granos,» 10 Mayo 2020. [En línea]. Available: <https://millingandgrain.co/entrada/breve-historia-del-almacenamiento-de-granos-22230>.
- [3] «Silo bolsa: el acopio que suma adeptos,» *Agroclave*, 13 Octubre 2018.
- [4] MAGyP, «Estimaciones agrícolas mensuales,» [En línea]. Available: <https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/estimaciones/>.
- [5] J. Azcona, Almacenamiento de granos en bolsas plásticas: Resultados de investigación, Manfredi, Córdoba: INTA, 2009.
- [6] A. Bernadette, R. E. Bartosik, M. L. Cardoso, D. de la Torre, J. J. Giorda, M. Hoyos y C. Rúveda, Manual de buenas prácticas en poscosecha de granos: Hacia el agregado de valor en origen de la producción primaria, Buenos Aires: Ediciones INTA, 2013.
- [7] H. I. Taher, H. A. Urcola, R. E. Bartosik y M. G. Cendoya, «Caracterización del uso del silo bolsa en la provincia de Buenos Aires,» Balcarce, 2019.
- [8] R. Abalone y A. Gastón, «Almacenamiento de granos en silos-bolsa: Modelización matemática de la atmosfera automodificada,» ASADES, Rosario, 2009.
- [9] R. E. Bartosik, M. L. Cardoso, D. De La Torre y J. C. Rodriguez, «Monitoreo de Silobolsas Mediante la Medición de CO₂,» 13 Mayo 2013. [En línea]. Available: <https://inta.gob.ar/documentos/monitoreo-de-silobolsas-mediante-la-medicion-de-co2>.
- [10] R. E. Bartosik, M. L. Cardoso, D. Ochandio y D. Croce, «Detección temprana de procesos de descomposición de granos almacenado en bolsas plásticas herméticas mediante la medición de CO₂,» 1 Diciembre 2011. [En línea]. Available: <https://inta.gob.ar/documentos/deteccion-temprana-de-procesos-de-descomposicion-de-granos-almacenado-en-bolsas-plasticas-hermeticas-mediante-la-medicion-de-co2>.
- [11] Microchip, «ATmega328,» [En línea]. Available: <https://www.microchip.com/en-us/product/ATMEGA328>. [Último acceso: 9 11 2021].
- [12] SEMTECH, «SX1278 - LoRa,» [En línea]. Available: <https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-core/sx1278>. [Último acceso: 9 11 2021].
- [13] ScioSense, «CCS811,» [En línea]. Available: <https://www.sciosense.com/products/environmental-sensors/ccs811-gas-sensor-solution/>. [Último acceso: 9 11 2021].
- [14] ASAIR, «AHT10,» [En línea]. Available: <https://www.aosong.com/en/products-40.html>. [Último acceso: 9 11 2021].
- [15] N. T. P. A. Corp, «TP4056 - Datasheet,» [En línea]. Available: <https://dlnmh9ip6v2uc.cloudfront.net/datasheets/Prototyping/TP4056.pdf>. [Último acceso: 9 11 2021].
- [16] ESPRESSIF, «ESP32,» [En línea]. Available: <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32>. [Último acceso: 9 11 2021].
- [17] A. T. T. C. Ltd, «A6 - Datasheet,» [En línea]. Available: https://www.smart-prototyping.com/image/data/9_Modules/101756%20Wireless%20A6C/A6_A7_A6C_datasheet-EN.pdf. [Último acceso: 9 11 2021].
- [18] Google, «Firebase,» [En línea]. Available: <https://firebase.google.com/>. [Último acceso: 9 11 2021].

-
- [19] Google, «Cloud Functions,» [En línea]. Available: <https://cloud.google.com/functions>. [Último acceso: 9 11 2021].
- [20] Quasar, «Quasar,» [En línea]. Available: <https://quasar.dev/>. [Último acceso: 9 11 2021].