



UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES
Facultad de Ingeniería
Departamento de Electrónica

Proyecto

Sistema de comunicación inalámbrica LoRa y telemetría para medición, adquisición, visualización, monitoreo y control de variables de campo en pozos inyectores de petróleo con protocolo LoRaWAN

7 de diciembre de 2021

Quiroga, Luis Tomás 96337 quirogaluiustomas@gmail.com

1. Diseño

1.1. Bloque de alimentación y medición

La alimentación al circuito se hará mediante 1 panel solar y una batería con fusible para los días de poca radiación solar, que se encontrará dentro del gabinete. El circuito de alimentación (PCB) proverá de alimentación a la placa con el microcontrolador y al circuito analógico diseñado para acondicionar las señales provenientes de los diferentes puntos de medición junto con los sensores correspondientes.

1.2. Bloque de microcontrolador + Radio

El microcontrolador junto con el módulo de radio se encuentran integrados en una placa desarrollada por una empresa que se dedica a la producción de dichas placas para tecnología IoT. De esta manera se ahorra la necesidad de implementar tecnologías por separado y lidiar con las compatibilidades derivadas de esto.

El microcontrolador se encargará de procesar todas las mediciones que se tomen mediante sus puertos y realizar los cálculos correspondientes para luego codificar los datos a enviar, enlazarse y enviarlas según el protocolo mencionado. El módulo de radio se encargará de transmitir el dato hacia el gateway.

Se programa en C++ con el ide MbedStudio, de los mismos que proveen esta placa con el micro y el módulo.

1.3. Bloque de Gateway

El micro se enlaza con un gateway advantech (o cualquier gw que tenga servidor LoRaWAN) que además de cumplir la función de gateway posee herramientas de configuración avanzadas como por ejemplo, configurar un servidor LoRaWan y un broker MQTT dentro del mismo dispositivo. El protocolo MQTT utiliza una arquitectura de publicación (ingreso el dato al broker) y suscripción (tomo dato disponible del broker). Dicho protocolo se utiliza por su ligereza y practicidad para datos en IoT donde se utilizan dispositivos de baja potencia. Los detalles de cálculos de enlace entre gw y nodo se presentarán en un documento adjunto al informe final.

1.4. Bloque de interfaz

Para tomar los datos mediante protocolo MQTT se utiliza NodeRed. El NodeRed es una herramienta de desarrollo basada en programación en flujo. Sirve para conectar dispositivos de hardware con diferentes protocolos (Modbus, TCP/IP, MQTT, etc). Trabaja con nodos interconectados que ya están preprogramados algunos y otros bloques que permiten configuración programando en JavaScript. Acá se desmenuza el paquete proveniente del broker.

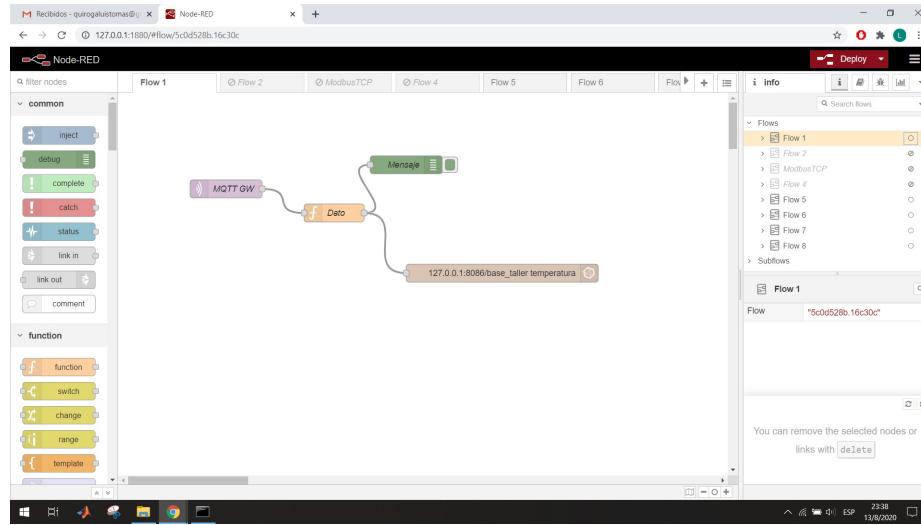


Figura 1.1 – Node-Red.

1.5. Visualización

Para poder visualizar los datos se recurre a la base de datos para poder ver históricos y tendencias en tiempo real. Como visualizador se escogerá el *grafana* que es opensource y permite los enlaces con diversas bases de datos para métricas. Se creará un dashboard para el monitoreo de los diferentes datos que tome, o monitoreo de los diferentes dispositivos que se conecten (caudalímetro 1, caudalímetro 2, etc). Esta interfaz también correrá o bien en una local o bien en un servidor pago en la nube. Se configurarán los puertos y la comunicación correspondiente para lograr el acceso a los datos en la misma.

2. Conclusión

Atento a los resultados de cálculos de enlace, pudo deducirse la viabilidad de tener conectados varios dispositivos a un mismo Gateway dado el gran alcance que poseen los nodos y la disponibilidad geográfica del lugar donde serán instalados. La introducción de paquetes de software open-source para monitoreo realzan el valor del producto y lo hacen más atractivo, ya que no sólo se cuenta con las mediciones y cálculos de variables de interés, sino que se vende todo un sistema de telemetría, desde la medición de las señales de interés y el estado general del sitio hasta el monitoreo de las variables procesadas en una computadora ubicada en la central de control, con el agregado, incluso, de la posibilidad de monitorearlas a través de un celular o tablet, ya sea si se elige que el servidor se encuentre en la red local o en la nube, lo que cambiará será la accesibilidad a los datos en uno u otro caso. De esta manera se logran aplicar conocimientos aprendidos durante la carrera relacionados con electrónica analógica, digital, comunicación, telemetría, control de variables de procesos, programación de microcontroladores y programación en diversos lenguajes actuales y bases de datos.

3. Alimentacion y Regulación

Tal como se mencionó, la idea es no tener que instalar una RTU ni llevar alimentación al sitio mediante cables, que deben ser tirados bajo tierra hasta el tablero donde se encuentran los dispositivos de telemetría. Es por ello que para la alimentación del equipo de telemetría se utilizan paneles solares y baterias. La placa se encuentra en un tablero para intemperie. Dado que el microcontrolador junto con la electrónica asociada para la adquisición de los datos debe estar alimentada por una fuente externa, lo mas óptimo es colocar un panel solar de 12V y xW. El mismo proveerá de energía a la batería de 12V 7Ah que se encontrará dentro del tablero y que alimentará la electrónica proveyendo la potencia necesaria para el correcto funcionamiento de la electrónica.

Dado que el panel puede elevarse a tensiones superiores a los 12V se debe realizar una regulación para que pueda cargar la batería, para esto se utiliza un regulador LMXXXX, con el circuito correspondiente para obtener 12V a la salida del mismo y una corriente de carga suficiente para la carga, previamente calculada, de la batería. Colgado a la salida de este regulador estará la batería con un fusible en serie para evitar excesos de corriente y evitar así algún daño. Luego se coloca otro regulador LMYYYY para bajar la tensión a una tensión de 5V de continua y aguas abajo de esto toda la electrónica analógica de baja potencia que alimenta al micro para que éste pueda alimentar con 3.3V los amplificadores operacionales.

4. Programación - Microcontrolador

El microcontrolador se encuentra embebido en un placa de desarrollo que tiene preparados los pines disponibles para conexiónado y el módulo de radio LoRa integrado. La programación del microcontrolador se realiza en el lenguaje C++ utilizando las bibliotecas generales del lenguaje y las particulares para enlace de Radio LoRa.

Funcionamiento del programa

Se utiliza para la medición de señal del caudalímetro, los 8 pines ADC de 12 bits de resolución disponibles como entradas analógicas, 2 entradas digitales (1 para entrar a modo configuración y otra para el switch de puerta o panel) y 3 salidas digitales (para encendido de diodos LEDS cuya codificación se explica en el manual del producto). Se permitirá a través del puerto serie, que se crea para la comunicación con la placa, la configuración de parámetros como: Tiempo límite superior e inferior del intervalo de tiempo random generado para reinicio de envío de paquete en caso de fallo, cantidad de reinicios, tiempo de permanencia en modo sleep, banda de frecuencia de operación y configuración de entradas analógicas, lo que permitirá la habilitación o deshabilitación de dicho canal de entrada. Para entrar a dicho modo de configuración se debe cambiar el jumper JMP2 del esquemático y presionar el botón MODO para la entrada digital. En la programación del micro se utilizan herramientas como timers, modos de bajo consumo e interrupciones. Para resetear la placa se debe presionar el botón NRESET, ingresando un valor bajo a la entrada PIN 5 que posee una resistencia de pullup. La configuración seteada por serie se guarda en la memoria flash del microcontrolador para que cuando se reinicie el mDot lea la última configuración guardada e inicie en dichas condiciones.

Se configura el enlace con el GW, cuyo tema se detallará en secciones posteriores, y se arman dos paquetes iniciales con valores predeterminados como inicio de comunicación. Si falla el enlace se vuelve a intentar luego de un determinado tiempo. si llega correctamente entonces realiza las mediciones. Una vez que se toman todas las mediciones de señal de cada una de las entradas analógicas habilitadas, se calcula la frecuencia o caudal, en función de lo que se haya seteado, se arma dos paquetes de envío de 8 bytes cada uno, conformado por la información de paquetes de

a 4 entradas analógicas. Cada una es de 2 bytes. Cada entrada de 16 bits se arma primero la parte alta y luego la baja.

Luego de reintentar enviar los paquetes se va a dormir el tiempo que le resta hasta el siguiente envío.

5. Comunicación

5.1. Envío del dato hacia el GW

La placa que contiene el módulo de radio se enlaza con el GW y le hace llegar el dato mediante la tecnología LoRa a través del protocolo LoRaWAN. LoRa es la capa física mientras LoRaWAN es la capa de red. Para esto, el GW que posee un servidor LoRaWAN, el cual servirá para almacenar temporalmente los paquetes recibidos. Luego publicará los mismos en el broker MQTT interno donde quedarán disponibles para los suscriptores. Para enlazar con el GW se utilizan ciertas claves de acceso, cuyas funciones están bien diferenciadas. Network Key y Application Key. Se detalla mas en la parte donde explico sobre la tecnología. El tablero tendrá a su vez montado una antena omni con ganancia de 3dBi para el envío al GW. Los cálculos de enlace se calcularon para un GW Multitech y radio xxxx.

El GW recibe 2 paquetes de 8 bytes cada uno y publica el dato así como está en el servidor de red LoRaWAN y en el broker MQTT. Se puede observar los datos que le llegan al GW y que se guardan en el servidor temporalmente, conectándose al mismo y viendo como llegan en crudo los paquetes. El GW publica en el broker los datos y una vez allí deben ser encuestados por protocolo MQTT.

El GW devuelve acknowledge cuando recibe el dato correctamente. El envío al nodo se denomina downlink. El nodo una vez que envía el dato abre una ventana de tiempo donde espera la recepción del gateway.

5.2. Broker MQTT

El envío de dato al broker MQTT se denomina publicar. Al dato tendrán acceso y disponibilidad todos los equipos que se hayan suscripto al broker. En nuestro caso se trabajará con 2 interfaces del NODERED, una que correrá en el GW, puesto que el mismo tiene este software corriendo dentro y otro en una computadora local en la oficina de control. La conexión con el GW en esta etapa es mediante ethernet. Este protocolo se monta sobre TCP. La herramienta utilizada para tomar el dato es Node-RED que correrá, como se dijo, en el GW y en la máquina local.

5.3. NODERED

El software NODERED del GW lo que hace es tomar el dato por LORA y publicar en el Broker MQTT del GW en ciertos topicos que yo defino cuando desmenuzo el dato según la información que me interese. Primero de todo, se separa el dato según el tipo de Nodo (Caudal, AIDI, RTD, etc..), luego se desmenuza en función de eso y se toma la info que interesa, por ejemplo, caudal pero también RSSI, SNR, TimeStamp, etc, de cada paquete LoRa. Cuando se termina todo esto recién ahí se publica en el broker con cada dato en su tópico. Desde el NODERED de afuera lo que se hace es tomar el dato de allí, es decir, suscribirse a los tópicos correspondientes y guardar en una tabla de la base de datos cada dato que pida por separado, es decir, RSSI, SNR, Caudal o Frecuencia, etc..por separado. Este último NODERED, se recuerda, se encontrará corriendo en una máquina local.

6. Almacenamiento en Base de Datos

6.1. InfluxDB

Una vez que el NODERED desmenuza el paquete y tenemos ahora sí los caudales o frecuencias de cada instrumento por separado, se guardan en una base de datos InfluxDB. A su vez se guardan datos de otro tipo, como el RSSI, la SNR, el TimeStamp y otros. Dicha base de datos es elegida por su ligereza y utilidad para guardar datos de tipo timestamp. Donde sólo se guardan algunos datos pequeños. Se crea una tabla para cada instrumento y se guardan así los históricos de cada uno. De esta manera queda disponible el dato fuera del servidor LoRaWAN del gateway el cual tiene una capacidad mas reducida.

7. Visualización - Monitoreo de datos

7.1. Grafana

Grafana es una software open source que permite la creación de dashboards haciendo conexión con ciertas bases de datos. Esta aplicación correrá en la máquina local y estaría aguas abajo del InfluxdB, esto es, Grafana encuesta la base de datos cada cierto periodo de tiempo y permite trazar curvas de tendencia, gráficos de barras, mostrar sólo algunos parámetros estadísticos de la variable medida, generar alarmas y enviarlas por mail, etc. Para poder visualizar en toda la red local lo que se debe hacer es abrir el puerto en la pc local desde el cual se ejecuta la aplicación. De esta manera, desde otra PC en la red puedo acceder a la visualización de datos ingresando al browser y colocando la dirección IP de la máquina con grafana y el número de puerto. Desde el grafana se lanzan los comandos SQL para traer los datos.

8. Análisis y Estudio

8.1. Descripción de la necesidad detectada

El presente proyecto se crea a partir de la necesidad que surge de un cliente de la empresa, de monitorear el caudal que fluye a través de cañerías ubicadas en lo que se denominan “distribuidores” o “satélites”, que son una red de tuberías y válvulas manuales, que distribuyen agua a muy alta presión a los pozos inyectores para así obtener un aumento en la producción de petróleo. El proceso que realizan en estos pozos se denominan “de recuperación secundaria”. Estos distribuidores pueden estar ubicados desde 2 hasta 12 km de los pozos. Los caudalímetros que tienen instalados en sitio actualmente sólo disponen de un display para indicar la variable medida con la electrónica asociada, lo que obliga a tener que enviar una cuadrilla presencialmente al lugar y tomar nota del caudal que fluye por tal cañería que se dirige a tal pozo, en lugar de que esté realizando otras tareas y evitando, además, la exposición del personal de la cuadrilla a una zona de riesgo. En la actualidad, no hay telemetría en la zona debido al alto costo que produce llevar la energía al sitio y ubicar allí una RTU (380V o 220V) con PLC, radio, antena, banco de baterías y paneles solares.

8.2. Breve descripción del proceso

El monitoreo de las variables en el campo resulta fundamental para garantizar un control preventivo, detectar errores y anomalías a tiempo que pudieran alterar el producto, los procesos, reducir pérdidas y entregar información confiable a los operadores y supervisores. A su vez se

mantiene optimizado el proceso productivo garantizando una operación segura lo cual es una obligación según la ley nº 17.319.

La recuperación secundaria se realiza en pozos denominados “pozos inyectores”. Se los llama así porque en el proceso de extracción de petróleo hay un momento en el cual deja de haber presión para poder extraer el petróleo de la manera tradicional dejando todavía petróleo crudo aún por extraer en el fondo. Es ahí cuando se inyecta agua a alta presión para remover lo que queda y poder aprovechar al máximo la extracción de la formación. A la salida de estos pozos inyectores sale el petróleo mezclado con agua que luego irá a una planta de tratamiento con piletones y mediante procesos se procederá a realizar la separación de los químicos. El agua que se recupera vuelve a reutilizarse, por eso es importante tener el control del caudal que se está inyectando en caso de tener que reponer agua al circuito de cañerías ya que pueden haber pérdidas en el proceso.

El control se realiza sobre la presión de las bombas que llevan el agua, por un caño principal, al distribuidor. Esto se realiza en otro lugar a distancias variables del distribuidor del orden de algunos kilómetros.



Figura 8.1 – Distribuidor.

8.3. Situación actual

Actualmente se envía una cuadrilla a la zona, cada cierto periodo de tiempo, a tomar los datos de caudal acumulado de los indicadores, de forma manual. Esto resulta caro ya que se debe pagar adicionales para que la cuadrilla realice la adquisición de datos y por otro lado, por el costo de

oportunidad de tener a la cuadrilla en otra tarea. Cabe destacar que también resulta riesgoso desde el punto de vista de la seguridad de los trabajadores ya que el fluido que circula por dichas cañerías está sometido a grandes presiones por lo que de haber un accidente se pondría en riesgo la vida del personal.

En términos generales, los sistemas de monitoreo se basan en la integración de diferentes soluciones de automatización y comunicaciones, importadas en su totalidad y que tienen un costo elevado de implementación de infraestructura.

8.4. Soluciones Posibles

La solución alternativa (a la situación actual) cableada también es muy costosa para poder implementarse debido a las largas distancias involucradas. Tampoco es viable, económicamente, la instalación de una RTU con PLC, radio, borneras, UPS, fuente y otros materiales necesarios para la adquisición del dato de cada cañería. Por otro lado, para el monitoreo, el costo de la programación e instalación de un SCADA resulta también poco viable en términos económicos.

8.5. Descripción de la solución propuesta

Cabe destacar que este sistema sólo sirve para procesos que no sean de vital importancia para el proceso mismo, ya que lo que se intenta hacer es tener una visualización de los datos cada cierto periodo de tiempo considerablemente amplio.

8.6. Investigación y Descripción de la solución propuesta

Una vez detectada la necesidad se procedió a analizar una propuesta técnica que satisfaga los requerimientos del cliente anteriormente mencionados. Para ello, se comenzó a estudiar las diferentes tecnologías que podrían brindar las prestaciones necesarias, se recopiló información de la infraestructura del cliente, esto es, conocer con qué equipos cuentan actualmente, la ubicación de los distribuidores en el yacimiento, las distancias involucradas y el estudio del proceso en sí.

El caudalímetro instalado, sin el display, posee un pickup magnético que genera una señal de salida pseudo-senoideal con una frecuencia proporcional al caudal y la constante de pulsos. (Según especificación se emiten pulsos pero en realidad es la señal mencionada, la misma fue medida). El sistema propuesto debía tomar la señal y medir la frecuencia para realizar el cálculo de caudal y luego enviarla a una central de monitoreo reduciendo los costos de materiales al máximo.

La señal proveniente del pickup es la que se muestra en la siguiente figura:

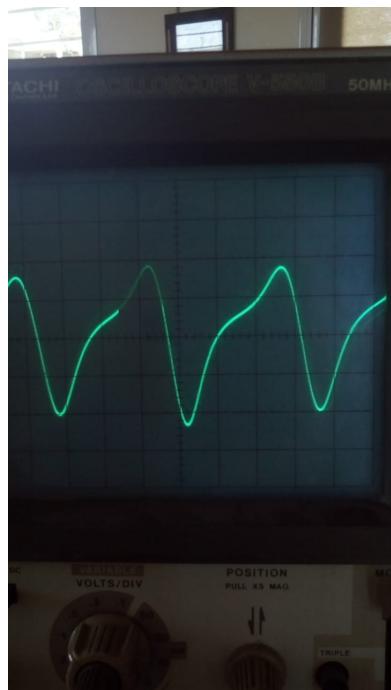


Figura 8.2 – Señal proveniente del pickup de hasta 3Vpp.

El caudalímetro instalado es similar al que se muestra a continuación



Figura 8.3 – Caudalímetro con pickup magnético vista lateral.



Figura 8.4 – Caudalímetro con pickup magnético vista frontal.

Teniendo en cuenta el requerimiento del cliente, de medir el caudal, y la necesidad de monitorear la medición de manera cómoda, en un sitio hostil como resulta ser la zona rural donde se encuentran los pozos que extraen petróleo, y descartando a su vez la posibilidad de utilizar RTU, que es lo usual para telemetría en estos sitios, debido a los costos, se procedió a analizar tecnologías que cumplan con lo mencionado.. Por un lado, se cubren las distancias involucradas en este tipo de sitios de zona rural, donde no hay interferencia debido a edificaciones, de varios kilómetros a una tasa de transferencia baja, lo cual implica a su vez un bajo consumo.

Se propuso así, desde la empresa, como solución para poder realizar una telemetría a bajo costo en procesos de estas características, y atendiendo al requisito de que la variable medida no precisa ser monitoreada constantemente sino mas bien cada cierto periodo de tiempo, la aplicación de la tecnología de comunicación inalámbrica LoRa, que utiliza protocolo LoRaWAN, y la cual brinda prestaciones viables para la implementación, ya que se cubren las distancias involucradas en este tipo de sitios de zona rural, donde no hay interferencia debido a edificaciones, de varios kilómetros a una tasa de transferencia baja, lo cual implica a su vez un bajo consumo. Además, para agregar a la solución un valor agregado del producto, se pretende realizar la adquisición de las mediciones a través un software que maneja los paquetes de datos con distintos protocolos, guardar dichos datos en una base de datos para una visualización en un dashboard que se vincule con la base de datos de manera continua.

Por otro lado, la aplicación de esta tecnología permitiría abrir posibilidades de inserción de IoT (Internet of things) a este tipo de mercado en la Argentina, ya que el auge de la industria 4.0 apunta a tener la información disponible de variables de interés para intercambiar datos y realizar, en este caso, un seguimiento remoto de procesos rutinarios de manera sencilla sin contar con una infraestructura costosa y compleja para la conectividad.

Con esta solución propuesta no sólo se mejora el estado actual sino que es una opción mejorada de la telemetría común y corriente, por todo lo mencionado. Por otra parte, al no tener que enviar cuadrilla, el cliente se ahorra viáticos y gastos con la ART para realizar el trabajo, pudiendo así destinar dichos recursos a otras tareas donde sí se precise de personal en sitio para realizar el trabajo.

El circuito del sistema, desde que se toma la señal proveniente del pickup magnético hasta que se lee la medición, es el siguiente:

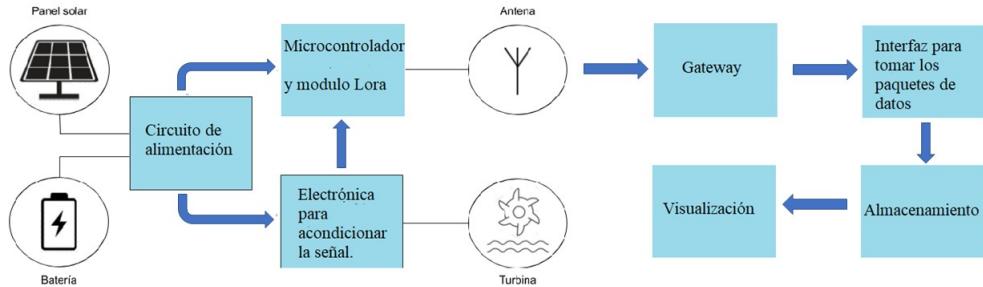


Figura 8.5 – Solución propuesta.

Una vez seleccionada la tecnología LoRa, por todo lo detallado en secciones previas relacionadas al estudio de los protocolos involucrados, se procedió a realizar los cálculos de enlace para estudiar la factibilidad técnica y las regulaciones locales correspondientes a dicha tecnología en ENACOM.

8.7. Planificación del proyecto

Para la planificación del desarrollo del proyecto se realiza un cronograma tentativo teniendo en cuenta varias tareas principales que deben realizarse dado el nulo precedente de la aplicación de esta tecnología en nuestro campo de aplicación. A su vez, debe considerarse que el proyecto se realizó en situación de pandemia y las tareas del presente proyecto se realizaron de manera paralela a las demás tareas propias del sector de Automatismo.

Para la realización del diagrama de Gantt se utilizó el software “ProjectLibre” que no requiere licencia y que, como todo software de proyecto, permite asignar los recursos disponibles para dicho emprendimiento, dividir las distintas tareas, destinar tiempos de trabajo, analizar caminos críticos y costos de inversión diferenciados por persona y por bloque de tarea.

Dicho diagrama fue realizado teniendo en cuenta feriados, vacaciones y tiempos de entrega de materiales de proveedores, tanto importados como nacionales.

8.8. División de Tareas y Duración

En el proyecto mencionado participan varias personas y varios sectores de la empresa, lo que requiere una distribución razonable de tareas y una estimación de duración de las mismas, tal como se muestra en el siguiente cuadro

Nº tarea	Descripción	Duración
	Inicio	-
-	Investigación	-
3	Productos Similares	10 días
4	Protocolos de Comunicación	15 días
5	Protocolos de IoT	25 días
6	Factibilidad Técnica	30 días
7	Recopilación de información del proceso y lugar	5 días
8	Cálculos de enlace	20 días
9	Regulaciones	10 días
10	Supervisión de tareas de investigación	34 días
11	Planificación	-
12	Estudio de Mercado	10 días
13	Establecimiento de Requerimientos	20 días
14	Grupo de trabajo y tareas	5 días
15	Supervisión de tareas de Planificación	35 días
12	Ingeniería	-
17	Diseño de Software	50 días
18	Diseño de Hardware	40 días
19	Esquemático	10 días
20	Especificaciones técnicas	10 días
21	Listado de Materiales	10 días
22	Desarrollo de protocolo de pruebas	5 días
23	Pruebas básicas en protoboard	15 días
24	Diseño de PCB	10 días
25	Diseño de Montaje	10 días
26	Plan Topográfico Rev A.	15 días
27	Supervisión de tareas de Ingeniería.	175 días
28	Compras	-
29	Circuito Impreso Prototipos	15 días
30	Circuito Impreso Definitivos	20 días
31	Componentes Nacionales	15 días
32	Componentes Importados	45 días
33	Gabinete	14 días
34	Panel Solar	25 días
35	Batería	45 días
36	Antena	70 días
37	Cables para antena	30 días
38	Supervisión de tareas de Compras	149 días

Tabla 1 – Tabla de tareas y duraciones.

Nº tarea	Descripción	Duración
39	Programación	-
40	Adquisición de entradas	15 días
41	Comunicación	10 días
42	Configuración de Gateway	5 días
43	Tratamiento de los datos con NodeRED	28 días
44	Historización en base de datos InfluxDB	20 días
45	Visualización en Grafana	20 días
46	Configuración de servidores locales	15 días
47	Supervisión en tareas de Programación	113 días
48	Construcción	-
49	Soldado de Placas prototipos	10 días
50	Soldado de placas diseño definitivo	7 días
51	Construcción de Gabinete con Panel y Antena	5 días
52	Supervisión de tareas de Construcción	71 días
53	Ensayos	-
54	Eléctricos/Electrónicos	1 días
55	Mecánicos	1 días
56	Comunicación	3 días
57	Software	3 días
58	Supervisión de tareas de Ensayos	5 días
59	Pruebas de funcionamiento	-
60	Configuración de programa	2 días
61	Mediciones	15 días
62	Validación de prototipo	10 días
63	Histórico de datos	10 días
64	Visualización	20 días
65	Supervisión de pruebas de funcionamiento	57 días
66	Testing Final	-
67	Repetición de pruebas en definitivo	10 días
68	Validación y Verificación del sistema final	10 días
69	Supervisión de Testing	20 días
70	Documentación	-
71	Manual de usuario	25 días
72	Guía rápida	25 días
73	Plano topográfico y de conexionado definitivos	15 días
74	Supervisión de Documentación	65 días

Tabla 2 – Tabla de tareas y duraciones (*cont.*).

9. Desarrollo del proyecto

9.1. Introducción a Tecnología LoRa

9.1.1. Características

9.1.2. Seguridad

9.2. Tecnología utilizada

9.3. Cálculos de Enlace

9.3.1. Programa y Modelos de Elevación Digital

9.4. Software

Para el desarrollo del software se estudiaron diferentes posibilidades para la programación de la placa mDot. Se optó finalmente por utilizar el ide MbedStudio que es el que provee el fabricante de tecnología para IoT en mancomún con ST, fabricamente de microcontroladores, circuitos integrados y sistemas embebidos basados en arquitectura ARM, y Multitech, fabricante de hardware y dispositivos de comunicación. Esta IDE se encontraba en versión beta, con lo cual se encontraba en fase de desarrollo y actualización pero proveía versatilidad para los equipos de dicha tecnología.

En lo relacionado al programa, se encuentra por un lado las bibliotecas y funciones dedicadas a la parte de comunicación de radio y por otro lo relacionado al procesamiento de la variable medida en campo, que en este caso puede ser caudal o frecuencia, según lo indique y determine el cliente en función del equipo instalado o a instalar.

9.4.1. Parámetros de Configuración

Para la adquisición de las variables y el envío de datos se deben setear ciertos parámetros de configuración que son determinados, algunos, por criterios arbitrarios, como los tiempos entre envíos o cantidad de reintentos, y otros, por el instrumento instalado, como la constante de pulsos por litro que varía según el caudalímetro.

A continuación muestra un listado de parámetros que se permiten cargar al programa del equipo a la hora de instalarlo en el sitio.

- Tiempo en Modo Sleep
- Cantidad de reintentos de envíos.
- Límite de tiempo superior.
- Límite de tiempo inferior.
- Banda de Frecuencia
- Habilitación de Entradas Analógicas
- Constantes de caudalímetros

Estos parámetros se pueden setear entrando al modo configuración del programa(Ver Manual de Operación) manteniendo presionado el botón de Modo y enchufando la placa de configuración a la placa del Nodo. Mientras el Led amarillo permanece encendido se debe abrir una terminal para realizar la comunicación serie. Se mostrará un menú de configuración con los parámetros mencionados, los cuales, luego de ser cargados se guardarán en la memoria flash del equipo. Es en esta parte donde se setea si se quiere medir caudal o frecuencia. Para el caso de la frecuencia se debe asignar una constante igual a uno o cero.

A continuación se muestran capturas del terminal y las diferentes secciones del menú.

9.5. Comunicación

Teniendo en cuenta que se realiza la activación mediante el método OTAA (Over the Air Activation), el cual es el elegido por ser mas seguro para conectar nodos al Network Server en el GW, el nodo debe conocer y guardar mediante software el DevEUI, la AppEUI y la AppKey.

El DevEUI es un identificador único del nodo y es similar a la MAC Address de un equipo. La AppEUI es un identificador para el Application Server y es similar a un número de puerto de un equipo. La AppKey es una clave encriptada de 128 bits y sirve para generar el código de integridad del mensaje, que asegura la integridad del mismo. Ambos, nodo y el Network Server del GW deben tener la misma AppKey.

El modo Adaptive Rate está habilitado para poder optimizar la potencia de la señal enviada desde el nodo al GW.

Estos parámetros de configuración deben coincidir tanto en nodo como en gateway.

El programa guarda la configuración del nodo en la memoria Flash del equipo. Se setea la banda de frecuencia de operación del nodo, en nuestro caso, según regulación será la banda australiana 915-928 Mhz, se intenta realizar la activación mediante el método elegido (OTAA) y envía el Join Request con unos primeros paquetes de información del tipo de nodo para poder enlazarse. Espera a que el GW responda el Acknoledge y luego comienza a procesar las entradas para armar los paquetes correspondientes y enviar los datos. Si no recibe el Acknoledge del GW, luego de que este chequea las credenciales, espera un tiempo determinado para volver a intentar enlazarse. El número de intentos de enlace se configura en el código. Superado este número se considera desconectado.

Una vez enlazado el nodo con el GW, chequeadas las credenciales y funcionando correctamente se procede a realizar los cálculos correspondientes de las entradas y arma los paquetes de información y los envía a máxima potencia. Se hace a máxima potencia durante los primeros 20 paquetes hasta que el GW evalúa la SNR máxima recibida y el correspondiente Data Rate y calcula:

Este valor obtenido le dice al Network Server que el nodo está utilizando demasiada potencia en la transmisión, con lo cual debe optimizarse según la ecuación precedente y se lo envía al nodo para que ajuste la transmisión.

Por otra parte, como criterio utilizado, si el nodo falla al enviar un paquete, pues no recibe el acknoledge, entonces se va a dormir y espera un tiempo random calculado según los parámetros de Tiempo Superior y Tiempo Inferior que el usuario ingresó al momento de la configuración o precargado en la memoria flash para enviar nuevamente el paquete. Transcurrido este tiempo random, cuya naturaleza aleatoria fue realizada con el criterio de que no haya colisión con el paquete enviado por otro equipo, despierta e intenta enviar el dato nuevamente. Esto lo hace una cantidad n de veces seteada por el usuario. Si falla en todos los intentos entonces vuelve al modo sleep el tiempo restante predeterminado entre envíos. Es decir, al tiempo predeterminado (envío de datos cada 30 minuto) se le resta el o los tiempos random que estuvo durmiendo esperando a reintentar.

9.5.1. Trama de datos

La trama de datos se arma con el prefijo AABB, el cual es arbitrario e indica el tipo de nodo y sirve para identificarlo en el gateway, luego el número de paquete (00, 01 o 02) y luego los bytes de información de las señales agrupadas de a 4 señales, cada una de 16 bits (2 bytes), como se muestra a continuación:

9.6. Procesamiento de la señal

La señal proveniente del caudalímetro con pickup magnético, como se dijo, es una pseudoseñoidal que luego se acondiciona con el diseño del hardware, es procesada por el microcontrolador tomando diferentes criterios de diseño. Dado que en el distribuidor hay varios caudalímetros se ponen a disposición 8 entradas analógicas, las cuales se permiten mediante configuración, la habilitación o deshabilitación de las mismas. El tiempo de procesamiento varía según esta opción, ya que se demora mas tiempo si el microcontrolador debe chequear mas o menos periféricos. Se toman las muestras entrada por entrada, en cuentas según la resolución del ADC, para luego ser comparadas con un valor de umbral arbitrario de amplitud y procesadas. Se optó como criterio que dado el rango de frecuencias de trabajo de la señal (50 a 1000Hz) si la entrada está habilitada, el programa toma una ventana de tiempo equivalente a 40 ciclos de la señal para realizar el cálculo, independientemente de la frecuencia original. Si pasa 1 segundo y todavía no llegó a la mitad de ciclos que tendría la señal en el rango inferior de trabajo entonces es porque o no hay señal o es una frecuencia no permitida, está fuera del rango. Por lo tanto, deja de medir y continúa con la siguiente entrada. De esta manera se reduce el tiempo de consumo de lectura de periféricos. El numero de umbrales superados es igual al número de periodos de la señal y de esta manera dividiendo por la ventana de tiempo, obtengo la frecuencia medida. Se guardan estos valores en un vector para luego calcular el caudal, si corresponde, según la constante K (pulsos por litro) del caudalímetro correspondiente y se arma el paquete de datos colocando primero la parte alta y luego la baja. Para poder enviar el dato con un decimal de resolución, cuando se realiza la cuenta se escala y luego se reescala antes de guardarla en la base de datos.

Un proceso algo diferente sucede con la señal de corte de panel. Esta señal digital ingresa a los pines de interrupción, para generar una alarma de corte de panel, y a un pin de entrada digital que lee constantemente el estado de dicho pin. El pin de interrupción detecta cambios de flancos, tanto ascendente como descendente para despertar al nodo (pin de wake up) ya sea en caso de corte o de conexión de panel. Este se envía en un paquete de datos con la misma información de nodo pero sólo con el dato digital 0 o 1,

9.6.1. Funciones de Procesamiento

A continuación se nombrarán, detallarán y mostrarán imágenes de algunas funciones del software implementado que están relacionadas con el procesamiento del dato sin adentrarse en la comunicación y protegiendo la privacidad del código fuente en su completitud. Las imágenes de las porciones de código se encuentran comentadas para facilitar el entendimiento del mismo.

Función Calcular Frecuencia

Esta función recibe el índice del ADC que debe leer en ese momento, ya que sólo se leen los que se encuentran *Habilitadas*. Esta información se toma de la lectura de configuración guardada en la memoria flash. El chequeo de habilitación se realiza en el bucle principal.

Se crean las variables necesarias para tomar las muestras y compararlas con la variable global de Umbral y completar así, 40 ciclos de la señal. Se da comienzo a un timer que medirá el tiempo que toma contar los 40 ciclos mencionados. El dato de esta ventana de tiempo es necesaria para luego calcular la frecuencia y, posteriormente, el caudal. Se lee muestra a muestra en tiempo real y se la compara con el umbral, en cuentas. Si se supera cambia el estado de una variable que es utilizada como flag y aumenta el contador. Para ser mas precisos en el cálculo se resta al final el tiempo que toma llegar hasta el primer umbral. De esta manera, la ventana de tiempo es mas precisa al tomar la cantidad predeterminada de ciclos. Cuando la lectura no supera el umbral superior pero tampoco supera el inferior, se vuelve a cero el flag.

A modo de optimizar los tiempos de procesamiento se opta por leer el tiempo y corroborar que no haya pasado mas de 1 segundo y a su vez el contador no haya superado la mitad de ciclos

prevista para la frecuencia mas baja. Si se cumple esta condición quiere decir que la entrada está habilitada pero no hay señal en dicho periférico. Es decir, el instrumento está desconectado y no se debe perder mas tiempo en leer la ausencia de señal.

Para corroboración en el desarrollo se colocó varios *printf* para ver la lectura en frecuencia, antes de convertir, si corresponde, a unidad de caudal.

9.7. Diseño de Hardware

Para poder adaptar la señal proveniente del pickup magnético debió realizarse una placa de hardware que acondicione dicha señal y permita la alimentación del microcontrolador, el módulo de radio y los componentes electrónicos para dicho propósito. Se comenzó con el requerimiento de que el circuito debe tener una autonomía razonable dado el consumo final del sistema. Para disminuir al mínimo el consumo se utilizó el circuito integrado TS3V33 basado en tecnología CMOS de bajo consumo, que contiene 2 operacionales que se encargan de tomar la señal proveniente del instrumento y enviar al ADC del microcontrolador una señal de pulsos, evitando así cualquier tipo de ambigüedad en los cálculos. La alimentación de dichos integrados es provista por el microcontrolador mediante su pin de alimentación de 3.3V. Los opamp actúan como comparadores por cero para dicho propósito, es por esto que la alimentación se encuentra entre Vcc y 0V. Como el microcontrolador tiene 8 ADC de 12 bits de resolución se necesitaron 4 de estos integrados. Se incorporaron resistencias y diodos junto al integrado para el tratamiento de la señal. La función de dichos componentes se detalla a continuación:

- Resistencia de $1M\ \Omega$ de pullup entre entrada no inversora y Vcc para que, en caso de ausencia de señal, baje la impedancia de entrada y no capte ruido que sea tomado como señal de caudal. A su vez permite que siempre haya una tensión de entrada para continua en caso de ausencia de señal.
- Resistencia de $220k\Omega$ de pullup entre salida del operacional y Vcc para que en caso de ausencia de señal dicho nodo no quede flotante.
- Diodo Schotky para evitar amplitudes negativas fuera del rango de operación que puedan dañar el integrado. Por otra parte, rectifica la señal eliminando el semiciclo negativo y dejando pasar sólo el semiciclo positivo.

El esquemático es el que se muestra a continuación

El microcontrolador es alimentado con 5V que provienen del regulador aguas arriba que toma la tensión de batería y la baja a la de operación.

9.7.1. Pin de N-Reset

Entrada Digital

El microcontrolador, como se mencionó, tiene entrada digital de NReset, que resetea el microcontrolador cuando por dicho pin recibe un flanco descendente. Cabe destacar que según las especificaciones, la entrada NReset debe recibir una señal Low durante un determinado tiempo, es decir, debe pulsarse el botón y mantenerse apretado. Se utiliza resistencia de pullup interna.

Salida Digital

Se activa el pin DO1 que envía la señal a la base de un transistor NPN BC337 que coloca a dicho dispositivo en la zona de trabajo de saturación permitiendo así el paso de corriente para encender el diodo Led que indica el correcto reinicio del microcontrolador.

9.7.2. Pin de Modo Configuración

Entrada Digital

Para entrar al modo configuración se colocó un botón pulsador que permite ingresar el estado Alto (HIGH) a dicho pin. Dicho pulsador, como se explica en el manual, debe mantenerse pulsado hasta que se conecta la placa de configuración a la computadora. En condición normal el pin tiene una resistencia de PullDown de $1k\Omega$ externa evitando así que el pin quede flotante cuando se encuentra en modo Run.

Salida Digital

Cuando se ingresa al modo configuración se activa la salida DO2 que realiza el mismo trabajo que el pin DO1 pero con otro diodo Led de color amarillo que se mantiene encendido durante un lapso de tiempo para dar tiempo suficiente al operador para colocar la placa de configuración y entrar al terminal para cargar los parámetros correspondientes.

9.7.3. Error

Como mecanismo indicativo de error, el microcontrolador activa una salida digital a través del pin 7 DO3 que, al igual que las salidas recientemente mencionadas, envía una señal intermitente a la base de un tercer transistor que hace encender un led Rojo indicando al usuario que ocurrió algún tipo de error en los parámetros de configuración, de lectura de memoria flash o de comunicación.

Se detallan las posibles condiciones de error en el manual de usuario.

9.7.4. Pines de señal

Analógicas

El microcontrolador, como se mencionó, posee 8 ADC de resolución de 12 bits que se utilizan para las entradas de caudal. Los pines seleccionados para dichos propósitos son:

Se utilizan en su totalidad para permitir la mayor cantidad de mediciones de caudal posibles.

Digitales

Existen pines de la placa que son reservados y específicos para ciertos propósitos. Entre ellos se encuentra el pine de wakeup, que sirve para despertar al Nodo en caso de que se encuentre en modo sleep. Este pin se aprovecha puentenandolo a otra entrada digital. Dicha entrada digital es un pin que está conectado a una bornera en donde se coloca un cable que indica el estado de panel, esto es, indica si el panel continúa montado en la RTU. Esto sirve como mecanismo de seguridad para detectar el corte de panel. Si se corta el panel, esto genera un flanco descendente que hace despertar al nodo, chequear dicha entrada y enviar el estado. Por otro lado están las las entradas mencionadas en los párrafos precedentes que cumplen distintas funciones. Por último, se encuentran las salidas digitales que se utilizan únicamente para el control de modos de los transistores, los cuales tienen a su vez, sus propias funciones indicativas al operador de campo. La tensión de dicho cable puede ser provista por el regulador o por el propio mDot, según se desee. El hecho de tener esta última señal implica tener consumo constante y es por esto que se colocó una resistencia de 10k y de esta forma limitar la corriente.

9.7.5. Pines de Comunicación Serie

Para el modo configuración, se mencionó que debe ingresarse a éste mediante un pulsador que envía la señal a una entrada digital. Ahora bien, una vez que se ingresa a este modo, se deben poder cargar los parámetros de configuración mediante comunicación serie. Se utiliza la placa USB a Serie. Para ello, se colocó una serie de pines hembra de paso 2.5mm para poder conectar dicha placa al micro. Mediante los pines Tx y Rx respectivos de uno y el otro se realiza la comunicación. Como agregado, y para evitar cualquier problema circuital, se puede alimentar al mDot durante ese momento a través del pin de alimentación de 5V que provee la placa USB a serie conectada a la notebook. Este cambio es posible gracias a un jumper.

9.7.6. Jumpers

En la placa de hardware diseñada se colocaron 2 jumpers. Uno permite el cambio de alimentación que se provee al microcontrolador. Si bien, ambas son de 5V, en el caso en el que se

encuentra en modo Run, el mDot es alimentado por la tensión regulada de batería. En el caso de modo configuración, existe la posibilidad, aunque no es obligatorio, de alimentarlo a través de la placa USB a Serie, que a su vez toma la alimentación del puerto USB de la computadora. Este jumper permite desacoplar el circuito de regulación del microcontrolador e integrados. El segundo jumper, es optativo, permite que, una vez desacoplado el circuito de alimentación, el mDot siga entregando tensión al cable de corte de panel pero disminuyendo el consumo ya que dicha tensión pasa de 5V a 3V proveniente del microcontrolador.

9.7.7. Transistores

La alimentación de 5V que es provista por el regulador para el microcontrolador es aprovechada también por los transistores NPN BC337 que controlan el encendido y apagado de los leds indicativos mediante los modos de operación saturación y corte, respectivamente. Para el control de estos modos se alimenta la base del transistor a través de la activación de salidas digitales del microcontrolador cuando la lógica programada lo accione, según corresponda.

9.7.8. Regulación de Batería

La tensión de alimentación que alimenta al mDot y, por lo tanto, al circuito aguas abajo. la provee el integrado 2940CT, el cual es un regulador de tensión que, según las especificaciones fija la tensión de salida del mismo a $5V +\Delta 0,02V$. De dicho nodo se alimentan también las mallas de salida de los transistores que controlan los leds indicadores.

El regulador 2940CT presenta una configuración propuesta por la propia datasheet para la correcta regulación de tensión colocando capacitores de $47\mu F$ y $22 \mu F$ a la entrada y salida, respectivamente. También se coloca un diodo 1N4007 entre entrada y salida para protección en caso de que la tensión de entrada de batería disminuya de manera tal que el dropout permita la regulación pero que provoque un cambio en el sentido de la corriente. De esta forma, el diodo otorga un camino para la corriente evitando así que ingrese al integrado. Por otra parte, se adhiró otro diodo zener a la entrada del regulador que actúa como regulador y protector de sobretensión e inversión de polaridad, en caso de mala conexión. En serie con la entrada se coloca un fusible de 1A para proteger en caso de exceso de corriente debido a un corto o mal conexionado. En términos ideales, la entrada del regulador estará siempre por encima de los 12V, en tensiones cercanas a las del modo cycle use (Tensión de carga de batería).

9.7.9. Regulación de Panel y Carga de Batería

Continuando aguas arriba de la batería se encuentra precisamente el integrado LM317 que, mediante resistencias y un preset de ajuste, fija la tensión de salida a la deseada, en nuestro caso, la tensión de cycle use que precisa la batería para que el panel pueda cargarla (Alrededor de los 14V. Se encuentra la especificación impresa en la misma batería). Posee los capacitores de entrada y salida propuestos por el datasheet para la correcta regulación, y un diodo de protección para el cambio de sentido de la corriente, cuando el panel ya no provee una tensión a la entrada mayor a la de batería. En paralelo con la entrada se encuentra otro diodo zener, al igual que en el otro integrado, para proteger de sobrepicos de tensión y proveer un camino para la corriente en caso de invertir la polaridad por una mala conexión. El panel tiene una tensión pico de 19.8V, según datasheet, aunque en la práctica pueden presentarse sobrepicos.

9.7.10. Materiales de Gabinete

9.7.11. Componentes

9.7.12. Esquemático

9.7.13. Diseño de PCB

9.7.14. Prototipos

9.7.15. Mediciones

9.8. Diseño de Montaje**9.8.1. Materiales de Montaje****9.9. Planos Topográficos**

9.10. Tratamiento del Dato con Node-RED

9.10.1. Node-RED dentro del Gateway

Una vez que el dato LoRa llega al gateway Multitech se almacena el dato en el Network Server y se accede a él mediante la interfaz gráfica NODE-RED que se encuentra instalado dentro del GW, la cual brinda bloques de funciones predeterminadas y bloques libres para que se pueda programar una función específica en lenguaje JavaScript. El dato se toma del Network Server con un formato JSON, el cual se muestra a continuación:

Como se observa en la imagen, se pueden tomar diferentes datos de interés de un mismo paquete de datos, como puede ser: SNR, RSSI, CANAL de Operación, Sub-banda de frecuencia, Data Rate, Payload (vector que contiene la medición e identificador), etc.

El paquete se filtra en el siguiente bloque, según su identificador:

Aquí lo que se hace es re-organizar el paquete y asignarle otros campos, como el campo nodo que tiene el número de paquete y se re arma el objeto payload con los campos de interés del paquete crudo y creando nuevos. Luego se separa según el número de paquete y se arman los topicos para publicar en el broker MQTT. En este bloque se realizan varias funciones. Se toman los datos de interés del Payload que se desea guardar en la base de datos e historizar. Entre ellos se encuentran:

- Relación señal ruido
- Nivel de intensidad
- DevEUI del equipo
- Estampa de Tiempo
- Data Rate
- Frecuencia de Operación
- Canal de Comunicación.

Se arma el topico principal con el nombre arbitrario que se desee seguido por el subtopico concatenado con nombre de DEVEUI. A su vez se arma el dato con resolución de 1 decimal mediante una función local llamada decopulso. Finalmente se crean los mensajes individuales con cada dato del anterior Payload por separado y se lo envía a la siguiente función para que cree el topico correspondiente que tendrá dicho dato y que luego publicará en el broker. De esta forma se tienen separada la información publicada.

9.10.2. Node-RED de Host Local

Una vez que el dato es publicado en el broker MQTT del GW, el usuario debe suscribirse mediante este protocolo a los topicos que deseé acceder. Para esto, se debe realizar mediante un Node-RED que permita traer el dato hacia el host o servidor local para que este pueda almacenarlo.

Con el primer bloque que se muestra en la figura, se realiza la suscripción al topico de interés del broker MQTT. La función parsea el dato al tipo de dato que corresponda y re-armo el Payload del mensaje. Este último es el que se guarda en la base de datos InfluxDB, diseñado para métricas, es decir, datos de tipo estampa de tiempo.

Esta parte, de todas maneras, no está disponible para el usuario.

9.11. Base de Datos

El servidor de base de datos que se utilizará para la etapa de almacenamiento, para su luego posterior visualización, es InfluxDB. Dicha base de datos es un software de código abierto y optimizado para los tipos de datos con estampa de tiempo. La estructura de este tipo de base de datos suelen ser muy compactas y solo necesitan contar con dos o tres columnas. Cuenta, además, con un servicio de tiempo que usa el Network Time Protocol (NTP) para garantizar que el tiempo esté sincronizado en todos los sistemas. La ventaja de este tipo de base de datos de series de tiempo es que son mucho más rápidas que las base de datos relacionales a la hora de almacenar y procesar datos de medición con marcas temporales. Una gestor de base de datos como la mencionada dedica parte de su rendimiento a la organización de un índice complejo, que en este ámbito de aplicación no se utiliza. Por otra parte, la opción paga de InfluxDB ofrece una solución en la nube para Amazon Web Services y Google Cloud Platform, con lo cual, en caso de querer escalar el proyecto hacia este rumbo puede hacerse sin demasiados inconvenientes ya que no se pierden los datos almacenados. La versión gratuita, que es la que se utiliza en este proyecto, está sujeta a restricciones de lectura y escritura de un máximo de 10000 juegos de datos y un periodo de almacenamiento máximo de 30 días. Por último, y por lo que fue seleccionada además de las ventajas mencionadas y de que está teniendo un gran reconocimiento en la industria IoT, es que permite la facilidad de vinculación con Node-RED y con Grafana, lo cual permitió llevar adelante el proyecto como fue planteado en su comienzo.

9.12. Visualización

9.12.1. Grafana

9.13. Instalación Final

9.14. Análisis de Rentabilidad

9.14.1. Gastos de Desarrollo e Inversión

9.14.2. Gastos De Producción

9.15. Modelo de Negocio

El desarrollo de lo planificado en la empresa abre paso a diferentes posibilidades de negocios y diferentes mercados. Al ser una tecnología versátil se puede adaptar según la necesidad de potenciales clientes de diferentes sectores productivos como pueden ser:

- Industrias ferroviarias, de minería, de gas & oil, de agua potable y frigoríficos, entre otros.
- Actividad agrícola en acopio de granos.
- Actividad ganadera para monitoreo de animales.
- Retails: Supermercados donde se necesite monitoreo de cantidad de personas.
- Transporte.
- Otros.