

NOMBRE DEL TRABAJO

T088A_46818835_T (3).pdf

AUTOR

caballero

RECUENTO DE PALABRAS

19970 Words

RECUENTO DE CARACTERES

110916 Characters

RECUENTO DE PÁGINAS

99 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

3.2MB

FECHA DE ENTREGA

Aug 30, 2023 7:07 PM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Aug 30, 2023 7:10 PM GMT-5**● 17% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 17% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 2% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● Excluir del Reporte de Similitud

- Base de datos de trabajos entregados
- Material bibliográfico
- Material citado

UNIVERSIDAD NACIONAL TECNOLÓGICA DE LIMA SUR

FACULTAD DE INGENIERÍA Y GESTIÓN
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES



“DISEÑO DE UN SISTEMA ELECTRÓNICO DE BAJA POTENCIA PARA
MEDICIÓN DE CONSUMO DE AGUA BASADO EN COMUNICACIÓN
SIGFOX EN LA EMPRESA TECA PERU S.A.C.”

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Para optar el Título Profesional de

INGENIERO ELECTRÓNICO Y TELECOMUNICACIONES

PRESENTADO POR EL BACHILLER

CABALLERO MORENO, MARCO ANTONIO

ASESOR

MACHUCA MINES, JOSÉ AMBROSIO

Villa El Salvador

2021

DEDICATORIA

*A mi mamá doña Lidia Susana Moreno Puca y a mi papá don Marco Antonio Caballero Azabache de quienes me siento orgulloso y agradecido por guiar mi camino con educación e infinito amor.
A mi hermana Isabella Susana Caballero Moreno por su compañía y apoyo incondicional.*

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi querida universidad UNTELS, mi asesor y profesores que me impartieron sus conocimientos y experiencias, a mis amistades que acompañaron mi desarrollo profesional y personal, a mis amigos del grupo de Robótica con quienes hemos viajado y realizado innumerables proyectos. Agradezco a toda mi familia, primos y tíos, ¹⁶ en especial a mi tío Carlos Puca, y a mi Madrina Elizabeth, gracias por su apoyo y sabios consejos les estoy eternamente agradecido. A mis abuelitos y tíos que partieron al cielo. A mis compañeros de la empresa TECA PERU SAC por ser parte de este proyecto.

2 INDICE

DEDICATORIA	II
AGRADECIMIENTOS	III
RESUMEN	X
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I. ASPECTOS GENERALES.	2
1.1 CONTEXTO (EMPRESA).....	2
1.2 DELIMITACIÓN DEL PROYECTO	2
1.2.1 Teórica	2
1.2.2 Temporal.....	2
1.2.3 Espacial	2
1.3 OBJETIVOS	2
1.3.1 Objetivo general.....	2
1.3.2 Objetivos específicos	2
CAPITULO II. MARCO TEÓRICO	4
2.1 ANTECEDENTES DEL ESTUDIO	4
2.1.1 Nacionales	4
2.1.2 Internacionales.	5
2.2 BASES TEÓRICAS	6
2.2.1 Circuitos electrónicos de baja potencia	6
2.2.2 Reguladores de voltaje LDO	7
2.2.3 Microcontroladores de ultra baja potencia	9
2.2.4 Medidores de Agua y sus Componentes	11
2.2.5 Antenas.....	17
2.2.6 Telemetría.....	18
2.2.7 Redes LPWAN.....	19
2.2.8 MODEM Sigfox	24
2.2.9 Comandos AT	26
2.2.10 Compilador PIC C.....	27
2.2.11 Software Proteus	27
2.2.12 Tecnología de Baterías	28
2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS.....	29
CAPITULO III. DESARROLLO DEL TRABAJO PROFESIONAL.	32

2	3.1 DETERMINACIÓN Y ANÁLISIS DEL PROBLEMA	32
	3.1.1 Definición de la Problemática	32
	3.1.2 Determinación de requerimientos	35
2	3.2 MODELO DE SOLUCIÓN PROPUESTO	39
	3.2.1 Análisis	40
	3.2.2 Diseño de circuito electrónico de baja potencia	51
	3.2.3 Diseño del algoritmo.	63
	3.2.4 Pruebas.....	67
	3.2.5 Validaciones.....	69
	3.3 RESULTADOS	75
30	CONCLUSIONES	76
	RECOMENDACIONES	77
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	78
	ANEXOS	81
	ANEXO 01: Esquemático circuito electrónico.....	81
	ANEXO 02: Código fuente	82
	ANEXO 03: Hoja de Datos PIC16LF1516	85
	ANEXO 04: Hoja de datos Modem SFM10R4	86
	ANEXO 05: Hoja de datos Medidor Elster M170	87
	ANEXO 06: Hoja de datos salida de pulsos PR6 Elster	88
	ANEXO 07: Hoja de datos de batería MN1500 Duracell	89

LISTADO DE FIGURAS

<i>Figura 1 Estructura de un circuito lógico CMOS. Empleado muy comúnmente en circuitos lógicos de bajo consumo.</i>	7
<i>Figura 2 ⁶ Representación de la curva de descarga de una batería para una carga RLoad y la respuesta de un regulador de voltaje</i>	8
<i>Figura 3 Estructura interna ⁶ de un regulador LDO con Transistor PMOS.</i>	8
<i>Figura 4 Corriente de reposo de un regulador LDO.</i>	9
<i>Figura 5 Modos de operación de un microcontrolador ULP con respecto a la energía que demanda.</i>	10
<i>Figura 6 Medidores de agujas y tambores. Se aprecia los indicadores tradicionales como el consumo en volumétrico en m3.</i>	11
<i>Figura 7 Partes del Medidor. Vista externa.</i>	13
<i>Figura 8 Partes del Vista Interna.</i>	13
<i>Figura 9 Clasificación de los medidores.</i>	14
<i>Figura 10 Medidor de agua con salida de pulsos.</i>	16
<i>Figura 11 Salida de pulsos. Producido por un interruptor magnético.</i>	16
<i>Figura 12 Señal de pulsos. Existe un tiempo de duración en estado alto como en estado bajo.</i>	17
<i>Figura 13 Comparación entre redes convencionales y redes LPWAN.</i>	20
<i>Figura 14 Países cubiertos por la red 0G Sigfox.</i>	22
<i>Figura 15 Detalles técnicos de los RC.</i>	22
<i>Figura 16 Mensaje Uplink Sigfox.</i>	23
<i>Figura 17 Tecnología UNB de Sigfox. Presenta 54 micro canales de acceso aleatorio en un rango de 192KHz.</i>	23
<i>Figura 18 Modem SFM10R4.</i>	25
<i>Figura 19 ⁵⁶ Diagrama de bloques interno del modem SFM10R4.</i>	25
<i>Figura 20 ¹ Arquitectura de red para la tele medición de consumo de agua.</i>	36
<i>Figura 21 Propuesta de arquitectura de diseño del sistema electrónico de baja potencia.</i>	37
<i>Figura 22 Medidor de agua Elster M170.</i>	38
<i>Figura 23 Adaptador de salida de pulsos modelo PR6 de Elster.</i>	38
<i>Figura 24 Señales de pulsos de medidor de agua.</i>	39

<i>Figura 25 Fases del diseño del circuito electrónico de baja potencia.</i>	40
<i>Figura 26 Antena monopolo AN3G01.</i>	47
<i>Figura 27 Antena monopolo Wodf-920.</i>	48
<i>Figura 28 Antena Helicoidal T10.</i>	49
<i>Figura 29 Parámetros de elección de una batería.</i>	50
<i>Figura 30 Circuito Pull-Down para entrada de pulsos de medidor de agua.</i>	53
<i>Figura 31 Circuito de alimentación para circuito de baja potencia.</i>	54
<i>Figura 32 Voltaje de operación de modem SFM10R4.</i>	55
<i>Figura 33 Circuito para modem SFM10R4.</i>	56
<i>Figura 34 Transmisión de mensajes Sigfox.</i>	56
<i>Figura 35 Relación entre frecuencia y voltaje de operación en el microcontrolador con respecto su consumo de corriente.</i>	58
<i>Figura 36 Circuito para microcontrolador PIC16LF1516.</i>	59
<i>Figura 37 Circuito electrónico de baja potencia para la medición de consumo de agua.</i>	61
<i>Figura 38 Diseño en PCB del circuito de baja potencia para la medición de consumo de agua.</i>	61
<i>Figura 39 Vista en 3D de la PCB.</i>	62
<i>Figura 40 Diagrama de flujo de la operación en adquisición de pulsos del medidor de agua.</i>	63
<i>Figura 41 Segmento de programa del microcontrolador en la inicialización.</i>	64
<i>Figura 42 Variables empleadas en el programa.</i>	64
<i>Figura 43 Inicialización de código de microcontrolador.</i>	64
<i>Figura 44 Configuración de interrupción externa y desbordamiento de timer 1 cada segundo.</i>	65
<i>Figura 45 Subrutinas para interrupción externa y timer 1.</i>	66
<i>Figura 46 Bucle principal del código.</i>	67
<i>Figura 47 Simulación del circuito de bajo consumo.</i>	67
<i>Figura 48 Simulación de adquisición de pulsos.</i>	68
<i>Figura 49 Simulación del funcionamiento del Timer1.</i>	69
<i>Figura 50 Simulación de transmisión de pulsos contabilizados empleando MODEM SFM10R4.</i>	69
<i>Figura 51 Tarjeta electrónica de bajo consumo con comunicación Sigfox ensamblada.</i>	70

<i>Figura 52 Consumo promedio de corriente del circuito electrónico.</i>	<i>70</i>
<i>Figura 53 Vista superior de banco de pruebas en las instalaciones de la empresa TECA PERU S.A.C.</i>	<i>72</i>
<i>Figura 54 Conexión de cable de salida de pulsos con tarjeta electrónica</i>	<i>72</i>
<i>Figura 55 Circuito de baja potencia instalado en el medidor de agua Elster.</i>	<i>73</i>
<i>Figura 56 Datos de consumo de agua visualizados en la web Backend Sigfox. ..</i>	<i>74</i>
<i>Figura 57 Señal de radiofrecuencia del MODEM SFM10R4. Se transmite la información al con una duración de 3S.</i>	<i>75</i>

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1	Tabla de características entre tipos de medidores	15
Tabla 2	Lista de características del MODEM SFM10R4	26
Tabla 3	Lista de comando AT MODEM SFM10R4.	26
Tabla 4	Características de bajo consumo de microcontroladores STM8L	41
Tabla 5	Características de bajo consumo de microcontroladores STM32L4	41
Tabla 6	Principales gamas de microcontroladores PIC de 8 bits	42
Tabla 7	Características los microcontroladores de bajo consumo PIC12LFXXXX	43
Tabla 8	Características de microcontroladores de bajo consumo PIC16LFXXXX.	43
Tabla 9	Características de microcontroladores de bajo consumo PIC18LFXXXX.	44
Tabla 10	Características del modem SFM10R4	45
Tabla 11	Características del MODEM RC1692HP-SIG	45
Tabla 12	Características del modem iMCP – HT32SX	46
Tabla 13	Antena larga monopolo AN3G01	47
Tabla 14	Antena larga monopolo Wodf-920	48
Tabla 15	Antena larga monopolo Wodf-920	49
Tabla 16	Propiedades de baterías de Litio y alcalinas	50
Tabla 17	Definición de pines de entrada y salida en el microcontrolador	60
Tabla 18	Lista de materiales del circuito electrónico	62
Tabla 19	Mediciones registradas en el medidor de agua	73
Tabla 20	Resultados obtenidos en el diseño del sistema electrónico	75

RESUMEN

El presente trabajo de suficiencia profesional que se realiza para obtener el Título de Ingeniero Electrónico y de Telecomunicaciones, lleva por título "DISEÑO DE UN SISTEMA ELECTRÓNICO DE BAJA POTENCIA PARA MEDICION DE CONSUMO DE AGUA BASADO EN COMUNICACION SIGFOX EN LA EMPRESA TECA PERU S.A.C." presentado por el Bachiller Marco Antonio Caballero Moreno. Las empresas de saneamiento o EPS's requieren de nuevas soluciones tecnológicas que les permitan recopilar la información del consumo de agua de medidores domésticos instalados en las viviendas del país. En la actualidad lo hacen manualmente, esto genera errores en la medición, por consiguiente, errores en la facturación final de sus usuarios. La empresa TECA PERU S.A.C. propone un servicio comercial de telemetría enfocada a las necesidades de las EPS's del país, se propone diseñar un sistema electrónico que realice la adquisición de señales de pulsos de los medidores de agua, transmitiendo los datos mediante la red 0G Sigfox con autosuficiencia de 3 años y empleando baterías.

Con el fin de determinar el diseño del sistema electrónico de baja potencia se realiza un análisis de microcontroladores, MODEMS, antenas y baterías seleccionado aquellos que se adecuan de mejor manera a los requerimientos de las EPS's. Se propone una arquitectura de diseño del circuito electrónico y se emplea el software Proteus para realizar las simulaciones del funcionamiento para la adquisición de señales de pulsos. Además, se realiza un esquemático del circuito electrónico, diseño de PCB y ensamble de componentes electrónicos.

Para la comprobación de la autonomía del sistema electrónico, se realizan mediciones de consumo de corriente en estado activo, con el valor obtenido se calcula los días y años que operará ininterrumpidamente el sistema electrónico. Por último, se realizan pruebas de la transmisión de la información de pulsos que son contabilizados de un medidor de agua instalado en un banco de pruebas con la finalidad de verificar el envío de datos hacia la plataforma *Backend Sigfox*.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de telemetría para medición de consumo de agua son conceptos aún nuevos en nuestro país y en la actualidad están acaparando el interés⁵⁷ de las principales empresas prestadoras de servicio de saneamiento llamadas también EPS's, como por ejemplo SEDAPAL en Lima o SEDAM en Huancayo, por mencionar algunos.

Por ello surge la necesidad de desarrollar sistemas electrónicos de baja potencia que permitan realizar una medición remota del consumo de agua, mediante el cual EPS's puedan mejorar sus procesos internos de gestión y facturación de sus usuarios finales. En la actualidad se manejan procesos de toma de lecturas de los medidores de agua de forma manual, en donde surgen imprecisiones causadas por error humano que llegan a ser del 8%.

¹ Se propone el diseño de un sistema electrónico de baja potencia con comunicación "LPWAN" de las siglas (*Low power wide area network*) empleando la red 0G de Sigfox en las instalaciones de la empresa TECA PERU S.A.C. Una empresa peruana del rubro de servicios de telecomunicaciones, con el fin de agregar a su cartera comercial este nuevo servicio denominado "Telemetría para⁴⁴ medición de consumo de agua", orientada a los requerimientos de las principales EPS's del país.

Este trabajo de suficiencia tiene por finalidad cubrir las necesidades en cuanto al diseño del sistema electrónico con autonomía en operación continua de 3 años, que permita⁴³ la adquisición de las señales provenientes de los medidores de agua con el estándar de salida de pulsos, además de realizar la transmisión inalámbrica de las mediciones empleando comunicación Sigfox.

CAPITULO I.

ASPECTOS GENERALES

1.1 CONTEXTO (EMPRESA)

El proyecto fue financiado con fondos privados propios, dentro del programa de incubación de empresas “Emprende UP” de la Universidad del Pacífico, del cual la empresa TECA PERU S.A.C forma parte.

1.2 DELIMITACIÓN DEL PROYECTO

1.2.1 Teórica

Consiste en la propuesta de diseño de un sistema electrónico de baja potencia empleando la comunicación Sigfox que permita obtener lecturas de consumo de agua de medidores con salida de pulsos para el sistema de monitoreo de la empresa TECA PERU SAC.

1.2.2 Temporal

La elaboración del presente trabajo comprende el periodo desde el mes de Abril del año 2020 hasta el mes de Marzo del año 2021 en la empresa TECA PERU SAC en Lima Perú.

1.2.3 Espacial

Las pruebas y diseños se realizan en las instalaciones de la empresa TECA PERU SAC ubicado en la Avenida Alberto Alexander 2244, Distrito de Lince, Lima-Perú.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general

Diseñar un sistema electrónico de baja potencia que permita la medición de consumo de agua de manera remota con autonomía de 3 años empleando comunicación Sigfox en la empresa TECA PERU S.A.C.

1.3.2 Objetivos específicos

Los objetivos específicos se formulan de la siguiente forma:

- O1. Analizar las diferentes características de los microcontroladores de baja potencia, MODEMS de radiocomunicación Sigfox, antenas y baterías a emplear para lograr una sostenibilidad de 1 a 3 años en la medición de consumo de agua.
- O2. Diseñar un circuito electrónico de baja potencia y elaborar los algoritmos para la adquisición de las señales provenientes de los medidores de agua con salida de pulsos.
- O3. Evaluar mediante mediciones físicas la autonomía del sistema electrónico y la transmisión inalámbrica de la información del consumo de agua.

MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES DEL ESTUDIO

2.1.1 Nacionales

Castillón (2020), en la tesis titulada: *Influencia de la automatización por telemetría en el sistema de bombeo de agua potable en la minera IRL – Corihuarmi, Yauyos – Lima 2018* cuyo objetivo consistió en evaluar la automatización por telemetría. En la investigación el autor evalúa los datos obtenidos por los flujómetros instalados en el sistema de bombeo en los periodos 2016-2018. En el cual se logró detectar el 86% en pérdidas hídricas que ocasionan costos operacionales que asciende a S/. 157,156.0 mil nuevos soles. El autor afirma que la magnitud del costo total es base fundamental para proponer alternativas para el control de pérdidas hídricas, siendo la más factible y económicamente viable la automatización por telemetría, con periodo de recuperación de la inversión en 14 meses generando un beneficio costo de 1.098.

Lindao (2018), en la tesis titulada: *Diseño y fabricación de prototipo de banco de pruebas portátil para medidores de agua potable*, cuyo objetivo consistió en construir un equipo prototipo para realizar las lecturas de medición de agua en un banco de pruebas en la misma planta para la EPS Grau, incorporó un sistema de adquisición y visualización de los datos en una pantalla LCD. Se emplea un medidor de flujo de 1/4 de pulgada con salida de señal de pulsos digitales basado en un sensor electrónico de efecto hall, la frecuencia de los pulsos digitales a la salida es proporcional al flujo de agua que atraviesa el medidor. El Autor concluye que el prototipo cumple con los requisitos establecidos por INACAL, máxima autoridad técnico normativo del Perú. Además recomienda reemplazar el microcontrolador Arduino por un sistema integrado de mayor calidad.

Romaní (2019), en la tesis titulada: *Diseño de un prototipo para el monitoreo del consumo eficiente de agua en una institución educativa*. Tuvo como objetivo desarrollar un prototipo medidor de agua que ayude en el monitoreo constante del consumo eficiente de agua en la institución educativa industrial Federico Villareal. El prototipo medidor se instaló en la tubería principal de la institución y un segundo prototipo se colocó que funciona como receptor de datos se colocó dentro de una caseta de control. El autor consideró el estudio de diferentes redes inalámbricas y

se optó en utilizar los dispositivos Xbee basados en el estándar ZigBee, por sus características de bajo costo y bajo consumo de energía, además de permitir lecturas en tiempo real. El autor destaca en la investigación la importancia de emplear poca energía para obtener una mayor autonomía energética.

2.1.2 Internacionales.

Fourtet, Ponsard (2020), en el artículo *An Introduction to Sigfox radio system* tuvo como objetivo explicar el uso de la tecnología de radiocomunicación Sigfox en la industria. El autor define a Sigfox como una red LPWAN, acrónimo de ²⁵ Low Power Wide Area Network, una red de baja potencia y largo alcance, enfocada a la conexión masiva de dispositivos de Internet de las cosas y aplicaciones M2M, con un bajo costo respecto a otro tipo de redes públicas como la red celular. El Autor concluye que la comunicación Sigfox es óptimo para aplicaciones donde los mensajes enviados sean cortos.

Díaz (2019), en la tesis titulada *Red de sensores intercomunicados bidireccionalmente usando tecnología Sigfox* tuvo como objetivo principal diseñar una red de sensores interconectados por módulos de comunicación Wisol SFM10R2 con el fin de enviar y analizar los datos obtenidos en la nube Backend Sigfox y redireccionarlos por medio de Callbacks hacia la Aplicación Ubidots. Se hizo uso del Software Proteus para las simulaciones electrónicas, además se hizo uso del microcontrolador PIC18F4550 programado con lenguaje C. El autor concluye indicando que logró realizar la implementación del circuito electrónico físicamente en una protoboard logrando una bajo consumo de energía.

Rubio (2019), en la tesis doctoral denominada *Contribución al desarrollo de sistemas de telelectura inteligente con IoT*. El autor tuvo como objetivo ⁹ diseñar, desplegar y verificar el correcto funcionamiento de una arquitectura de red mixta, basada en Sigfox y Lora. Como estudio previo propone ⁹ realizar un estudio de las tecnologías de comunicación disponibles en el mercado. Muestra que existen contadores de agua que ya incorporan sistemas de radiocomunicación Sigfox y Lora para la transmisión de las mediciones de forma remota. El autor concluye que Sigfox es ⁹ una tecnología para IoT asimismo es también un operador de red que proporciona una solución completa que va desde la recogida de datos procedente de objetos desde cualquier parte del mundo hasta el traspaso de dichos datos a los sistemas informáticos del cliente.

Hinojo (2019), en la Tesis Doctoral con título *Diseño de circuitos electrónicos de ultra-bajo consumo en tecnologías nanométricas* el autor tuvo como objetivo el estudio de los reguladores lineales de tipo *Low-DropOut* o LDO, dada la problemática de esta última década que demanda dispositivos electrónicos para internet de las cosas. Los principales aportes del autor son el diseño de un regulador LDO compensado y basado en la celda *Flipped Voltage Follower* o FVF y el uso de un seguidor de tensión tipo clase-AB con mejora en el Slew-rate lo que permite incrementar la respuesta transitoria sin aumentar el consumo quiescente. El autor concluye indicando que las tecnologías CMOS han permitido satisfacer 2 de las principales necesidades de la industria electrónica: La alta integración de sistemas en un solo chip denominados SOC's y la reducción del área de los circuitos y en las PCB's.

2.2 BASES TEÓRICAS

Las bases teóricas para el siguiente trabajo de suficiencia son los siguientes:

2.2.1 Circuitos electrónicos de baja potencia

Un circuito electrónico se define como la unión de uno o más elementos que al conectarse permiten el flujo de corriente eléctrica. Por el mecanismo de flujo de corriente eléctrica es posible controlar, modificar o tratar una señal eléctrica normalmente corriente continua. En 1948 con la invención del transistor bipolar basado en el uso de semiconductores supuso una auténtica revolución que unido al desarrollo de los sistemas integrados en 1959 y desarrollo posterior de microprocesadores dieron origen a la informática. (Roch, 2020)

La microelectrónica ha permitido la miniaturización y ha dado origen a los microchips los cuales han ido evolucionando, permitiendo la integración millones de transistores, la alta integración ha permitido reducir el consumo de energía de los circuitos y aumentar sus capacidades. Hoy se habla de SOC's o sistemas en chips, que incluyen etapas analógicas, CPU's, periféricos de comunicaciones, etapas de radiofrecuencia, etc. todos en un mismo chip. En la figura 1 se muestra la estructura interna de los microchips comúnmente para bajo consumo.

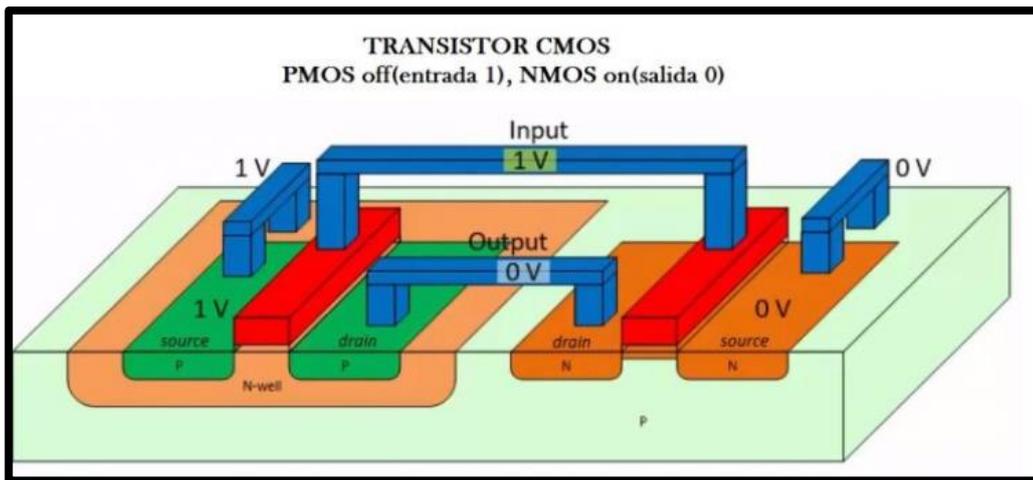


Figura 1 Estructura de un circuito lógico CMOS. Empleado muy comúnmente en circuitos lógicos de bajo consumo.
Fuente: (Roch, 2020)

En el panorama actual, los dispositivos alimentados por baterías están teniendo cada vez más relevancia, un claro ejemplo es el Internet de las Cosas. Por su parte este auge se ha visto reflejado en la necesidad de fabricación de circuitos integrados de bajo consumo. Los circuitos de baja potencia se ocupan de reducir la disipación de potencia y los circuitos integrados utilizando varias técnicas. Se emplean solo funciones específicas limitando la velocidad de operación al mínimo.

El empleo de los circuitos basados en CMOS, transistores complementarios de óxido metálico, permite reducir el consumo de energía estática o quiescente. La tecnología CMOS ha permitido también reducir los voltajes de operación lo que conduce también a una gran reducción de consumo de energía ya que el consumo de energía es proporcional al voltaje y la corriente, y en el caso de la tecnología CMOS la lógica es controlada por solo voltaje. Una baja demanda energética implica que se pueda utilizar una batería más pequeña, que esta no deba ser reemplazada. (Roch, 2020)

2.2.2 Reguladores de voltaje LDO

Reguladores de baja caída o *Low Dropout*, son reguladores de tipo lineal que regulan el voltaje cuando la alimentación está muy cerca del voltaje de salida. La principal ventaja de usar un transistor de este tipo radica en que la tensión de dropout, puede ser tan baja como su voltaje de salida. Desde el punto de vista de los dispositivos operados por baterías, el uso de un transistor PMOS Permite un

mayor aprovechamiento de la batería, al disponer de un mayor rango de operación.
(Hinojo, 2016)

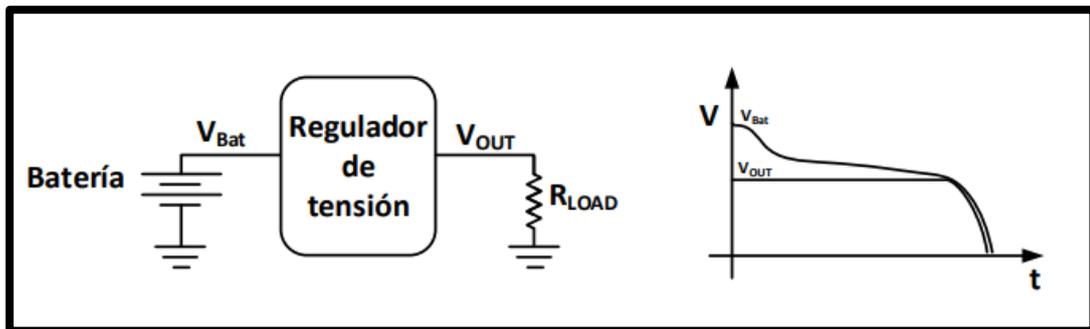


Figura 2 Representación de la curva de descarga de una batería para una carga R_{LOAD} y la respuesta de un regulador de voltaje
Fuente: (Hinojo, 2016)

La desventaja de los reguladores de tipo *LDO* es de no ser capaces de suministrar suficiente corriente más allá de 1 amperio. Son ideales para aplicaciones de bajas potencia, se adecua bien en aplicaciones de circuitos que funcionan con baterías. Los reguladores *LDO* están basados en la tecnología P-MOS. Generalmente un *LDO* tiene una entrada de voltaje, habilitación, tierra y voltaje de salida.

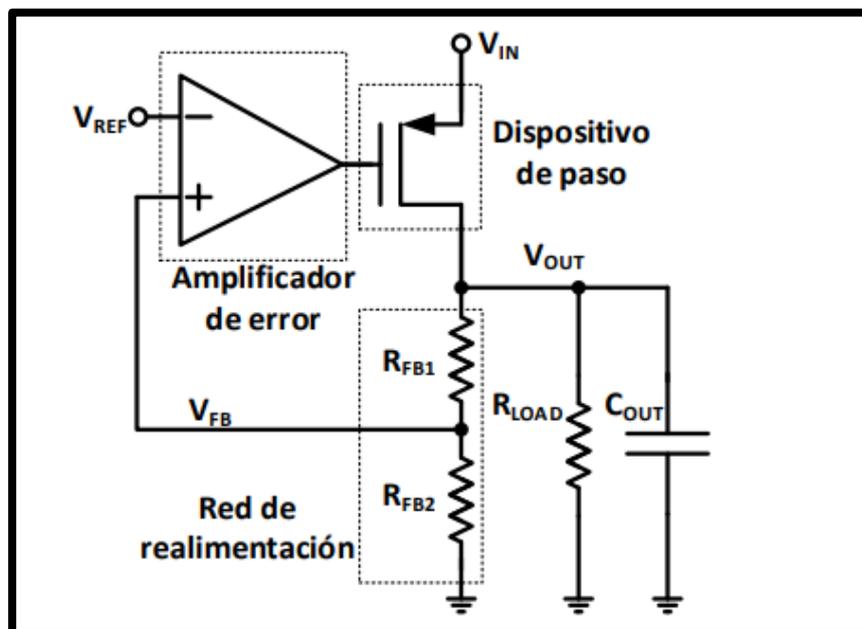


Figura 3 Estructura interna de un regulador LDO con Transistor PMOS.
Fuente: (Hinojo, 2016)

a. Corriente de reposo o *Quiescent Current*

Corriente de consumo en reposo, es la corriente consumida por el circuito interno de un regulador LDO. La corriente de reposo se define como la corriente que fluye desde el terminal GND. Los valores de este tipo de regulares suelen ser muy bajos lo que favorece el ahorro de energía en aplicaciones que operan con baterías (Toshiba, s.f.).

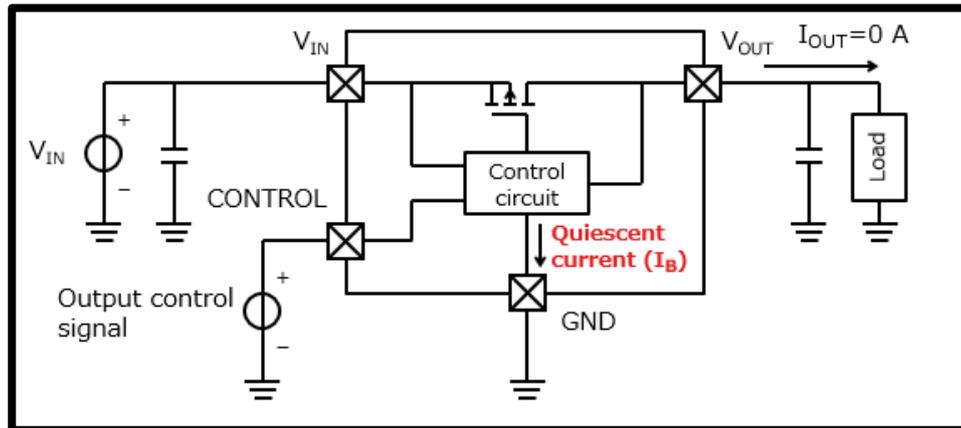


Figura 4 Corriente de reposo de un regulador LDO.
Fuente: (Toshiba, s.f.)

Los reguladores LDO funcionan de manera similar a los reguladores lineales, la principal diferencia es su topología esquemática. En lugar de una topología de seguidor de emisor, los reguladores LDO consisten en un colector abierto, donde el transistor puede saturarse fácilmente con voltajes disponibles para el regulador. Esto permite que la caída de voltaje no regulado a voltaje regulado sea tan bajo como de 0.2 a 0.4 voltios e regla general.

2.2.3 Microcontroladores de ultra baja potencia

El término *Ultra-Low power (ULP)* o ultra baja potencia describe un importante desafío de diseño de los microcontroladores, donde las expectativas del producto van desde funcionar por 10 años con una sola batería, hasta recolectar energía del medio ambiente y reducir la demanda global de energía. (eembc, 2012)

Los proveedores de microcontroladores implementan técnicas de diseño creativas para reducir las demandas de energía de un dispositivo en sus diferentes modos de funcionamiento, como el sueño profundo, la transferencia de datos periféricos y la computación activa. Los desarrolladores no solo pueden confiar en

un solo número de hojas de datos para explicar los beneficios de estas técnicas porque las aplicaciones requieren compensaciones de optimización entre las tres demandas de energía y el rendimiento. (eembc, 2012)

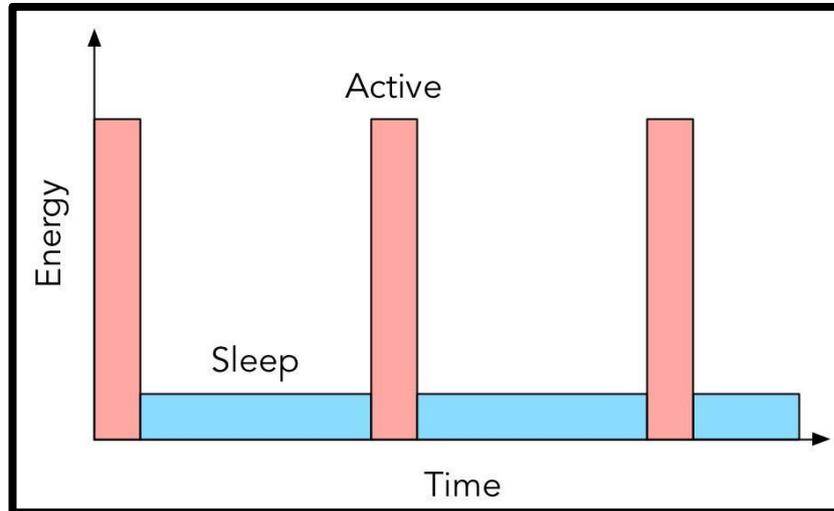


Figura 5 Modos de operación de un microcontrolador ULP con respecto a la energía que demanda.

Fuente: (eembc, 2012)

Donde el consumo de energía del dispositivo microcontrolador basado en circuitos CMOS se puede calcular a partir de la ecuación (1):

$$P_{total} = P_{sleep} + P_{active} \quad (1)$$

Además se obtiene la ecuación (2).

$$P_{total} = V_{sleep} * I_{sleep} + V_{active} * I_{active} \quad (2)$$

La corriente activa es la que se consume como resultado del procesamiento de la información de la MCU o de la ejecución del código y la corriente de reposo que está presente incluso cuando el dispositivo no está activo. Esto último es en gran parte el resultado de las diversas corrientes de fuga que son inherentes a cualquier dispositivo de silicio que utilice uniones PN para funcionar. Una buena tecnología de proceso minimizará esto, pero nunca lo irradiará por completo. (eembc, 2012)

Parámetros que afectan el consumo de energía en un microcontrolador:

- Velocidad de conmutación, se consume una pequeña corriente de fuga cuando las compuertas *CMOS* intercambian su estado de 1 a 0 o viceversa (transición)
- Cantidad de compuertas *CMOS*, cuanto más puertas y transistores *CMOS* incorpore el chip mayor tenderá a ser su consumo de energía. Esto explica porque los microcontroladores de 32 bits generalmente consumirán más energía activa que un microcontrolador de 8 bits.
- Tensión de funcionamiento, El voltaje de operación del microcontrolador afectará el consumo de corriente de un dispositivo. Cuanto mayor sea la tensión de funcionamiento, mayor será su consumo.

2.2.4 Medidores de Agua y sus Componentes

a. Medidores de Agua

Los medidores de agua son instrumentos destinados a medir de forma continua, memorizar y visualizar el volumen de agua que pasa por el transductor de medición en condiciones de medición. Un medidor de agua incluye por lo menos un transductor de medición, una calculadora o relojería (incluyendo los dispositivos de ajuste o de correcciones si están presentes) y un dispositivo indicador. Estos tres dispositivos pueden encontrarse en cubiertas diferentes. (INACAL, 2018)

En la figura 6 se puede apreciar un medidor convencional instalado en una vivienda donde la única forma de acceder a las lecturas de consumo es mediante una inspección visual.

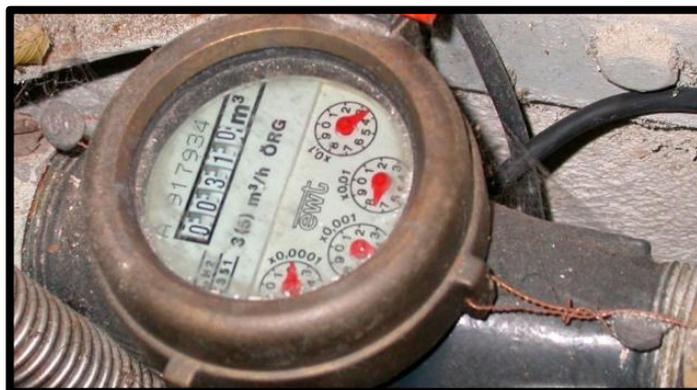


Figura 6 Medidores de agujas y tambores. Se aprecia los indicadores tradicionales como el consumo en volumétrico en m³.

Fuente: (Iagua, 2019)

b. Transductor

Es la parte del medidor que transforma el caudal o volumen de agua a medir en señales que se transmiten a la calculadora, e incluye el sensor. El Transductor de medición puede funcionar de manera autónoma o utilizar fuente de energía eléctrica externa y puede basarse en un principio mecánico, eléctrico o electrónico. (INACAL, 2018)

c. Sensor

Elemento de un medidor directamente afectado por la acción del fenómeno, cuerpo o sustancia portador de la magnitud a medir. En el caso de un medidor de agua, el sensor puede ser un disco, pistón, rueda, elemento de turbina, los electrodos de un medidor electromagnético u otro elemento. El elemento detecta el caudal o volumen de agua que pasa por el medidor, y se le denomina “sensor de flujo” o “sensor de volumen”. (INACAL, 2018)

d. Calculadora

Parte del medidor que transforma las señales de salida provenientes del (los) transductor (es) de medición y, posiblemente, de instrumentos de medición asociados, y, si es apropiado, almacena los resultados en la memoria hasta que se utilicen. El sistema de engranajes (relojería) de un medidor mecánico se considera como la calculadora de ese medidor. La calculadora puede estar provista de sistemas de comunicación, de emisión y de recepción en conjunto con los dispositivos auxiliares. (INACAL, 2018)

e. Dispositivo indicador

Parte del medidor que proporciona una indicación correspondiente al volumen de agua que pasa por el medidor. En el caso del medidor de agua es la caratula que muestra la información de medición. (I.N.A.C.A.L., 2018, pág. 3). En la figura 7 se puede identificar las diversas partes visuales del medidor de agua.



Figura 7 Partes del Medidor. Vista externa.
Fuente: (Maldonado, 2020)

Así mismo, en la figura 8 se puede apreciar una vista interna de un medidor seccionado, donde se encuentran la turbina.

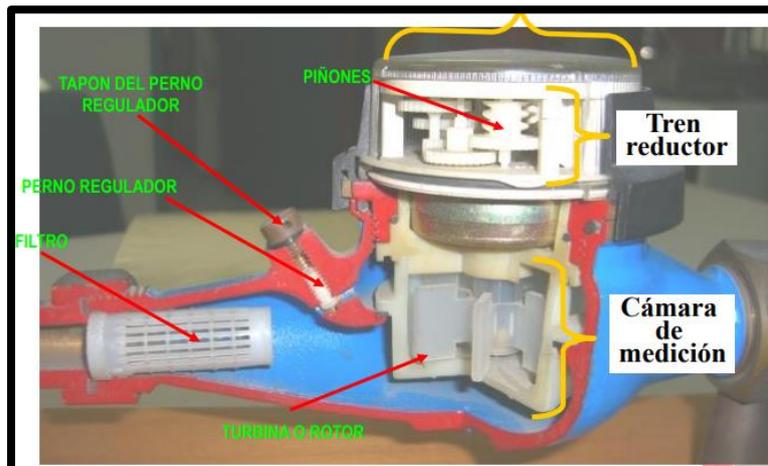


Figura 8 Partes del Vista Interna.
Fuente: (Maldonado, 2020)

f. Clasificación de los medidores

Los medidores se pueden clasificar por el tipo de lectura, es decir, en cómo van a mostrar la medición, se tienen los siguientes:

- Horizontales.
- De 45 grados de inclinación.
- Verticales.

- De medición remota, que cuentan con sistemas radiofrecuencia, señal de red móvil etc.

- Prepago, se recargan con un saldo por medio de una tarjeta de prepago.

También se pueden clasificar por el tipo de funcionamiento como los siguientes:

- ²³ Chorro múltiple

- Chorro único

- Concéntrico

- Volumétrico

- Magnético

- Chorro Múltiple

- Combinado

- Woltmann Horizontal

- Woltmann vertical

- Electromagnético

²⁴ El movimiento de giro de la turbina se transmite a través de un imán propulsor, dentro de la relojería existe otro imán que lo sigue. La turbina gira y este movimiento se transmite a la relojería. ⁴¹ En la figura 9 se muestra los diferentes tipos de medidores. (Maldonado, 2020)



Figura 9 Clasificación de los medidores.
Fuente: (Maldonado, 2020)

g. Diferencia entre tipos de medidores

Las diferencias entre los tipos de medidores se dan en función de su construcción, precisión y vida útiles es así que en la tabla 1 se pueden apreciar estas características.

Tabla 1

Tabla de características entre tipos de medidores

CARACTERÍSTICAS	CHORRO ÚNICO	CHORRO MÚLTIPLE	VOLUMÉTRICO
Resistencia al flujo de agua	Menor resistencia, Usan zonas con presiones inferiores a 0,5 BAR.	Mayor resistencia que chorro único. Zonas con presión mayor a 0,5 BAR.	Mayor pérdida que chorro múltiple. Zonas con presión mayor a 1 BAR.
Inicio de funcionamiento	Desde 6L/H.	Desde 10L/H.	Desde 2L/H.
Partículas en el agua	Hasta 2mm.	Hasta 1mm.	Hasta 0,1 mm.
Estabilidad de turbina	Desgaste con facilidad	Prolongada vida útil	No presenta turbina, no afecta el chorro
Vida útil	4 años.	5 años.	5 años.
Costo de medidor	Desde S/. 51,03	Desde S/. 55,15	Desde S/. 165

Nota. Datos de la característica y diferencias entre los tipos de medidores más empleados (Fuente: Elaboración propia). Información extraída de presentación en video de Maldonado

h. Medidores con salida de pulsos

Los medidores de fabricación más reciente cuentan con la característica de transmitir información en forma de pulsos. Una salida de pulsos sirve para proporcionar información de la cantidad de líquido que pasa a través del medidor, es decir, del volumen. La cantidad de pulsos es convertida a unidad de medida por una constante o factor que especifica el fabricante por cada modelo de medidor. Así dichos pulsos se convierten a una cantidad cómoda para cuantificar (por ejemplo 1 pulso/Litro). La ventaja de esta señal electrónica que produce el medidor es que puede ser leído por un microcontrolador o cualquier sistema computacional que contenga entradas digitales o GPIO's. La Salida de pulsos permite una tele-lectura de la medición de consumo de agua. En la figura 10 se muestra un medidor con salida de pulsos convencional. (Emi Water Meter, 2019)



Figura 10 Medidor de agua con salida de pulsos.
Fuente: (Emi Water Meter, 2019)

La salida de pulsos de es producida por un simple interruptor de lámina de contacto seco *SPST*, también conocido como *Reed Switch*. El interruptor normalmente está abierto y se cierra cuando el imán está lo suficientemente cerca como para tirar de la lengüeta a la posición cerrada. El imán se coloca en un dial (o tambor en algunos casos) que gira debido al flujo de agua. Cuando el imán se aleja lo suficiente, se suelta y se abre el interruptor. El cierre y la apertura de este interruptor es un solo "Pulso". (Assured Automation, 2017)

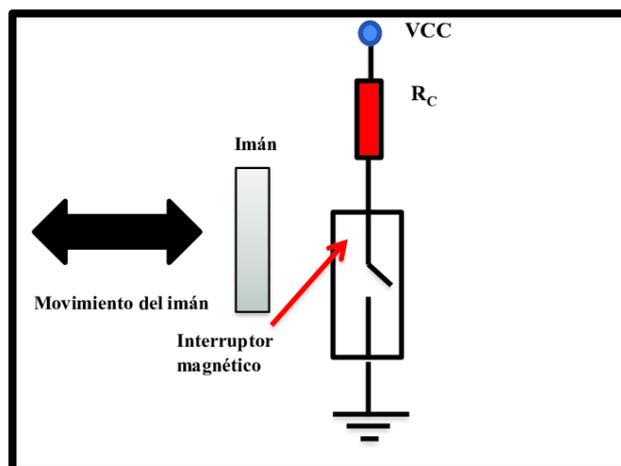


Figura 11 Salida de pulsos. Producido por un interruptor magnético.
Fuente: (Research Gate, 2018)

Los medidores de agua que pueden usar interruptores de salida de pulsos tienen un imán conectado permanentemente a un cuadrante o tambor que se encuentra

dentro del medidor. El interruptor de salida de pulsos más común se conecta a la lente del registro del medidor, directamente sobre un dial que tiene el imán adjunto.

Los interruptores se fijan con un solo tornillo y tienen una forma especial para que solo se puedan instalar de la manera correcta, en alineación exacta. Ciertos medidores permiten elegir qué dial usar para la salida de pulsos, determinando así el volumen de agua representado por un pulso. También hay interruptores de lengüeta dobles disponibles que pulsan dos veces por revolución en lugar de una vez. (Assured Automation, 2017).

La figura 10 ilustra una señal de salida de pulsos. Cada pulso se caracteriza por una amplitud y una T_{high} y T_{low} . T_{high} es la duración del pulso y T_{low} es en cualquier momento entre dos pulsos. Hay diferentes tipos de pulsos.

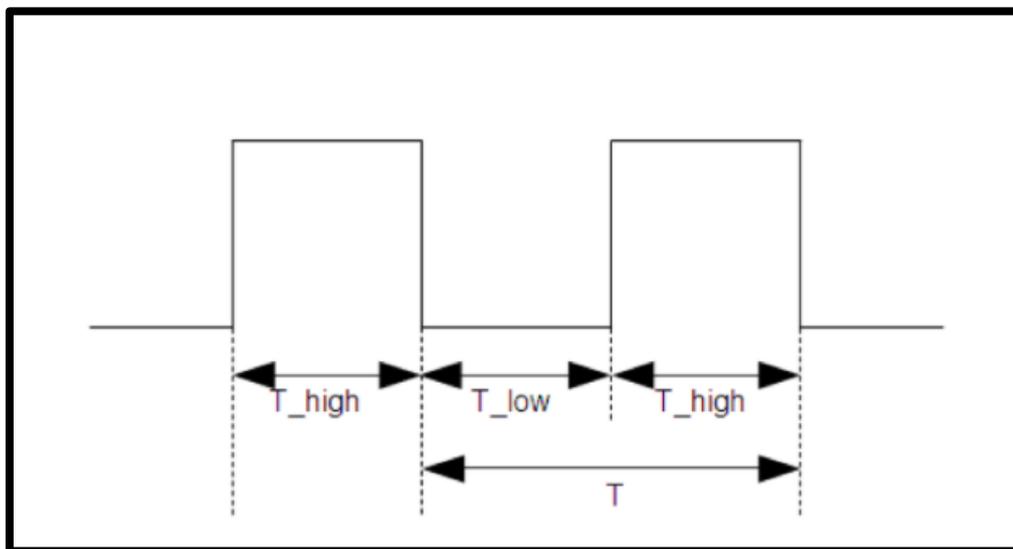


Figura 12 Señal de pulsos. Existe un tiempo de duración en estado alto como en estado bajo.
Fuente: (ThingsLog, 2019)

2.2.5 Antenas

Una antena es un transductor capaz de emitir o captar ondas electromagnéticas, poseen un comportamiento pasivo, en consecuencia, no pueden amplificar ni agregar potencia. Las antenas son emisoras y receptoras.

Para emitir, las antenas deben recibir las señales eléctricas de radiofrecuencia provista por el amplificador de potencia, la antena convierte esta señal eléctrica y la irradia en forma de señal electromagnética hacia el medio. Para recibir, las antenas convierten las señales electromagnéticas captadas por su estructura metálica y las convierte a señales eléctricas que el amplificador puede captar, la capacidad para captar estas señales está determinado por su sensibilidad.

a. Ganancia

La ganancia se mide en decibelios (dB). Esta medida representa la relación entre la potencia de la antena emisora y el campo donde se emite la señal de radio. Existe la ganancia isotrópica, que se conoce también como ganancia absoluta. Esta ganancia se aplica a la antena de referencia cuando es una isotrópica aislada en el espacio, las unidades se dan en dBi.

La ganancia en relación al dipolo, es una referencia de medida de media onda aislado en el espacio cuyo plano ecuatorial tiene la dirección dada. Las unidades se dan en dB o dBd. La relación de una antena medida en dB y dBd se muestra en la ecuación (3):

$$dB = dBi - 2.14 \quad (3)$$

b. Línea de vista (LoS)

La línea de vista es el camino sin obstáculos que se encuentra entre la antena de emisión y recepción. Para la existencia de una mejor propagación de las señales de radiofrecuencia, es necesaria una LoS sin objetos externos que impidan la recepción de las señales que son emitidas. Para lograr esta condición es necesario instalar los dispositivos de comunicación en lugares donde la inexistencia de objetos irruptores sea necesaria.

c. Zona de Fresnel

La zona de Fresnel es el área elipsoidal alrededor de la línea de vista. Esta zona ocupa una gran importancia en la recepción de las líneas de radiofrecuencia, debido a que define un campo en el que puede introducirse una serie de interferencias, lo que determinará el bloqueo de la señal emitida. Generalmente, las colinas, los árboles y edificios pueden convertirse en interferencias, estas pueden difractar o reflejar la señal principal lejos de la antena receptora, lo cual causa degradación o pérdida completa en la comunicación.

2.2.6 Telemetría

La telemetría es una de las áreas de la ingeniería que está orientada a la medición de cualquier tipo de cantidad física, utilizando interfaces electrónicas que conectadas a través de alguna línea de transmisión ya sea un medio guiado o no guiado permitiendo enviar la información a un centro de gestión. Debido a la telemetría, la tele gestión es posible en los procesos industriales porque a partir de

estos datos transmitidos se puede realizar un procesamiento adecuado para obtener modelos estadísticos de comportamiento del sistema, y según el análisis de toda la información, los procesos van mejorando cada vez más y esto conlleva a un mejoramiento continuo dentro de la compañía que posea un sistema de telemetría y tele gestión de distintas variables para cualquier proceso industrial. (Herrera, 2006).

La telemetría aplicada a la medición de agua es la parte encargada de realizar las mediciones mediante sensores. Se pueden utilizar diferentes tipos de sensores como las salidas de pulsos para medir parámetros o monitorizarlos a distancia. Con el advenimiento de IoT la telemetría ha evolucionado, ahora es posible monitorear desde Internet.

1 2.2.7 Redes LPWAN

Las redes LPWAN de las siglas en inglés, *Low Power Wide Area Network* o *Redes de Baja Potencia y Largo Alcance*, son tecnologías inalámbricas que han aparecido en los últimos años y son considerados como las redes para IoT. Estas redes surgen de la necesidad de interconectar dispositivos con un bajo consumo de energía, además de permitir una gran autonomía de funcionamiento por años, típicamente 5 años con pilas.

Las redes LPWAN permiten emitir mensajes cortos de unos cuantos bytes bidireccionalmente a grandes distancias, típicamente mayores a los 10 KM de radio. Cabe destacar que estas redes son de un costo mucho menor respecto a redes de telefonía Móvil. Además estas redes habilitan un gran número de aplicaciones donde no es posible depender de fuentes de energía como energía de red pública, o fuentes de energía renovables como paneles solares, teniendo aplicaciones en telemetría para medidores de Agua, Gas, Energía, maduración de concreto, etc.

No obstante, las redes LPWAN no se adecuan a casos donde se deban emitir grandes cantidades de mensajes de manera continua o realizar tele-control en tiempo real, la alta latencia que presentan estas redes son muy altas. Están dedicadas a los equipos de bajo consumo con capacidad de memoria y potencia de cálculo limitada en la figura 13 se muestra una comparación entre tecnologías inalámbricas.

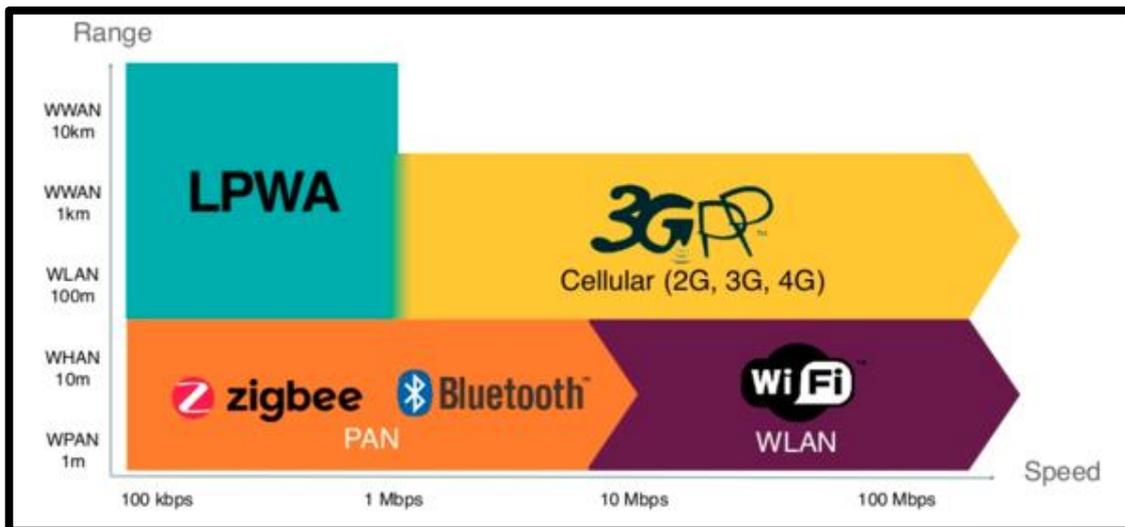


Figura 13 Comparación entre redes convencionales y redes LPWAN.
Fuente: (Silex technology, 2020)

Las redes LPWAN pueden clasificarse en 2 tipos. Las que emplean bandas licenciadas, como SIGFOX Y LORA. Y las que emplean bandas licenciadas tenemos a LTE-M y NB-IOT también denominado celular IoT.

a. Sigfox

Es la empresa pionera en cobertura inalámbrica para internet de las cosas, fue fundada Francia en 2009. Es la mayor proveedora de redes IoT en todo el mundo presente actualmente en 72 países que incluye América Latina y Perú. Sigfox destaca por su modelo comercial maduro y costos reducidos en cuanto a conectividad respecto a las demás tecnologías. Sigfox cuenta con una red propia interoperable entre todos los países por lo que existe un roaming nativo. La tecnología inalámbrica de Sigfox se destaca por su bajo consumo de energía, alta escalabilidad, una estación base puede llegar a interconectar hasta 1 millos de dispositivos.

Es además la red inalámbrica que logra mayor alcance, típicamente 25 Km de radio en condiciones normales y hasta 100Km en línea de vista directa. La tecnología de Sigfox se adapta muy bien a la legislación de los países, dada que sus bandas de uso son estandarizadas y bien definida para todas sus soluciones de módulos y dispositivos. La tecnología Sigfox se adecua muy bien a casos de uso donde se tenga que emplear sensores transmitiendo información por muchos años con poca frecuencia de envío y estos puedan mantenerse operativos hasta

los 15 años, en ese sentido se pueden adaptar muy bien a la telemetría para medidores de agua.

Otro Punto para destacar de Sigfox es que su tecnología es muy robusta a interferencias radioeléctricas y a ataques de “Jammers” teniendo mucha aceptación en uso de seguridad y logística.

b. Red 0G Sigfox.

La red 0G *Zero-G* es una alternativa de red para telemetría IoT donde no se requieren transmitir grandes volúmenes de datos de forma frecuente. Es sencilla, de bajo consumo, largo alcance y principalmente de bajo costo. La tecnología de red 0G es impulsada por Sigfox y tiene usos en IoT industrial, logística, seguridad, gestión de instalaciones, monitorización de activos, medidores de agua, etc.

Características de la red 0G Sigfox:

- Red dedicada confiable y segura para conectar “Cosas”.
- Capacidad de millones de mensajes por hora.
- Muy resistente a las interferencias eléctricas y a “Jammers” o bloqueadores GSM/3G/4G.
- Energía extremadamente baja.
- Los dispositivos conectados a su red puede operar con pilas AA por Años.
- Chipsets de bajo costo.
- Soporta mensajes unidireccionales y bidireccionales.
- Limitado a mensaje muy pequeños.
- Una estación base tienen un alcance de 25 KM de radio.
- Empleo de bandas no licenciadas.

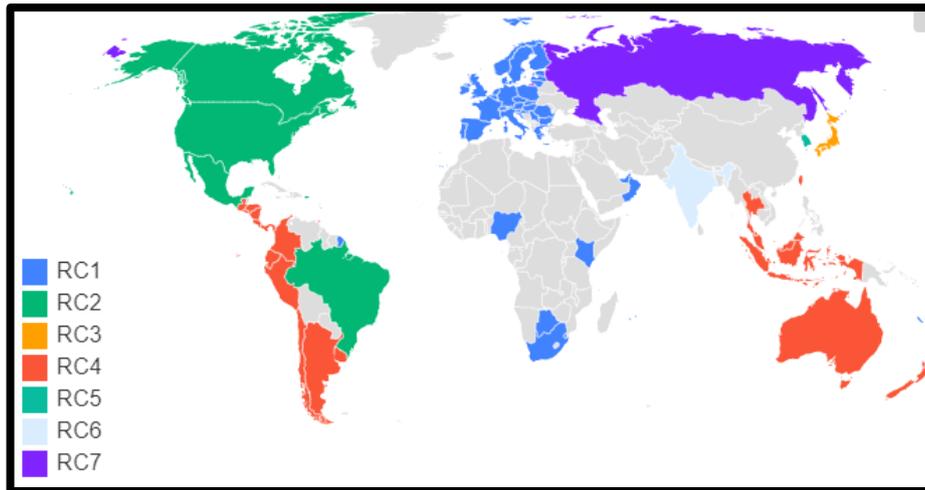


Figura 14 Países cubiertos por la red OG Sigfox.
Fuente: (Sigfox, s.f.)

11 Sigfox tienen una red con cobertura global, que opera en bandas sin licencia, con frecuencias de radio que van desde los 862 a 928 MHz. El uso de bandas no licenciadas permite a los dispositivos enviar datos a la nube con poca energía y a un costo muy bajo. Sin embargo, debido a regulaciones, leyes u otras restricciones operativas locales la configuración de la red puede diferir de un país a otro. Las operaciones globales se dividen actualmente en siete zonas geográficas o radio configuraciones “RC” que van desde RC1 a RC7. (Sigfox, s.f.)

En Perú se emplea la zona RC4, con frecuencias que van desde 920 a 922 MHz. En la figura 15 se comparan las diferentes regiones donde opera Sigfox.

	RC1	RC2	RC3	RC4	RC5	RC6	RC7
Frecuencia central de enlace ascendente (MHz)	868.130	902.200	923.200	920.800	923.300	865.200	868.800
Frecuencia central de enlace descendente (MHz)	869.525	905.200	922.200	922.300	922.300	866.300	869.100
Velocidad de datos de enlace ascendente (bit / s)	100	600	100	600	100	100	100
Velocidad de datos de enlace descendente (bit / s)	600	600	600	600	600	600	600
EIRP recomendado por Sigfox (dBm)	dieciséis	24	dieciséis	24	14	dieciséis	dieciséis
Detalles específicos	Ciclo de trabajo 1% *	Salto de frecuencia **	Escuche antes de hablar ***	Salto de frecuencia **	Escuche antes de hablar ***		Ciclo de trabajo 1% *

Figura 15 Detalles técnicos de los RC.
Fuente: (Sigfox, s.f.)

c. Ultra Narrow Band (UNB)

La tecnología de Sigfox utiliza canales de RF estrechos, esto proporciona una alta sensibilidad del receptor y un rango extendido, con velocidades de bits muy bajas, 100 o 600 bps dependiendo de la región de operación. Los sistemas UNB usan un canal de banda estrecha para cada transmisión por separado: uplink (UL) o downlink (DL) y el espectro que se utiliza permite que transmisiones múltiples UL y DL. En una transmisión típica se realizan 3 envíos redundantes en diferentes ventanas de tiempo y diferentes canales en frecuencias aleatorias tal como se muestra en la figura 16.

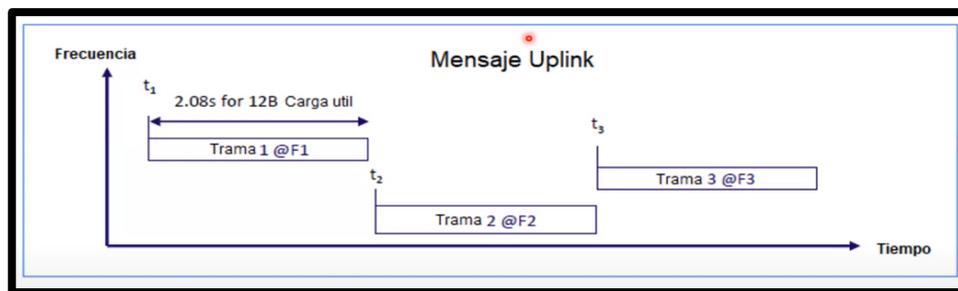


Figura 16 Mensaje Uplink Sigfox.
Fuente: (Sigfox, s.f.)

Las redes Sigfox operan a un enlace ascendente de 100 bps con un límite de carga útil de 12 bytes y utilizan bandas ICM (Industriales científicas y médicas). Además, los dispositivos finales están limitados por las legislaciones Europeas en la cantidad de transmisiones que pueden hacer por día de 144 veces, estas legislaciones no aplican a América. Sigfox ha introducido una comunicación bidireccional básica para atacar las demandas del mercado a su oferta unidireccional. Esta tecnología está utilizando 192kHz de la banda pública disponible para el intercambio de mensajes a través del aire como se muestra en la figura 17.

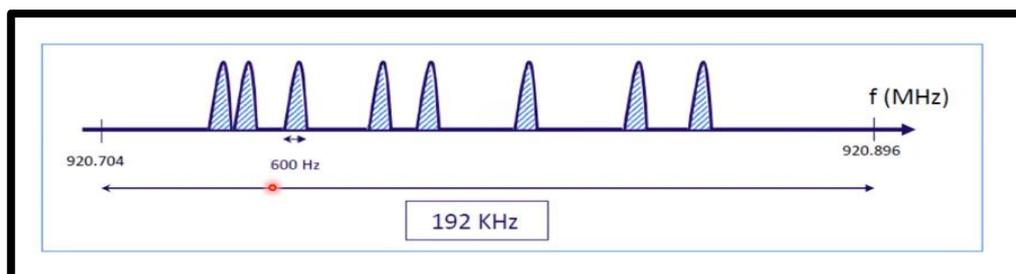


Figura 17 Tecnología UNB de Sigfox. Presenta 54 micro canales de acceso aleatorio en un rango de 192KHz.
Fuente: (Sigfox, s.f.)

d. Escalabilidad

Sigfox es una red altamente escalable, donde se pueden llegar a conectar millones de dispositivos. Esto es debido gracias a la suma de tres factores como:

- **Ultra narrow Band**, permite gran resistencia frente a las interferencias además del alcance elevado.
- **Acceso aleatorio**, el hecho de que los canales se elijan aleatoriamente ayuda en gran medida evitar colisiones.
- **Reparto espacial**, los dispositivos están colocados en lugares separados entre sí, donde las antenas que pueden recibir los mensajes son muchas veces distintas. Esto aporta mucha robustez al sistema.

2.2.8 MODEM Sigfox

Los MODEM (modulador demodulador) son dispositivos electrónicos que convierten señales digitales en analógicas y viceversa, estos dispositivos transmiten y reciben datos de forma inalámbrica. Los MODEM para IoT transfieren bytes de datos de un formato a otro. A diferencia de las puertas de enlace o Gateways, los MODEMS nunca requieren actualizaciones de firmware. Hoy en día los módems de comunicaciones IoT funcionan de forma estandarizada, por un lado pueden comunicarse por medio de bus Serial (UART) con los microcontroladores empleando una sintaxis de comandos denominado AT.

El MODEM SFM10R4 de fabricante Wisol (Actualmente actualizo su nombre a Seong Ji) es de origen Coreano y es además uno de los más populares en Latinoamérica para las comunicaciones con Sigfox, es de ultra bajo consumo y bajo costo. Tiene un tamaño de 13.0x20x2.3 mm de tamaño en la figura 18 se muestra su encapsulado.



Figura 18 Modem SFM10R4.
 Fuente: (Seong Ji Industrial CO., LTD, s.f.)

El MODEM SFM10R4 está basado en el chipset del fabricante On Semiconductor AX-SFUS-1-01. Puede transmitir mensajes (Uplink) y recibir mensajes (Downlink) incluye un sensor de temperatura y voltaje de batería. En la transmisión emplea la modulación DBPSK en la frecuencia de 922.3 MHz con una potencia de 22dBm y en la recepción emplea GFSK en la frecuencia de 922.3 MHz con una sensibilidad máxima de -129 DBm. (FCC ID, 2017)

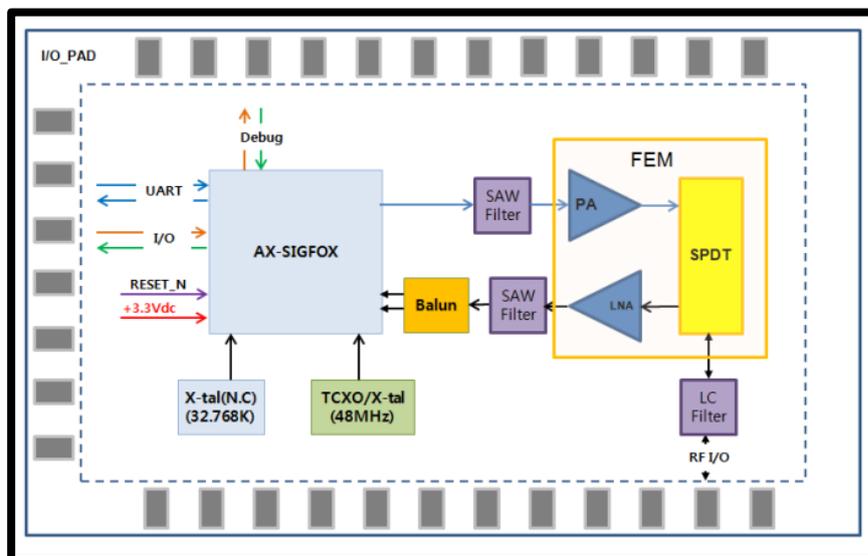


Figura 19 Diagrama de bloques interno del modem SFM10R4.
 Fuente: (Seong Ji Industrial Co., LTD, s.f.)

Tabla 2

Lista de características del MODEM SFM10R4

Características	Descripción
Voltaje de operación	Desde 2.7 a 3.6 Voltios
Corriente en transmisión	200mA
Corriente en recepción	32mA
Corriente en modo suspensión	2.5uA
Potencia de transmisión	22.5 dBm
Frecuencia en transmisión	920.8 MHz
Sensibilidad de recepción	129 dBm
Frecuencia de recepción	922.3 MHz
Modulación	DBPSK, GFSK
Velocidad de transmisión	600bps
Temperatura de operación	-30 a 85 °C

Fuente: Elaboración propia, datos recopilados de hojas de datos de fabricante Seong Ji.

2.2.9 Comandos AT

Proviene de la palabra “Attention” o atención, es un lenguaje que fue desarrollado por la compañía Hayes Communication en 1977, el cual hoy es un estándar abierto empleado por los fabricantes de módems para IoT. La sintaxis suele empezar con las letras “AT” y seguida de una acción que se encuentra definida en el set de instrucciones del fabricante del modem. Los modems procesan esta información, ejecutan la orden y devuelven un resultado y un mensaje como “OK”. Los MODEM SFM10R4 adoptan esta sintaxis con ligeras variaciones adaptadas a las necesidades de la comunicación Sigfox. Algunos de los principales comandos utilizados con el modem se describen en la siguiente tabla.

Tabla 3

Lista de comando AT MODEM SFM10R4.

Comando	Descripción
AT	Comando básico, responde “OK”.
AT\$I=10	Devuelve el ID del modem.
AT\$=11	Devuelve el PAC del modem.
AT\$GI?	Configuración y estado actual del canal de macros de frecuencia portadora.
AT\$RC	Restablecimiento de FCC en los canales predeterminados Sigfox.
AT\$SF=[frame hex]	Comando para enviar datos en formato hexadecimal hasta un máximo de 12 bytes.
AT\$V?	Retorna el voltaje con el cual el modem es alimentado en milivoltios mV.
AT\$T?	Retorna la temperatura del modem.
AT\$P=2	Enviar a modo Deep sleep al modem.

Fuente: Elaboración propia, comandos extraídos de hoja de datos de Seong Ji.

2.2.10 Compilador PIC C

Es un software desarrollado por la empresa Custom Computer Services, Inc (CSS), Es una empresa pionera fundada en 1992 que lanzo un compilador en lenguaje C para microcontroladores PIC MCU cuando la mayoría de veces se solían programarse en lenguaje ensamblador. Actualmente la compañía sigue suministrando actualizaciones del compilador para las familias más recientes de microcontroladores PIC.

El compilador PIC C tiene como característica la facilidad de uso y rápido aprendizaje para programadores menos experimentados

Características del compilador:

- Portabilidad de código entre todos los dispositivos PIC.
- Mínimo tiempo de desarrollo con controladores periféricos y construcción C estándar.
- Flujos de entrada / salida estilo C++ con formato de datos completo para cualquier dispositivo o para cadenas.
- Librerías CSS y códigos sin derechos de autor
- Funciones convenientes #bit y #byte que permiten colocar variables C en direcciones absolutas.
- Administración de interrupciones de forma fácil.

El compilador PIC C está diseñado específicamente para microcontroladores PIC, a diferencia de otros compiladores basados en GNU o motor común con un generador de código genérico. El compilador incluye construcciones estándar C y numerosas funciones de preprocesador y la biblioteca más grande de funciones integradas además de cumplir con el estándar ANSI C con optimización de nivel profesional.

2.2.11 Software Proteus

Proteus es un software desarrollado por la compañía Labcenter que combina la facilidad de uso con un conjunto de funciones que permite el diseño, pruebas y disposición de diseño de placas de circuito impreso profesionales.

Este software se compone en los siguientes módulos:

ISIS: es el encargado de realizar el modelo esquemático del circuito, para ello cuenta con una librería de más de 6,000 dispositivos analógicos, electromecánicos y digitales.

ARES: es el software de diseño de las tarjetas de circuito impreso (PCB) además que permite posicionar automáticamente los componentes, realizar auto ruteo de pistas y generar archivos de fabricación "Gerber".

PROSPICE: se encarga de la simulación de los circuitos y componentes electrónicos.

2 **uVSM:** permite simular el comportamiento de un microcontrolador de las familias PIC, AVR, ARM, entre otras. Solo se requiere cargar el archivo HEX y PROTEUS lo simula, además puede interactuar con diferentes periféricos.

49 2.2.12 Tecnología de Baterías

La batería es un dispositivo que almacena energía en forma electroquímica.

2 Existen dos tipos básicos de baterías:

- **Batería primaria:** su reacción electroquímica es irreversible, es decir, después de que la batería se ha descargado no puede volverse a cargar.
- **Batería secundaria:** su reacción electroquímica es reversible, es decir después de que la batería se ha descargado puede ser cargada inyectándole corriente continua desde una fuente externa.

4 En general el funcionamiento de una batería se basa en una celda electroquímica. Las celdas electroquímicas tienen dos electrodos: El Ánodo y el Cátodo. El ánodo se define como el electrodo en el que se lleva a cabo la oxidación (cede electrones) y el cátodo donde se efectúa la reducción (capta electrones). Los electrodos pueden ser de cualquier material que sea un conductor eléctrico, como metales o semiconductores. Para completar el circuito eléctrico, las disoluciones se conectan mediante un conductor por el que pasan los cationes y aniones, conocido como puente de sal (o como puente salino), para que se mantengan neutras. Los cationes disueltos se mueven hacia el Cátodo y los aniones hacia el Ánodo. La corriente eléctrica fluye del ánodo al cátodo porque existe una diferencia de potencial eléctrico entre ambos electrolitos. (Vergara, s.f.)

a. Características de una batería

7 Cantidad de Energía: está dada por el número de watt-hora (Wh) de la misma. La capacidad (C) de una batería de sostener un régimen de descarga está dada por el número de amperios-hora (Ah). Para una batería dada el número de Wh puede calcularse multiplicando el valor del voltaje nominal por el número de Ah.

Corriente máxima: El número de Ah de una batería es un valor que se deriva de un régimen de descarga especificado por el fabricante. Una batería, inicialmente cargada al 100%, es descargada, a corriente constante, hasta que la energía en la misma se reduce al 20% de su valor inicial. El valor de esa corriente de descarga, multiplicado por la duración de la prueba (20 horas es un valor típico), es el valor en Ah de esa batería. Si una batería tiene una capacidad (C) de 200 Ah para un tiempo de descarga de 20hrs, el valor de la corriente nominal es de 10A. Para eliminar ambigüedades algunos fabricantes especifican las baterías como un número fraccionario, por ejemplo para C=200Ah una de tipo C/20=10A quiere decir que la batería puede entregar 10A por 20 horas (Vergara, s.f.)

¹⁴ Profundidad de descarga (PD): representa la cantidad de energía que puede extraerse de una batería. Este valor está dado en forma porcentual. Si la batería del ejemplo entrega 600 Wh, la PD es del 50%. Cuando se efectúa la prueba para determinar la capacidad en Ah de una batería solar la PD alcanza el 80%

Los tipos de ⁴ baterías más usados son:

- Plomo-acido (Pb-acido)
- Nickel-cadmio (NiCd)
- Nickel-hidruro metálico (NiMH)
- Ion-Litio (Li-ion)
- Polimero-Litio (Li-poly)
- Aire-zinc
- Alcalinas

2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

- *AMI*: Infraestructura de medición avanzada. Son sistemas integrados de medidores, redes de comunicaciones y sistemas de gestión de datos.
- *AT*: Lenguaje para la comunicación con módems inalámbricos.
- *Baudio*: Unidad de velocidad de transmisión de informa digital sobre un canal de comunicaciones serial.
- *Circuito electrónico*: Es la interconexión de diversos componentes electrónicos en donde circula corriente eléctrica atreves de una trayectoria cerrada
- *EPS*: Empresas prestadoras de servicios. Son empresas ⁵² encargadas de suministrar los servicios de saneamiento básicos como agua potable y alcantarillado en una determinada región o ciudad.

- **IoT:** ⁴⁶ internet of Things o internet de las cosas, Es la interconexión de objetos físicos hacia internet con el fin de monitorearlos o controlarlos de manera remota.
- **ICM:** Bandas para uso industrial, científicas y médicas. Son Bandas de frecuencias en los cuales no se requieren licencias para emitir o recibir señales de radiofrecuencia. Estas bandas están normalizadas en todo el mundo y varían según las regiones. En Perú las bandas libres abarcan los 916 a 928 MHz.
- **LPWAN:** de sus siglas en inglés ¹ *Low Power Wide Area Network* o Redes de largo alcance y bajo consumo de energía, son redes especializadas para la comunicación de dispositivos de internet de las cosas
- **LDO:** Low dropout o reguladores de baja caída. Son un tipo de reguladores de voltaje lineal que se caracterizan por su regular voltajes muy cercanos a su salida, se suelen emplear en aplicaciones que operan con baterías.
- **MCU:** término referido a los microcontroladores de.
- **Medidor de agua:** Son instrumentos que permiten la medición volumétrica de consumo de agua potable, pueden encontrarse en diversos modelos formas y tamaños.
- **MODEM:** son moduladores demoduladores. Convierten señales digitales en analógicas y viceversa, se suelen emplear ¹⁰ para la transmisión y recepción inalámbrica de datos de datos.
- ¹⁹ **Monitoreo:** Es el proceso de recolectar, analizar y utilizar información para hacer seguimiento a determinados procesos con el fin de detectar defectos o anomalías.
- **0G:** Cero G o red 0G, es un estándar global de red para IoT desarrollado por Sigfox para transportar la información de objetos físicos desde la capa de radiofrecuencia hacia internet.
- ¹ **PCB:** *Printed circuit board* o placa de circuito impreso, ⁷⁰ es un soporte físico en el que se sueldan los componentes electrónicos que a través de las pistas grabadas en su superficie permite la interconexión.
- **Pulsos:** Es una señal que representa información mediante un código binario como puede ser 2 niveles de tensión como 0 y 1. ¹⁶ Un pulso es una onda que transporta una perturbación que dura un corto intervalo de tiempo.

- *Sigfox*: Compañía francesa creadora de ³⁷ la tecnología de modulación de banda ultra estrecha o UNB que tienen el mismo nombre. Sigfox opera su propia red denominada 0G, a través de Operadores Sigfox que son empresas de telecomunicaciones ubicadas en su propio país que se encargan del despliegue.
- *Reed Switch*: llamado también interruptor magnético. Es un interruptor que se activa por medio de un campo magnético.
- ¹⁹ *Telemetría*: Es un sistema de comunicación alámbrico o inalámbrico que permite recopilar datos en lugares remotos.
- *Ultra Narrow Band*: Es ³⁷ la tecnología de modulación de banda ultra estrecha, empleada en la comunicación Sigfox. Se caracteriza por permitir un largo alcance, bajo consumo de energía y una eficiencia espectral a expensas de sacrificar la velocidad de datos.

CAPITULO III.

DESARROLLO DEL TRABAJO PROFESIONAL

41 En el presente capítulo se describe el proceso del diseño del circuito electrónico de baja potencia con comunicación Sigfox realizado en la empresa TECA PERU S.A.C. para la 1 medición de consumo de agua que es propuesto para el presente trabajo de suficiencia 2 profesional.

3.1 DETERMINACIÓN Y ANÁLISIS DEL PROBLEMA

La determinación y análisis el problema es descrito de la siguiente manera:

3.1.1 Definición de la Problemática

En el país existen 12 empresas prestadoras de servicios de saneamiento (EPS) son, casi exclusivamente, empresas públicas de propiedad municipal. De acuerdo a la Ley Marco de la Gestión y Prestación de los Servicios de Saneamiento – D.Leg. 1280, las Municipalidades Provinciales son las responsables de la prestación de los servicios de saneamiento en el ámbito urbano a través de las EPS. En nuestro país existen 2 excepciones a esta regla: SEDAPAL y ATUSA.

(Diario Gestión, 2017). Estas empresas requieren de nuevas soluciones tecnológicas que les permitan recopilar 1 la información del consumo de agua de medidores domésticos de manera remota. Generalmente estas empresas subcontratan a empresas privadas 1 para la medición manual de consumo de agua de los hogares del país, pero esto trae deficiencias y errores en la medición que llegan a ser del 8%. Lo que se traduce en pérdidas para las EPS's y errores en facturación para los usuarios finales.

La empresa privada TECA PERU S.A.C. como parte de su nueva propuesta comercial de brindar 29 el servicio de telemetría para la medición de consumo de agua para las EPS's, tiene como necesidad desarrollar un sistema electrónico de baja potencia y bajo costo, con capacidad de transmitir la medición de consumo volumétrico de agua de los medidores domésticos que cuentan con el estándar de salida de pulsos, con el fin de transmitir estas mediciones manera inalámbricamente a centros de datos en la web.

El desarrollo de una solución de un circuito electrónico 1 que permite la adquisición y transmisión inalámbrica de los datos de consumo con 25 bajo costo y bajo consumo

de energía es de suma importancia para la empresa, pues le permitirá lograr una ventaja competitiva frente otras empresas extranjeras ya consolidadas del rubro de telemetría.

Se puede identificar que las condiciones de funcionamiento de los medidores de agua domésticos en el país son difíciles, en general suelen ser conexiones subterráneas, encerrados dentro de bóvedas o cajas de hormigón, existiendo la posibilidad de inundación en el medidor. Es difícil obtener energía de una red eléctrica, es peligrosa ya que las condiciones húmedas favorecen las descargas eléctricas. Además, es difícil acceder a fuentes de energía renovable como la energía solar dado que se encuentran encerrados subterráneamente. Al encontrarse los medidores de agua encerrados y cubiertos por superficies metálicas como la tapa del suministro, se tienen atenuaciones de señal inalámbrica entre los rangos de 25 a 35 dB, lo cual torna difícil la comunicación de los sistemas electrónicos inalámbricos. La frecuencia de reemplazo de los medidores suele rondar los 3 a 5 años, Según I.N.A.C.A.L., Instituto nacional de la calidad.

Ante esta problemática, en el presente trabajo de suficiencia se propone diseñar un sistema electrónico de baja potencia empleando baterías cuya principal funcionalidad sea la adquisición de señales pulsos proveniente de los medidores de agua. Además de poseer la capacidad de conectarse a la red inalámbrica LPWAN 0G Sigfox con una auto sostenibilidad de 3 años en operación ininterrumpida.

a. Formulación del Problema

Ante la problemática expuesta, es importante plantearnos las siguientes preguntas de investigación:

Problema principal:

¿Cómo diseñar un sistema electrónico de baja potencia que permita la medición de consumo de agua de manera remota de gran autonomía empleando comunicación Sigfox en la empresa TECA PERU S.A.C.?

Problemas específicos:

P1. ¿Cómo analizar las diferentes características de microcontroladores de baja potencia, MODEMS de radiocomunicación Sigfox, antenas y baterías a emplear para lograr una autonomía de 1 a 3 años en la medición de consumo de agua?

P2. ¿De qué manera diseñar un circuito electrónico de baja potencia y elaborar algoritmos para la adquisición de las señales provenientes de los medidores de agua con salida de pulsos?

P3. ¿Cómo evaluar mediante mediciones físicas la autonomía del sistema electrónico y la transmisión inalámbrica de la información del consumo de agua?

b. Justificación

Una propuesta de diseño de un sistema electrónico de baja potencia para medición de consumo de agua basado en comunicación Sigfox, permitirá a la empresa TECA PERU S.A.C ofrecer un servicio comercial a las EPS's del país enfocada a sus necesidades, con esto podrá volverse más competitiva y posicionarse de mejor manera en el mercado de servicios de telemetría frente a compañías del extranjero que ofrecen servicios similares.

Además el desarrollo de este proyecto es importante para las EPS's de Perú pues estas en la actualidad aún no cuentan con tecnologías que les permitan recopilar el consumo de agua de sus cliente de manera remota con el que puedan mejorar su gestión en facturación evitar pérdidas por fugas de agua.

Durante los últimos años el desarrollo tecnológico de las tomas de lectura de los medidores de agua ha avanzado significativamente por tal motivo hoy pueden conectarse enviando datos a internet, un ejemplo del éxito de estos sistemas es en Brasil donde la empresa de saneamiento "SABESP", una de las más grandes de Latinoamérica, implemento 92 mil medidores en Sao Paulo, en asociación con la Empresa Operadora Sigfox WND Brasil y la empresa integradora de servicios de telemetría y Laager. Logrando generar una reducción de costos y mejoramiento de procesos de gestión de los clientes. Se cambia por completo los errores de lectura producidos por acción humana que se tenían antes de implementarse el nuevo sistema por una lectura precisa, con mayor frecuencia de toma de lecturas y previniendo las fugas de agua.

Es importante mencionar que la empresa TECA PERU S.A.C tiene un convenio con la compañía SIGFOX en Perú WND Perú S.A.C. Esta compañía está encargada del despliegue de la red denominada 0G a nivel nacional, Esta red LPWAN está especializada en proveer unas comunicaciones de baja potencia, largo alcance y bajo costo para aplicaciones de telemetría e internet de las cosas. Hoy en día la red cuenta con permisos de "Portador Local" cuya concesión fue emitida por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones MTC en 2020.

En donde se proporciona ⁴⁰ la capacidad necesaria para el transporte de señales de telecomunicaciones e interconexión a redes y servicios públicos a nivel nacional. Este permiso es necesario si se quiere dar un servicio con cobertura pública comercial a empresas del estado o privadas, siendo actualmente la red 0G Sigfox la única LPWAN hasta este momento con estos permisos en el país.

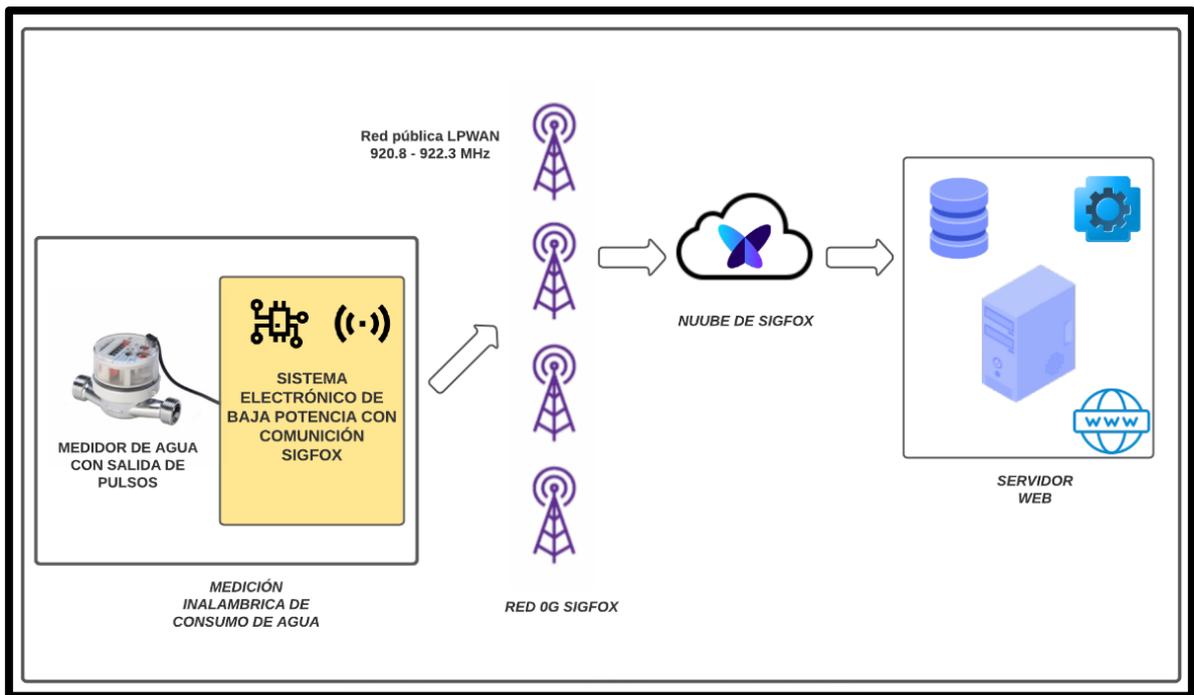
El aporte a nivel de ingeniería es el diseño de un circuito electrónico con auto sostenibilidad de 3 años empleando sólo baterías y que pueda comunicarse inalámbricamente hacia el internet empleando a la red 0G Sigfox. Además en este trabajo de suficiencia se ofrece un aporte en el campo de los sistemas embebidos de baja potencia dado que se propone diseñar un sistema electrónico operado por solo baterías sin necesidad de tener que recargar y su vez operar de manera ininterrumpida durante todo su vida útil, también aportar en el desarrollo de algoritmos que permitan una operación con baja potencia del microcontrolador. Mostrar las ventajas del uso de microcontroladores de baja potencia empleándolos en tareas de adquisición y procesamiento para el campo del internet de las cosas.

3.1.2 Determinación de requerimientos

Para desarrollar el circuito con un bajo consumo se debe considerar los siguientes requerimientos en base a las necesidades de las EPS's del país que son descritos en la formulación del problema. Se consideran los siguientes criterios:

- Adquisición señales provenientes de medidores de agua con el estándar de salida de pulsos.
- Operación con baterías.
- Operación ininterrumpida.
- Autosuficiencia por 3 años.
- Operación en interiores (instalaciones subterráneas)
- Envío de información empleando la red 0G Sigfox.
- Bajo costo.
- Tamaño reducido.

² En la figura 20 se detalla la arquitectura de red empleada para la comunicación inalámbrica de los medidores de agua hacia la web, siendo el circuito electrónico de bajo consumo el encargado de la adquisición de las señales de pulsos provenientes de los medidores de agua.



1 **Figura 20** Arquitectura de red para la telemedición de consumo de agua. Fuente: Elaboración propia

El presente trabajo describe el diseño del circuito electrónico que busca resolver el problema de las EPS del país mediante el diseño de un circuito electrónico de bajo consumo de energía empleando comunicación Sigfox. Se propone una arquitectura para el circuito electrónico que permita adecuar de mejor manera las diversas tecnologías de bajo consumo presentes en el mercado como el uso de los microcontroladores denominados ultra bajo consumo (*ultra-low power*), reguladores de voltajes de tipo LDO, MODEM de radiocomunicación Sigfox con bandas permitidas en el país, baterías de tipo no recargables, conmutadores (*switchs*) digitales para la activación de desactivación del MODEM Sigfox y antenas para la emisión de la radiofrecuencia.

Todas estas partes deben funcionar en conjunto siendo el diseño del algoritmo una parte fundamental en el sistema. El desarrollo del circuito de baja potencia que se propone para este trabajo se centra en la arquitectura mostrada en la figura 21.

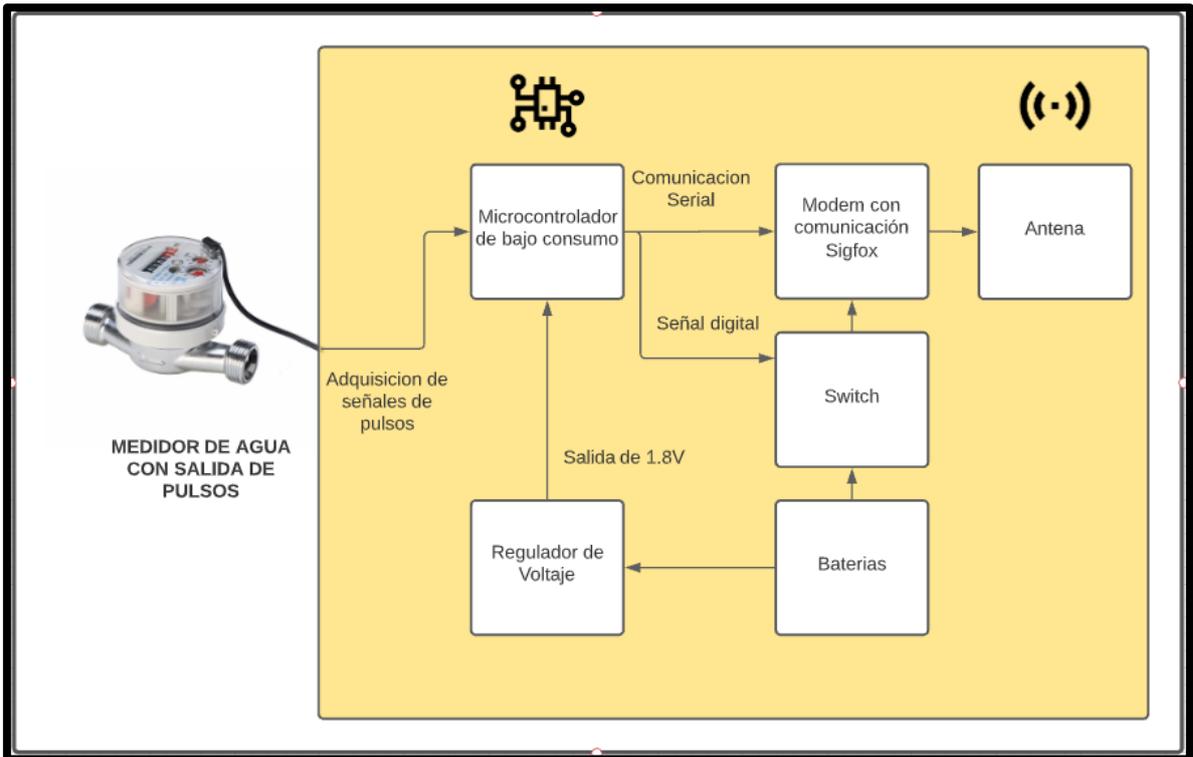


Figura 21 Propuesta de arquitectura de diseño del sistema electrónico de baja potencia.
Fuente: Elaboración Propia

3.1.1 Medidor de Agua a emplearse.

El medidor de agua que se emplea para este proyecto es el modelo M170 de la marca Elster, fabricado por la compañía Honeywell. Este modelo de medidor de agua es de tipo chorro múltiple, además es uno de los más empleados por las EPS's de Perú. Se encuentra certificado y calibrado por el ente supervisor INACAL en la figura 22 se muestra el medidor conectado a un banco de pruebas en las instalaciones de la empresa TECA PERU S.A.C.



Figura 22 Medidor de agua Elster M170.
Fuente: *Elaboración propia*

Además del uso del medidor, se requiere el empleo del accesorio de cable adaptador de pulsos, de modelo PR6 de marca Elster. Se adosa al medidor por medio de 2 tornillos en sus lados extremos. Su función es convertir el movimiento de las manecillas del medidor convencional en una salida de pulsos que posteriormente puede ser captado por un microcontrolador. Para este modelo en específico la equivalencia es de 1 litro por pulso. En la figura 23 se muestra el adaptador de pulsos instalado sobre al medidor de agua Elster.



Figura 23 Adaptador de salida de pulsos modelo PR6 de Elster.
Fuente: *Elaboración propia*.

En el lado extremo del cable del adaptador de salida de pulsos PR6, se encuentra el cable con los 2 hilos que proveen las señales de pulsos. Para obtener la señal digitalizada Pull-Down, previamente es energizado a una tensión de 1.8 Voltios. En la figura 24 se aprecia la forma de la señal de pulsos que provee el medidor de agua conectados a una cañería de agua abierta al máximo.

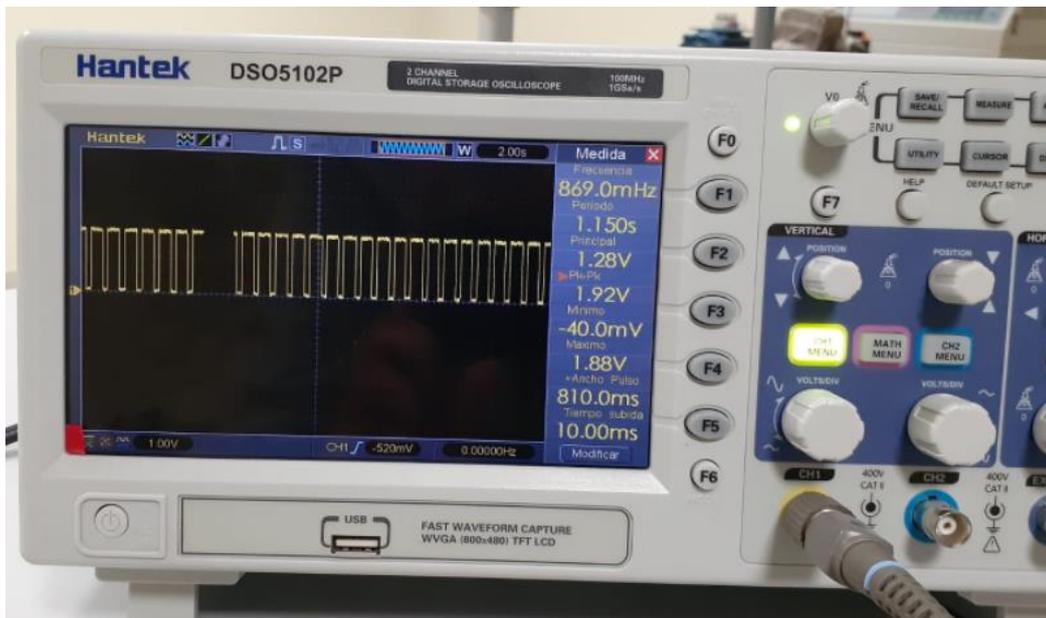


Figura 24 Señales de pulsos de medidor de agua.
Fuente: Elaboración Propia

Se visualiza que la frecuencia máxima que emite el medidor es de 0.869 Hz. Además, cada flanco de subida indica que se ha sido medido 1 litro en el medidor.

3.2 MODELO DE SOLUCIÓN PROPUESTO

8 El diseño en ingeniería consiste en el uso de conocimientos, recursos y herramientas para dar una solución tecnológica a los problemas y/o satisfacer necesidades. Se puede diseñar un determinado producto, sistema o proceso tomando en cuenta presupuesto, funcionalidad, tiempo, etc. Las gráficas son importantes en el proceso de diseño para visualizar posibles soluciones y para documentar ideas (Rojas, O. y Rojas, L., 2006).

Las fases planteadas para el proceso del diseño del presente proyecto se muestran en la figura 29. 8

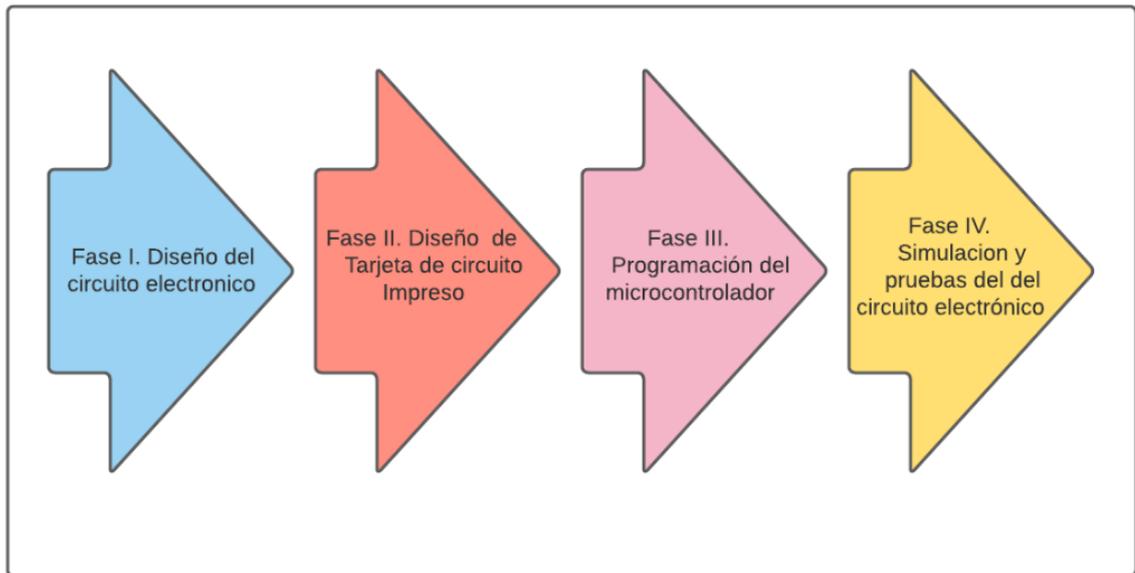


Figura 25 Fases del diseño del circuito electrónico de baja potencia.
Fuente: Elaboración propia

3.2.1 Análisis

El análisis de las tecnologías a emplear se realiza para determinar la mejor opción de componentes en la arquitectura del circuito electrónico de baja potencia que se propone en el presente trabajo, con el fin de realizar la adquisición de las señales pulsos provenientes del medidor de agua Elster M170 y de su posterior transmisión inalámbrica empleando la red 0G Sigfox, el análisis se describe de las siguientes secciones.

3.2.1.1 Análisis de microcontroladores de baja potencia

En la selección del microcontrolador adecuado para el circuito de baja potencia se deben considerar las capacidades funcionales de captación de pulsos por interrupción, capacidades de bajo consumo y ser de bajo costo. Se puede identificar a los siguientes fabricantes con sus respectivas familias de microcontroladores de bajo consumo disponibles comercialmente.

a. Microcontroladores ST

ST es una compañía de semiconductores, ha combinado su tecnología de microcontrolador de ultra bajo consumo con el *Know-how* de ARM Cortex, sus diseños se basan en una tecnología patentada de fugas ultra bajas y un diseño optimizado. Se pueden identificar 2 líneas de familias de microcontroladores optimizados para aplicaciones de baja potencia.

STM8L.

Son microcontroladores de 8 bits para aplicaciones básicas que no requieren un alto rendimiento en cálculos y operaciones en punto flotante, son fabricados a 130nm. Es la línea básica de los microcontroladores de bajo consumo de ST. En la tabla 4 se describe sus características.

Tabla 4

Características de bajo consumo de microcontroladores STM8L

Características	Valor
Rendimiento consumo por MHz	180 uA / MHz
Consumo en modo suspensión	0.35uA
Tamaño de memoria flash	8 – 64 Kb
CPU	8 bits
Características especiales	Bajo costo, simplicidad
Precio	0.67 - 3.22 USD

Fuente: Elaboración propia, datos extraídos de hoja de datos de microcontrolador STM8L de la empresa ST.

STM32L4.

Este microcontrolador ofrece una buena relación entre potencia ultra baja y un rendimiento en operaciones que llegan a los 100 DMIPS. Posee una unidad de punto flotante FPU y memoria flash que puede llegar a hasta 1 Megabyte. Presentan como característica un escalado dinámico de voltaje para equilibrar el consumo de energía con la demanda de procesamiento, además contiene periféricos de bajo consumo como LP UART y temporizadores LP. Esta familia destaca por haber obtenido 447 puntos en ULP-Mark y 167 ULP-PP por la organización EEMBC, encargada de probar el rendimiento de diversos MCU en el mundo. En la tabla 5 se describe sus características.

Tabla 5

Características de bajo consumo de microcontroladores STM32L4

Características	Valor
Rendimiento consumo por MHz	28 uA / MHz
Consumo en modo suspensión	8 nA
Tamaño de memoria flash	128– 1024 Kb
CPU	32 bits
Características especiales	Criptografía, DMA, RTC, USB, DMA, Núcleo ARM Cortex M4.
Precio	2.52 – 21.03 USD

Fuente: Elaboración propia, datos extraídos de hoja de datos de microcontrolador STM32L4 de la empresa ST.

b. Microcontroladores Microchip Technologies

Microchip es una empresa pionera fabricante de microcontroladores, memoria y semiconductores analógicos de Estados Unidos. Destaca por la producción de microcontroladores denominados PIC de 8 bits. Las características clave son los periféricos independientes del núcleo, el rendimiento de bajo consumo con tecnología *picoPower* y *eXtreme Low Power (XLP)*.

Microcontroladores PIC de 8 bits de baja potencia, Un PIC es un microcontrolador con arquitectura RISC, la arquitectura de los PIC emplea juegos de instrucciones que pueden variar desde 35 (para los de gama baja) a 75 (para los de gama alta). Cada ciclo de instrucción se ejecuta en 4 ciclos de reloj. Para nombrar a las familias de microcontroladores PIC de baja potencia se suele agregar el sufijo “L”, por ejemplo PIC16LFXXXX.

La diferencia con los modelos sin sufijo “L”, es que estos pueden operar a una menor potencia con voltajes que van desde los 1.8 a 3.3V, además se pueden clasificar 3 gamas definidas por sus capacidades, en este análisis se nombra solo los modelos con sufijo “L” de baja potencia. En la tabla 6 se describen las gamas de microcontroladores PIC.

Tabla 6

Principales gamas de microcontroladores PIC de 8 bits

Gama de PIC	Cantidad de Instrucciones	Bits de instrucción	Niveles de Pila	Familias de bajo consumo
Gama Base	33	12	2	PIC12LFXXX
Gama Media	35	14	8	PIC16LFXXX
Gama Mejorada	77	16	32	PIC18LFXXX

Fuente: Elaboración propia, datos extraídos de la página de la empresa Microchip.

PIC12LFXXX

La característica principal de esta gama es la simplicidad y bajo precio, de reducido tamaño contando desde 8 a 14 pines. Solo disponen de un temporizador y no admiten interrupciones.

Tabla 7

Características los microcontroladores de bajo consumo PIC12LFXXXX

Características	Valor
Rendimiento consumo por MHZ	30 uA / MHz @1.8V
Consumo en modo suspensión	20 nA
Tamaño de memoria flash	3.5– 14 Kb
CPU	8 bits
Características especiales	Tecnología XLP
Precio	0.64 – 2.16 USD

Fuente: Elaboración propia, datos extraídos de hoja de datos de microcontrolador STM8L de la empresa ST.

PIC16LFXXXX

Es la gama más variada, agrega nuevas prestaciones haciéndolo adecuado para aplicaciones más complejas. Admiten interrupción, comparadores, analógicos, periféricos de comunicación y diversos temporizadores. También presentan múltiples modos de ahorro de energía como periféricos independientes o CIP - PMD, además de la tecnología *Xtreme Low power XLP*. La última generación de esta familia con nomenclatura de 5 cifras es decir, PIC16LFXXXXX nacen de la fusión de los microcontroladores AVR y PIC mejorando su rendimiento con enfoque para el mercado de IoT.

Tabla 8

Características de microcontroladores de bajo consumo PIC16LFXXXX

Características	Valor
Rendimiento consumo por MHZ	30 uA / MHz @1.8V
Consumo en modo suspensión	20 nA
Tamaño de memoria flash	3.5– 14 Kb
CPU	8 bits
Características especiales	Tecnología XLP, PMD, IDLE, DOZE, PPS, DMA
Precio	0.77 – 11.46 USD

Fuente: Elaboración propia, datos extraídos página web de la empresa Microchip.

PIC18LFXXXX

Esta familia de microcontroladores posee todas las características de la gama PIC16LF, y agregan mejoras en el sistema de vectorizado para las interrupciones, vienen en paquetes de 18 a 80 pines. También incorporan variedad de periféricos avanzados como USB 2.0 y CAN, se alcanzan hasta las 75 instrucciones

optimizadas para lenguajes de alto nivel. En la Tabla 9 se describen sus características.

Tabla 9

Características de microcontroladores de bajo consumo PIC18LFXXXX

Características	Valor
Rendimiento consumo por MHz	45 uA / MHz @1.8V
Consumo en modo suspensión	60 nA
Tamaño de memoria flash	16–128 Kb
CPU	8 bits
Características especiales	Tecnología XLP,PMD, IDLE, DOZE, PPS, DMA, USB, CAN
Precio	1.31 – 19.17 USD

Fuente: *Elaboración propia, datos extraídos página web de Microchip.*

Según lo descrito se puede distinguir diversas capacidades y consumos en los microcontroladores, siendo estas características directamente proporcionales a su costo. El criterio para la selección de un modelo de microcontrolador es el equilibrio en precio y bajo consumo de energía, se requiere solo capacidades determinadas para el circuito propuesto, como la adquisición de señales de pulsos por medio de interrupciones externas, temporización de envío y comunicación por periférico UART con el que se pueda emitir comando AT hacia el MODEM Sigfox. Una decisión equilibrada entre precio y consumo de energía es el empleo de la familia de microcontroladores de la gama PIC16LFXXXX.

Para efectos del presente proyecto se empleará en específico al modelo PIC16LF1516 en encapsulado SSOP28, este microcontrolador que posee un precio de 1.63 USD y está disponible comercialmente en la tienda web de componentes electrónicos *MOUSER* en el país de Estados Unidos.

3.2.1.2 Análisis de MODEMS Sigfox

Sigfox cuenta con una red global que opera en bandas sin licencia en todo el mundo con frecuencias de radio que van desde los 862 a 928 MHz. El uso de bandas sin licencia o *ICM* permite que los dispositivos IoT con MODEMS Sigfox envíen datos con poca energía. Sin embargo, debido a las regulaciones, leyes y otras restricciones operativas del Perú, se permite operar en las bandas de 920 a 922MHz denominado RC4.

El modem Sigfox seleccionado debe ser compatible con RC4, se puede mencionar a los siguientes modelos que cumplen con este requisito:

a. SFM10R4

Este MODEM es fabricado por la empresa Wisol / Seong Ji de origen Coreano. Es popular en Sudamérica y Singapur, emplea comunicación UART y compatible con comandos AT. Es distribuido en Perú, lo cual lo convierte en una opción interesante, sus características se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10

Características del modem SFM10R4

Características	Valor
Frecuencia de operación	920-922MHZ
Zonas de operación	RC4
Consumo en transmisión	230mA
Consumo en recepción	32mA
Dimensiones	13.0 x 20.0 x 2.21 mm
Homologado en Perú por MTC	Si
Disponible comercialmente en Perú	Si
Precio	10 USD

Fuente: Elaboración propia, extraído de hoja de datos de MODEM SFM10R4 de la empresa SeongJi

b. RC1692HP-SIG

Fabricado por la empresa Radiocraft, es un MODEM compacto contiene una funcionalidad extra de lectura de sensores sin necesidad de microcontroladores, además de contar con comunicación estándar UART para el microcontrolador, sus características se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11

Características del MODEM RC1692HP-SIG

Características	Valor
Frecuencia de operación	902-928MHZ
Zonas de operación	RC2, RC4
Consumo en transmisión	356mA
Consumo en recepción	31mA
Dimensiones	12.7 x 25.4 x 3.3mm
Homologado en Perú por MTC	No
Disponible comercialmente en Perú	No
Precio	16.35 USD

Fuente: Elaboración propia, extraído de hoja de datos de MODEM RC1692HP-SIG de la empresa Radiocraft

c. iMCP – HT32SX

Es un SOC o chip multicomponente fabricado por la compañía Brasileña HT-Micron, que incorpora un microcontrolador ARM Corte M0+ de 32 bits y un transceptor Sigfox de baja potencia STM S2-LP. Tiene la ventaja de ser multizona y opera globalmente en todas las frecuencias de Sigfox. Su alta integración le permite ser muy flexible y adecuado para aplicaciones que requieren miniaturizar el circuito electrónico, además de que se puede programar con lenguaje C. En la tabla 12 se muestra sus características.

Tabla 12

Características del modem iMCP – HT32SX

Características	Valor
Frecuencia de operación	868 - 928MHZ
Zonas de operación	RC1, RC2, RC4, RC3, RC4, RC5
Consumo en transmisión	170mA
Consumo en recepción	18mA
Dimensiones	13 x 13 x 1.3mm
Homologado en Perú por MTC	No
Disponible comercialmente en Perú	No
Precio	9 USD

Fuente: Elaboración propia, datos extraído de hoja de datos de MODEM iMCP – HT32SX de la empresa HT-Micron

De lo señalado en las tablas de comparación anteriores, los MODEM de radiocomunicación Sigfox poseen diversas características en cuanto a zonas de operación, para el presente proyecto se requiere que solo opere en RC4, es decir, 920.8 MHz, que es una frecuencia permitida por el MTC. Se selecciona al MODEM SFM10R4 del fabricante Wisol/SeongJi que se encuentra homologado y certificado en el Perú además de estar disponible comercialmente.

3.2.1.3 Análisis de antenas

Se pueden encontrar diversidad de antenas para las emisiones radioeléctricas, se requiere que el circuito electrónico de baja potencia transmita las señales a una frecuencia de 920.8 MHz donde opera Sigfox en RC4, que es una frecuencia Sub-gigahertz. La antena es una de las causas de falla al crear un nuevo prototipo IoT. El objetivo en cualquier antena en términos de elección y diseño es lograr un alto rendimiento operativo en la vida real. Se pueden enumerar las siguientes antenas que se adecuan de mejor forma al proyecto:

Antenas omnidireccionales, Se trata de una antena de tipo monopolo de una longitud de 192 mm generalmente, cuenta con una articulación mecánica que permite orientarla a 0°, 45° o 90°. La longitud de este tipo de antenas corresponde con la mitad de la longitud de onda de la señal de trabajo para para la que está diseñado.

Se enumeran los siguientes modelos de antenas.

a. AN3G01

Es una antena compuesta de un cuerpo de plástico rígido y en la parte inferior posee un conector metálico de aleación de tipo SMA macho, sus características son mostradas en la tabla 13

Tabla 13

Antena larga monopolo AN3G01

Características	Valor
Modelo	AN3G01
Fabricante	RFsister
Impedancia	50 Ohms
VSWR	<2.5
Ganancia	2.5 dBi
Rango de Frecuencias	880-2170 MHz
Conector	SMA Macho
Precio	4.2 USD

Fuente: Elaboración propia, datos extraído de hoja de datos de la antena AN3G01 del fabricante RFsister



Figura 26 Antena monopolo AN3G01.

Fuente: Elaboración propia

b. Wodf-920

Es una antena de tipo externa, posee articulación para que le permite girar de manera axial. Su cuerpo es de plástico y posee conector SMA de tipo macho, en la tabla 14 se muestra sus características.

Tabla 14

Antena larga monopolo Wodf-920

Características	Valor
Modelo	Wodf-920
Fabricante	Worldpeak
Impedancia	50 Ohms
VSWR	<2.5
Ganancia	3 dBi
Rango de Frecuencias	920 MHz
Conector	SMA Macho
Precio	1.35 USD

Fuente: Elaboración propia, datos extraído de hoja de datos de la antena Wodf-920 del fabricante Worldpeak



Figura 27 Antena monopolo Wodf-920.

Fuente: Elaboración propia

c. T10

Es una antena de tipo helicoidal, a diferencia de las antenas anteriores, esta antena se puede soldar directamente en la PCB, en la tabla 15 se muestran las características de la antena.

Tabla 15

Antena larga monopolo Wodf-920

Características	Valor
Modelo	T10
Fabricante	Dream LNK
Impedancia	50 Ohms
VSWR	<1.4
Ganancia	3 dBi
Rango de Frecuencias	824-960 MHz
Conector	THT
Precio	0.18 USD

Fuente: *Elaboración propia, datos extraído de hoja de datos de la antena T1 del fabricante Dream LNK*



Figura 28 Antena Helicoidal T10.

Fuente: (Dream LNK,sf)

De las antenas mostradas se puede determinar que la antena que se adecua al proyecto con el mejor balance costo/funcionalidad, es la antena T10, Esta antena se encuentra dentro del rango de frecuencias donde opera Sigfox en RC4. Es de bajo costo con tan solo 0.18USD. También posee una ganancia de 3dBi que se adecua muy bien para las transmisiones de radiofrecuencia.

3.2.1.4 Análisis de baterías

Las baterías a emplearse deben ser capaces de suministrar picos de energía en la transmisión de la radiofrecuencia. Además que deben poseer un porcentaje de baja tasa de auto descarga por mes o año. Existen diversos tipos de baterías como las baterías de Litio y baterías Alcalinas, que poseen una alta densidad de energía por volumen. El primero es recargable (primaria) y el segundo no lo es (secundaria).

Existen factores claves que influyen en la selección de la batería como y estas se muestran en la figura 28.

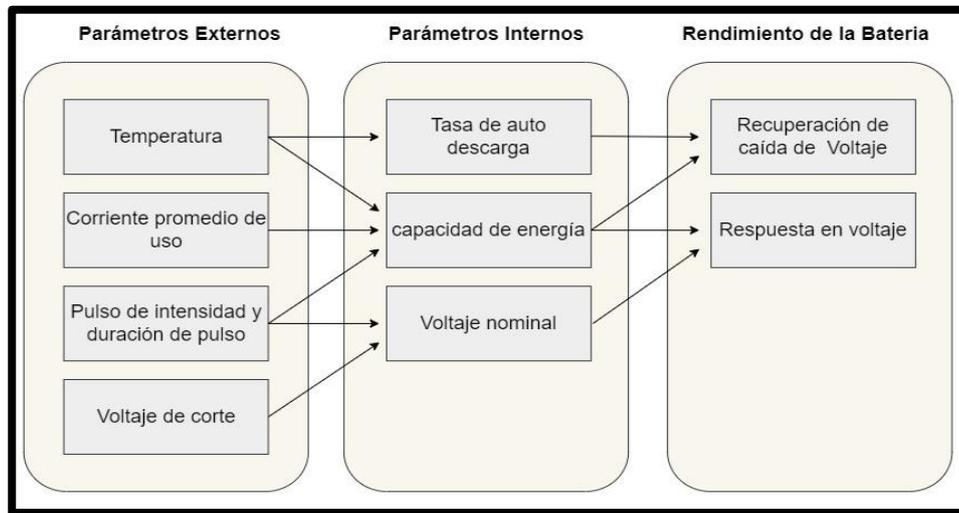


Figura 29 Parámetros de elección de una batería.
Fuente: Elaboración propia

La batería debe cumplir con las prestaciones específicas de la aplicación del dispositivo y la red de comunicaciones durante toda su vida útil del proyecto. También es vital, que las baterías estén disponibles comercialmente en cantidades significativas, para garantizar un menor tiempo posible de comercialización. Se puede considerar estos 2 tipos de baterías que se adecuan mejor al proyecto y además están comercialmente disponibles en el país. En la Tabla 16 se comparan sus propiedades.

Tabla 16

Propiedades de baterías de Litio y alcalinas

<i>Características</i>	<i>Litio</i>	<i>Alcalina</i>
<i>Tipo de batería</i>	<i>Secundaria</i>	<i>Primaria</i>
<i>Densidad de energía por masa</i>	<i>100-265 W.h/Kg)</i>	<i>85-190 (W.h/Kg)</i>
<i>Densidad de energía por volumen</i>	<i>250-730 (W.h/L)</i>	<i>250-430 (W.h/L)</i>
<i>Potencia Específica</i>	<i>250-340 (W/Kg)</i>	<i>100-144(W/Kg)</i>
<i>Tasa de autodescarga/Mes</i>	<i>8% a 21°C</i>	<i>0.075% a 21°C</i>
<i>Voltaje Nominal</i>	<i>3.7 V</i>	<i>1.5 V</i>
<i>Voltaje de corte</i>	<i>2.5 V</i>	<i>1.1 V</i>
<i>Inflamable</i>	<i>Si</i>	<i>No</i>
<i>Precio/Energía</i>	<i>2.5 USD/ W.h.</i>	<i>0.35 USD/W.h.</i>

Fuente: Elaboración propia, información extraída de hojas de la tienda Mouser y datos del fabricante de baterías Duracell.

Las baterías de Litio son las que mayor densidad de energía por volumen presentan, además de una mayor potencia específica. Pero a diferencia de las alcalinas, estas tienen una tasa de autodescarga muy significativa. La tasa de autodescarga de una batería alcalina es solo 0,075% por mes o 0.9% por año. También se puede apreciar que las baterías de alcalinas son mucho más económicas llegando a costar 0.35 USD por Watt.

Para los requerimientos del proyecto, las baterías alcalinas son las que se adecuan de mejor manera por su precio y su baja tasa de autodescarga, lo que posibilita una alta autonomía en operación por largo tiempo. Se emplearán 2 unidades de batería alcalina del modelo MN1500 de tamaño AA de la marca Duracell con un costo de total de 3.5 USD. Las dos baterías conectadas en serie suman en total 2800mAh de capacidad.

3.2.2 Diseño de circuito electrónico de baja potencia

a. Circuito de adquisición de señal de Pulsos

Las señales de pulsos que provienen del medidor de agua son captadas por medio de un circuito *Pull-Down*, lo cual permite obtener niveles de 0 o 1 lógicos. Se elige la configuración *Pull-Down* por proveer menor consumo ya que estará a 0 voltios de forma predeterminada, a menos que se detecte un consumo de agua.

La fórmula para determinar el valor de la resistencia está dado por la fórmula de la ecuación (4):

$$R_{pull_down} = \frac{(V_{Lmax} - 0)}{I_{pullDown}} \quad (4)$$

Donde:

R_{pull_down} = Valor de la resistencia de circuito *Pull-Down*

V_{Lmax} = Voltaje máximo de 0 lógico. Es 0.8V para circuitos CMOS

$I_{pullDown}$ = Corriente del circuito *Pull-Down* cuando sea activado.

La resistencia interna del microcontrolador se considera infinito dado que cuando actúan sus pines como entrada, este valor se vuelve infinita (circuito abierto). Es conveniente que el valor de la resistencia Pull down sea lo más alto posible para para obtener un mínimo de circulación de corriente, pero en la práctica no se da pues existe un efecto adverso, mientras más alto el valor de la resistencia, mayor

ruido ingresara a la entrada del pin (efecto de pin flotante), en el cual se producirían señales de pulsos falso positivos o estados lógicos indeterminados. Un valor aceptable máximo para R_{pull_down} es de $100K\Omega$ donde es estable para la entrada de un microcontrolador PIC.

Reemplazando valores la ecuación (5), quedará expresada la resistencia de pull-down de la siguiente manera:

$$100K\Omega = \frac{(0.8 - 0)}{I_{fuente}} \quad (5)$$

Se despeja I_{fuente} y se obtiene:

$$I_{pullDown} = 8 \mu A \quad (6)$$

Para complementar el circuito pull-down es usual colocar un capacitor en paralelo a la resistencia para que actúe como filtro o atenuador antirrebote, este efecto se produce cuando ocurre un cambio de estado lógico o filtración de señales de interferencia electromagnética.

Es conveniente emplear valores altos de capacitancia para atenuar estos efectos, pero se corre el riesgo de producir un efecto no deseado, mientras más alto el valor de capacitor mayor será el tiempo de descarga del mismo donde puede ocurrir el riesgo que el estado lógico no cambie. Para calcular el valor adecuado del capacitor se tiene la ecuación (7), tiempo de descarga de condensador.

$$T = 5 \times R \times C \quad (7)$$

Donde:

T = Tiempo en segundos.

R = Resistencia en Serie del condensador

C = Capacidad del condensador.

Para determinar el valor adecuado del condensador se debe considerar el tiempo de descarga máximo en el cual el condensador no deberá superar para no interferir con la captación de señales de pulso del medidor que es de 869 milisegundos.

Se tiene un valor de Resistencia de $100K\Omega$, un valor adecuado comercial que propone sería de $100nF$. Reemplazando valores en se obtiene la constante de tiempo de descarga del condensador en segundos en la ecuación (8).

$$5T = 5 \times 100K\Omega \times 100 \times 10^{-9} \quad (8)$$

Se obtiene que:

$$T = 0.05 \text{ Segundos} \quad (9)$$

Con este tiempo se asegura que el valor del condensador seleccionado de $100nF$ paralelo a la resistencia *Pull-Down* no interferirá con las lecturas de señales de pulsos a máximo caudal provenientes el medidor de agua.

En la figura 30 se muestra el circuito completo para la adquisición de señales de pulsos:

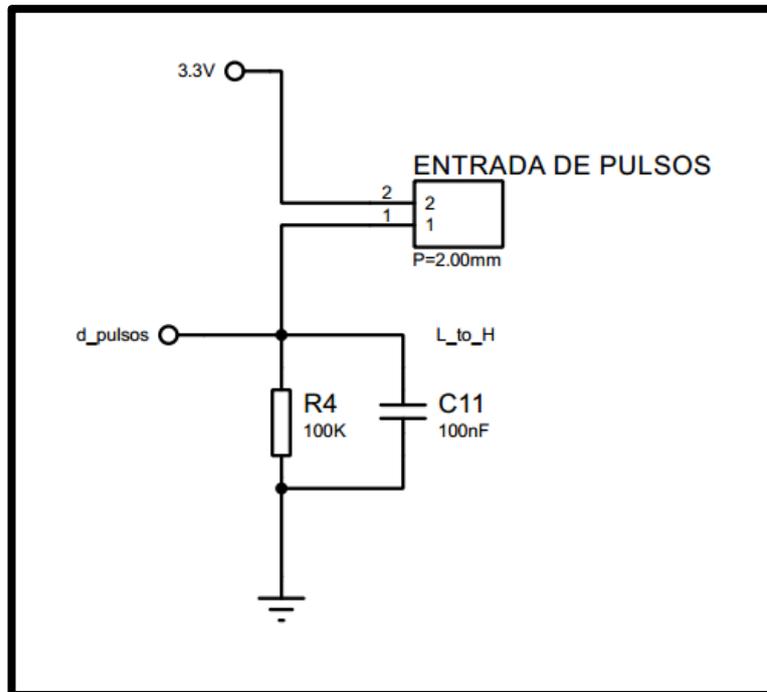


Figura 30 Circuito *Pull-Down* para entrada de pulsos de medidor de agua.
Fuente: Elaboración propia

b. Circuito de alimentación

Para diseñar el circuito de alimentación de energía, es necesario emplear un regulador de voltaje de baja caída o LDO, con el que no se presenten pérdidas de corriente en reposo o *Quiescent current*. Lo ideal será que estas tiendan a ser 0. Se utiliza el regulador LDO modelo MCP1711-18 fabricado por la compañía Microchip. Este regulador puede suministrar hasta $150mA$ de corriente, que es

suficiente para alimentar al microcontrolador y sus periféricos del circuito de baja potencia. El fabricante recomienda para su diseño colocar condensadores a la entrada y salida del regulador.

También el circuito de alimentación está conformado por un interruptor o *Switch* transistorizado modelo FPF2104 fabricado por la compañía ON-Semi, es capaz de soportar hasta 400mA. Este interruptor servirá para activar y desactivar la energía del MODEM SFM10R4. La activación del interruptor se da por medio de un pin del microcontrolador. Con este enfoque de diseño se garantiza que el consumo del MODEM sea únicamente cuando se requiera realizar una transmisión inalámbrica de datos. El circuito de alimentación completo se muestra en la figura 31.

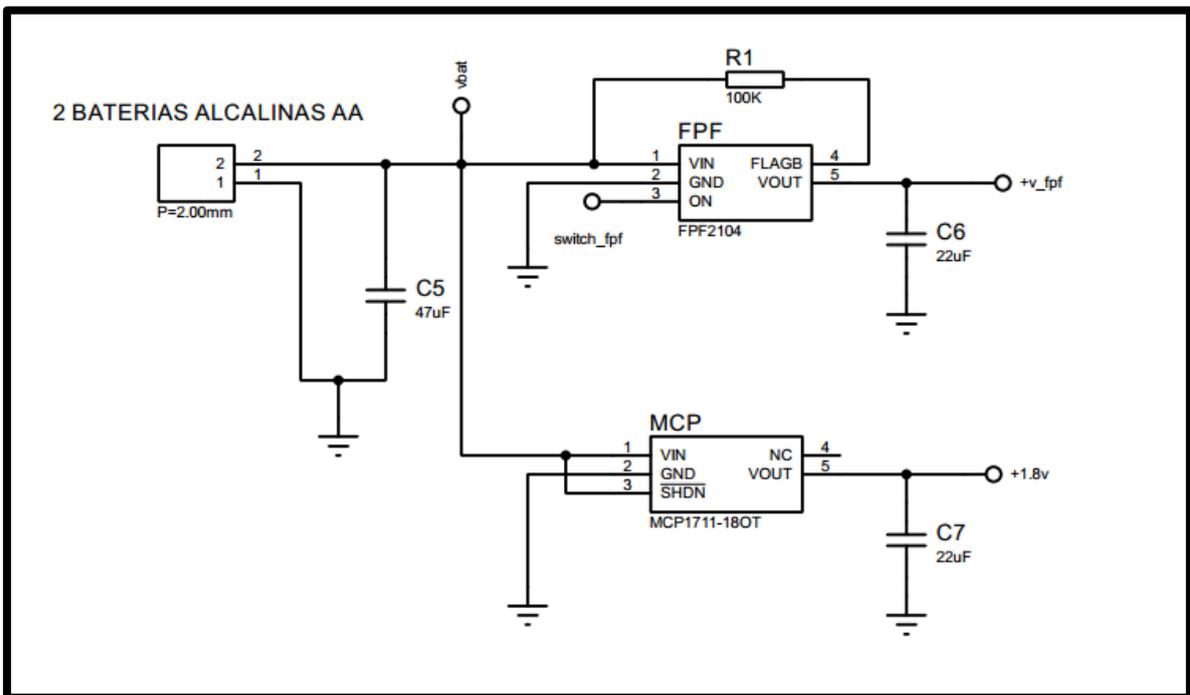


Figura 31 Circuito de alimentación para circuito de baja potencia.
Fuente: Elaboración propia

Las características del circuito de alimentación son las siguientes:

- ✓ Regulador LDO MCP1711-180T con corriente en reposo de 600nA.
- ✓ *Switch* activado por pin digital modelo FPF2104 para energización de MODEM Sigfox SFM10R4.
- ✓ Capacitores filtro C5 de 47µF y C7, C6 de 22µF para filtrado de ruido.

c. Circuito para MODEM SFM10R4

El modem SFM10R4 puede ser alimentado con voltajes que van desde los 2.3 hasta 3.6 voltios, por lo cual su operación puede darse con 2 baterías alcalinas conectadas en serie, en la figura 32 se muestra el voltaje de operación con respecto a la potencia que puede emitir el MODEM.

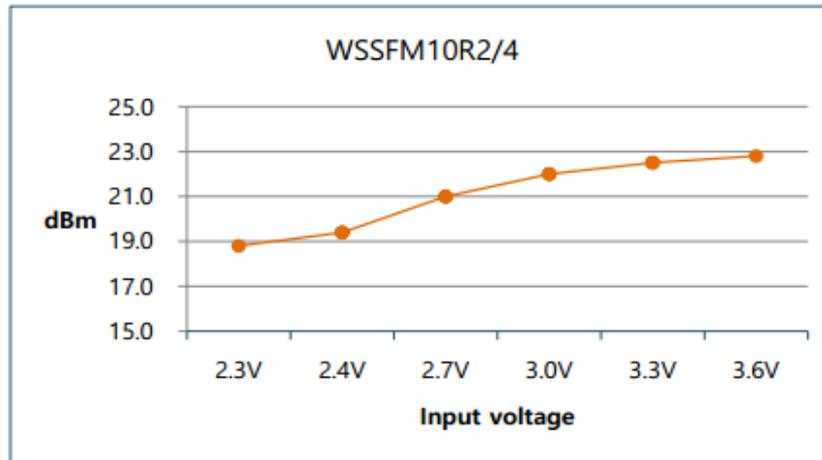


Figura 32 Voltaje de operación de modem SFM10R4.
Fuente: Elaboración propia

El capacitor $C1$ que une la línea de radiofrecuencia con la antena es de 100pF, este valor es recomendado por el fabricante Seong Ji en las hojas de datos, Para lograr optimizar al máximo la salida de señal de radiofrecuencia es recomendable calibrar los valores del capacitor de manera personalizada contrastando las mediciones en una cámara anecoica. En la figura 33 se muestra el circuito para el MODEM SFM10R4, en el cual se conecta con los pines UART hacia el microcontrolador.

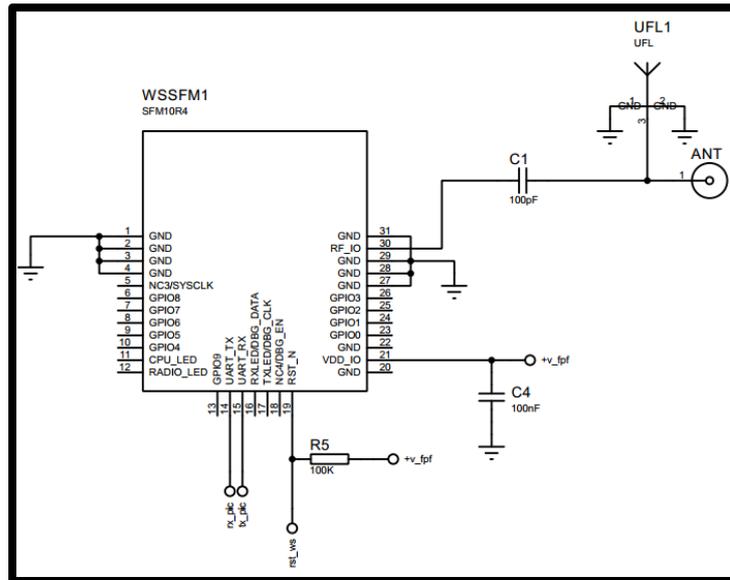


Figura 33 Circuito para modem SFM10R4.
Fuente: Elaboración propia

El tiempo que toma la transmisión de datos Sigfox está determinado por los 3 picos de consumo que se generan al emitir la señal de radiofrecuencia. El tiempo de un pico es de 257 milisegundos en promedio, llegado a tener un consumo de 230 mA, en figura 34 se muestra el proceso de transmisión de mensajes Sigfox.

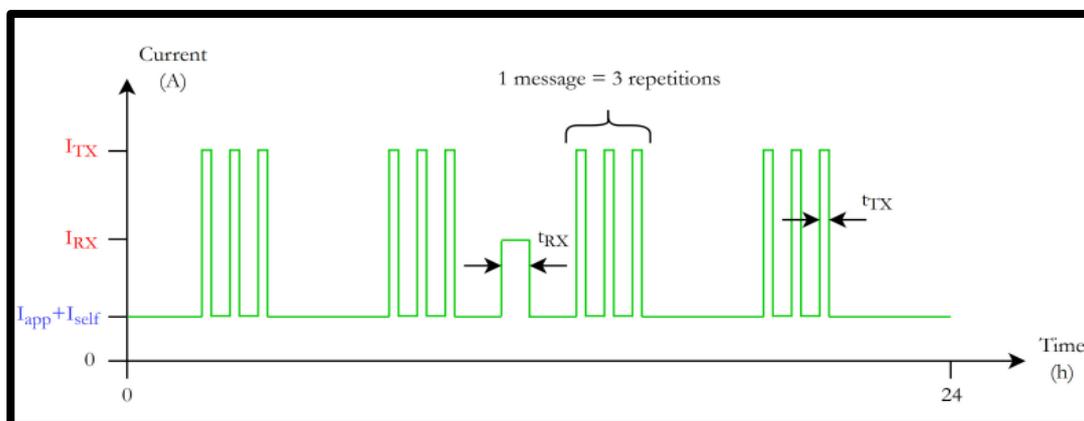


Figura 34 Transmisión de mensajes Sigfox.
Fuente: (Sigfox, 2017)

De la figura 34 se puede extraer unas ecuaciones que están basadas en la documentación de Sigfox, llamado *Battery compatibility with Sigfox technology* . Para determinar la capacidad de una batería en operación continua por un periodo de tiempo específico se puede emplear la ecuación (10):

$$C \geq N_{aut}(24(I_{app} + I_{self}) + N_{rep}N_{TX}I_{TX} \frac{t_{TX}}{3600}) \quad (10)$$

Donde:

C = Capacidad de la batería en amperios-hora

N_{aut} = Autonomía en días.

I_{app} = Consumo de corriente en estado activo de la aplicación
(microcontrolador y circuito electrónico).

I_{self} = Corriente de autodescarga de la batería en amperios.

N_{rep} = Numero de repeticiones de transmisión, por defecto 3.

N_{TX} = Numero de transmisiones por día.

I_{TX} = Corriente pico de transmisión en amperios.

t_{TX} = Duración de una transmisión, para 12bytes el tiempo es de 2.08 S.

Además, para calcular el valor de la corriente de la batería en autodescarga se tiene la ecuación (11):

$$I_{self} = \frac{a * C}{100 * 365 * 24} \quad (11)$$

Donde:

a = Porcentaje anual promedio de autodescarga de la batería.

C = Capacidad de la batería en amperios.

Reacomodando los términos se obtienen la ecuación 12, para hallar la capacidad mínima de la batería:

$$C_{min} \geq \frac{\left(24I_{app} + N_{rep}N_{TX}I_{TX} \frac{t_{TX}}{3600}\right) N_{aut}}{1 - \frac{24aN_{aut}}{876000}} \quad (12)$$

Reemplazando los valores con respecto a lo que se requiere para el proyecto: Autonomía por 3 años o 1095 días, 1 transmisiones por día, capacidad de baterías alcalinas de 2800mAh y tasa de autodescarga anual de 0.9%. Capacidad mínima de batería con los valores para el proyecto se muestra en la ecuación (13).

$$C_{min} \geq \frac{\left(24I_{app} + 3 * 1 * 0.230 * \frac{2.08}{3600}\right) * 1095}{1 - \frac{24 * 0.9 * 1095}{876000}} \quad (13)$$

Resolviendo, la ecuación queda expresada de la siguiente como la ecuación (14):

$$C_{min} \geq \frac{(26280 * I_{app} + 0.4365)}{0.973} \quad (14)$$

Reemplazando valores con respecto a la capacidad de las 2 baterías alcalinas AA de 2800mAh, en la ecuación (15)

$$2.8 \geq \frac{(26280 * I_{app} + 0.4365)}{0.973} \quad (15)$$

La ecuación (16) muestra que la corriente de consumo del circuito electrónico, para lograr una autonomía de 3 años, debe ser menor a:

$$87.05 \mu A \geq I_{app} \quad (16)$$

d. Circuito para microcontrolador PIC16LF1516

El microcontrolador PIC16LF1516 es un microcontrolador de baja potencia, posee los periféricos necesarios para la adquisición y procesamiento de las señales de pulsos provenientes del medidor de agua. Para lograr que el microcontrolador consuma lo mínimo de corriente, se deben considerar aspectos como el voltaje de operación y la frecuencia de operación del oscilador principal, en la figura 35 se muestra la relación entre estas variables para el microcontrolador.

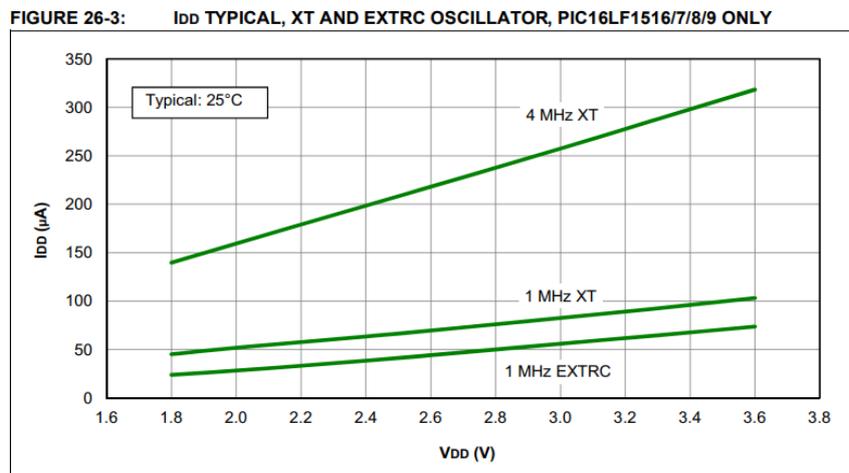


Figura 35 Relación entre frecuencia y voltaje de operación en el microcontrolador con respecto su consumo de corriente.

Fuente: (Microchip, s.f)

Se elige operar a una frecuencia de 500kHz en el microcontrolador, el cual es un valor mínimo comercial de osciladores en el mercado, los periféricos con comunicación UART puede operar correctamente a 9600 baudios. Además se emplea un oscilador secundario externo para el *Timer 1* de 32.768kHz donde se va a producir 1 segundo en tiempo real. Esta base de tiempo va a servir de pauta en los temporizados de envío de la data hacia la web. La adquisición de señales de pulso será por el pin B0 que es un pin dedicado para leer señales digitales por el método de interrupción externa. Para el circuito propuesto en este proyecto se muestra el esquema electrónico en la figura 36.

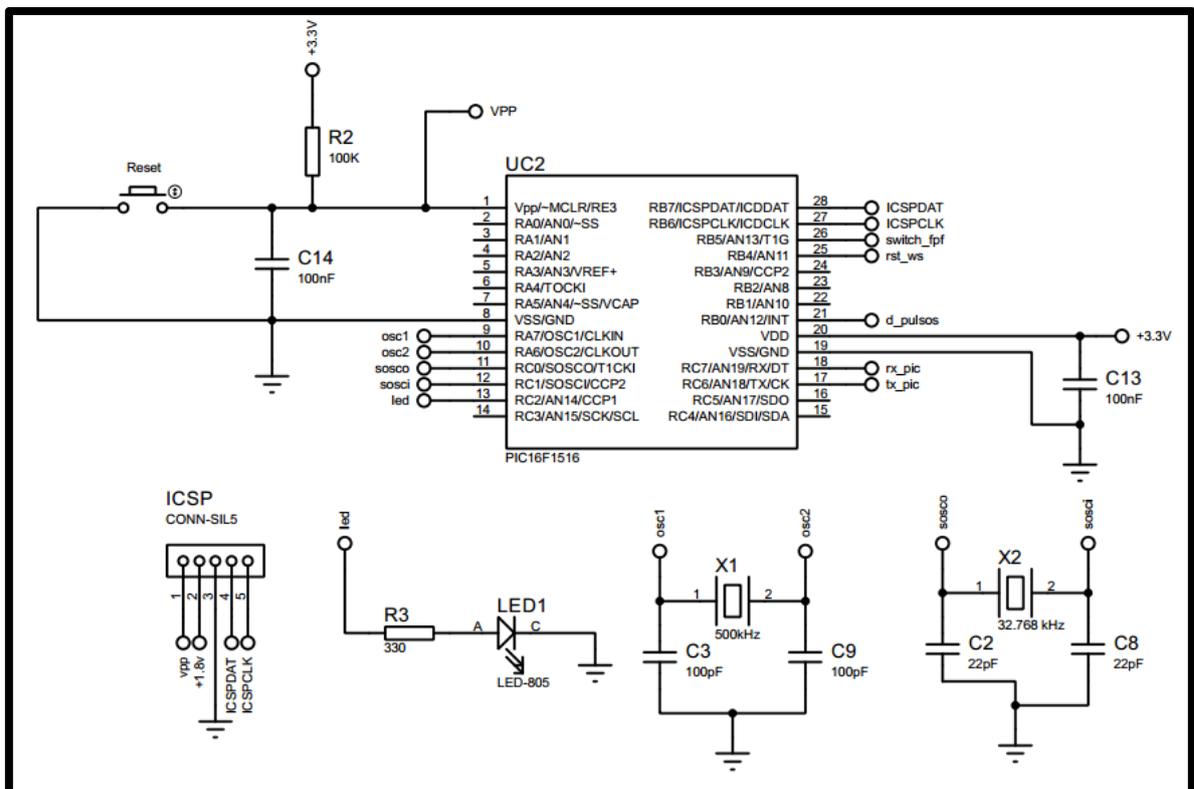


Figura 36 Circuito para microcontrolador PIC16LF1516.

Fuente: Elaboración propia

El consumo teórico que se tendría para microcontrolador según la gráfica de consumos mostrada en la figura 37, sería de 50uA a 1.8 Voltios de alimentación. Además Las características del circuito para el microcontrolador son los siguientes:

- Operación a 1.8 Voltios
- Resistencia R2 *pull-up* para reste con un valor de 100K
- Oscilador principal de tipo resonador X1 de 500kHz y capacitores C3 y C9 de 100pF según recomendación de fabricante

- Oscilador secundario X2 de cuarzo a 32.768 kHz y capacitores C2 y C8 de 22pF para producir 1 segundo en tiempo real o *RTC* por el modulo temporizador o *timer 1* del microcontrolador. El cual servirá de base de tiempo para temporizar los envíos de datos a la web.
- Condensador C13 para desacoplo de ruido eléctrico, el fabricante recomienda 100 nF y colocarlo lo más cerca al microcontrolador
- Luz led indicadora de color rojo junto a una resistencia R3 de corriente para un correcto funcionamiento.
- Pulsador de reseteo o MCLR para microcontrolador.
- El microcontrolador es programado por el protocolo ICSP de Microchip.
- ² En la tabla 17 se definen las funcionalidades de los pines a utilizar en el microcontrolador PIC16LF1516, tanto para las entradas y salidas.

Tabla 17

Definición de pines de entrada y salida en el microcontrolador

Definición	Pin	Identificador
Reseteo de microcontrolador.	1	VPP
Entrada oscilador principal.	9	osc1
Realimentación oscilador principal.	10	osc2
Entrada oscilador secundario.	11	sosco
Realimentación oscilador secundario.	12	sosci
Indicador led.	13	led
Programación ICSP DAT.	28	ICSPDAT
Programación ICSP CLK.	27	ICSPCLK
Activación/desactivación de switch para MODEM Sigfox.	26	switch_fpf
Reseteo de MODEM Sigfox.	25	rst_ws
Entrada de señal de pulsos	21	d_pulsos
Alimentación positiva.	20	+3.3V
Comunicación UART Rx MODEM.	18	rx_pic
Comunicación UART Tx MODEM.	17	tx_pic

Fuente: *Elaboración propia*

¹⁰ En la figura 37 se muestra el diseño final del circuito de baja potencia elaborado en software Proteus en ¹⁷ las instalaciones de la empresa Teca Perú S.A.C.

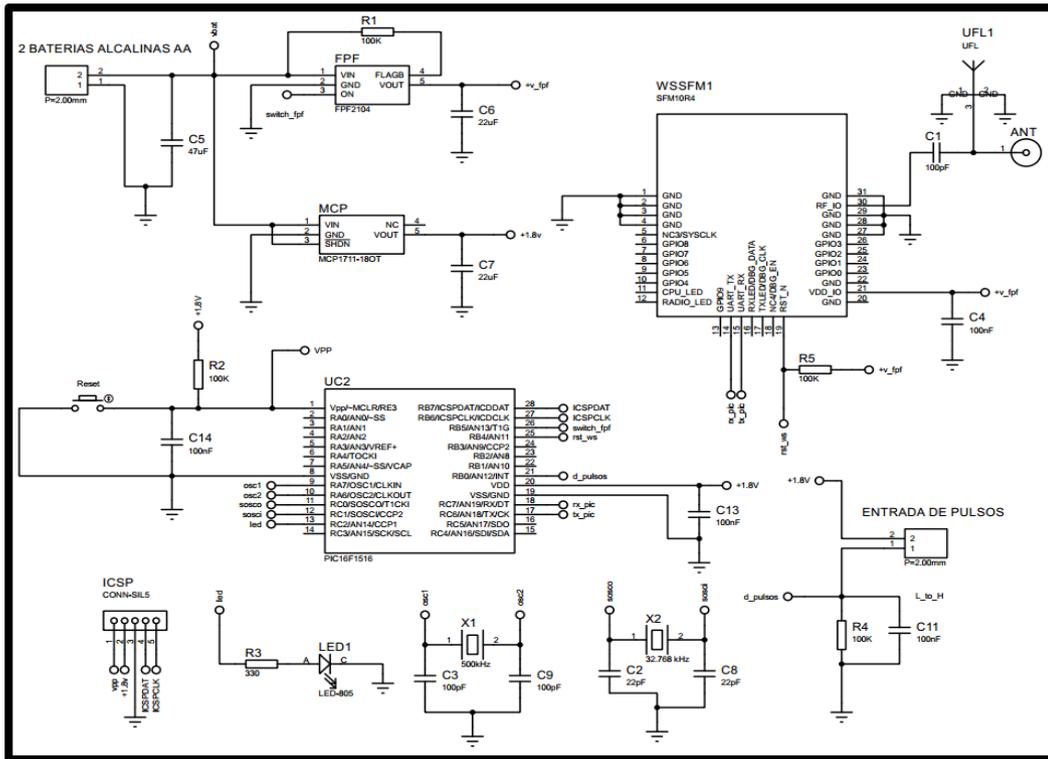


Figura 37 Circuito electrónico de baja potencia para la medición de consumo de agua.
Fuente: Elaboración. Propia.

Para el diseño de la PCB se opta por empleo de componentes electrónicos de montura superficial o SMD, lo que permitirá reducir considerablemente el costo y el tamaño de la PCB. El tamaño total es de 57.5 x 32.5 mm y un ancho de 13mm. En la figura 38 se muestra el diseño final elaborado con el software Ares de Proteus donde los componentes se encuentran distribuidos y conectados de acuerdo a esquema electrónico de la figura 37.

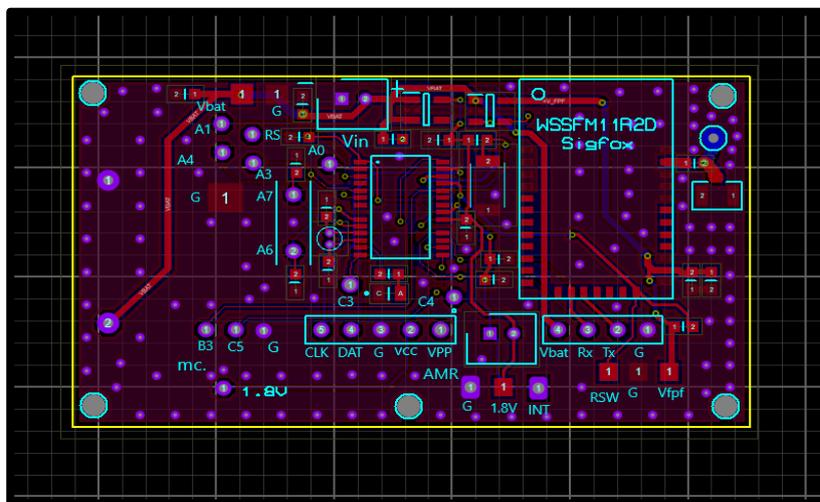


Figura 38 Diseño en PCB del circuito de baja potencia para la medición de consumo de agua.
Fuente: Elaboración propia

Además el software Ares de Proteus permite generar una vista en 3D de la PCB diseñada, esta vista se muestra en la figura 39.

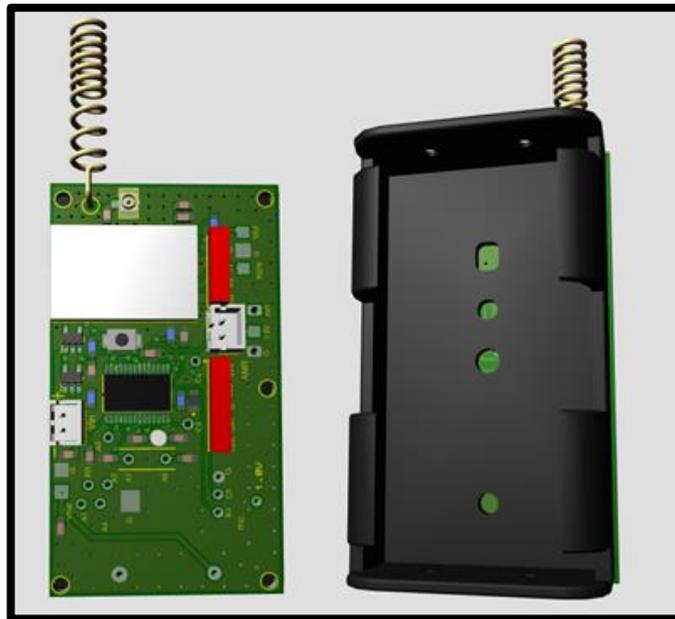


Figura 39 Vista en 3D de la PCB.
Fuente: Elaboración propia

e. Lista de componentes

En la tabla 18 se enumeran los componentes empleados en el diseño del circuito electrónico de baja potencia con un precio referencial tomado desde la tienda Mouser.

Tabla 18

Lista de materiales del circuito electrónico

Descripción	Símbolo	Precio USD
Porta batería AA THT	BAT IN	2.5
Capacitor 47uF 0603	C5	0.8
Resistencia de 100K 0603	R1,R2,R4,R5	0.02
Switch FPF2104	FPF	1.15
Capacitor 22uF 0603	C6	0.46
Regulador LDO MCP1711-180T	MCP	1.12
Capacitor 22uF 0603	C7	0.46
Pulsador smd.	Reset	0.23
Capacitor 100nF 0603	C11,C14,C13	0.03
Microcontrolador PIC16LF1516	UC2	1.63
Resistencia 330 Ohm 0603	R3	0.03
Led Rojo 0805	LED1	0.08
Resonador de 500kHz	X1	0.65
Capacitor 100pF 0603	C1,C3,C9	0.06

Oscilador de 32.768kHz	X2	0.7
Capacitor 22pF 0603	C2,C8	0.06
Conector Plastico 2.00 mm	P=2.00	0.4
MODEM SFM10R4	WSSFM1	9.9
Antena Helicoidal THT	ANT	0.18
Conector UFL	UFL	0.11
2 Bateria Alcalinas AA MN1500	BAT	3.5

Fuente: Elaboración propia. Los precios son obtenidos en la página web de la tienda de componentes electrónicos Mouser. <https://mouser.com>

Adicionalmente se considera un precio de fabricación de la PCB en el fabricante JLPCB (China) de 5 USD, sumando en total costo 28.71 USD la fabricación del circuito.

3.2.3 Diseño del algoritmo.

Según el análisis que se realizó previamente, se ha elaborado un diagrama de flujo que muestra el algoritmo de operación del programa en el microcontrolador para la tarea de adquisición y transmisión de las señales de pulsos del medidor de agua, en la figura 40 se tiene el presente diagrama.

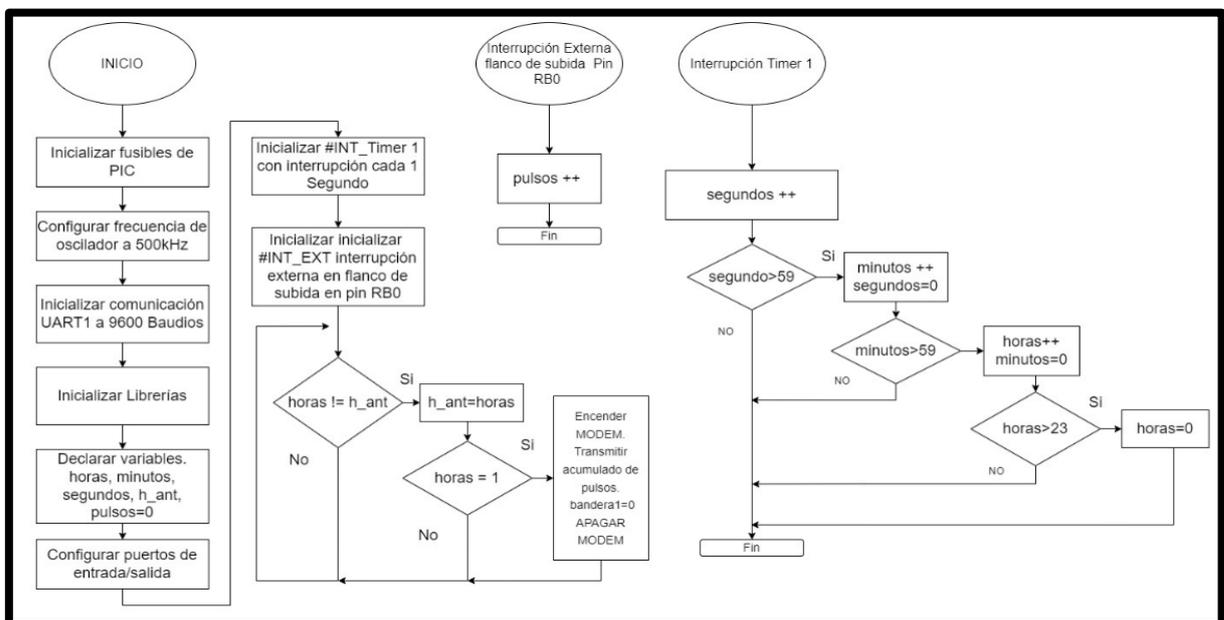


Figura 40 Diagrama de flujo de la operación en adquisición de pulsos del medidor de agua

Fuente: Elaboración propia

El programa está elaborado en lenguaje C empleando el compilado PIC C para microcontroladores PIC. En la figura 41 se observa el bloque de código que realiza la inicialización de las configuraciones como los fusibles, la velocidad de reloj y la

velocidad de transmisión UART para la comunicación con el MODEM, además de la definición de pines a emplear.

```
#include <16LF1516.h>
#fuses XT,NOVDT, NOMCLR,NOPROTECT, NOBROWNOUT,NODEBUG, LVP, NOVCAP,NOFCMEN,NOIESO //clock crystal externo 500Khz (low Power)
#use delay(clock=500kHz)

#use rs232(baud=9600,parity=N,xmit=PIN_C6,rcv=PIN_C7,bits=8,stream=SIGFOX)
#use rs232(DISABLE_INTS,baud=5000,parity=N,xmit=PIN_C3,rcv=PIN_C4,bits=8, force_sw, stream=USER)

#include <stdio.h>
#include <string.h>
#include <stdlib.h>

#define RX_PIC PIN_C6
#define TX_PIC PIN_C7
#define RST_WS PIN_B4
#define RST_EEPROM PIN_B1
#define SWITCH_FPF PIN_B5
#define LED PIN_C2
```

Figura 41 Segmento de programa del microcontrolador en la inicialización.

Fuente: Elaboración propia

El código emplea variables globales usados para almacenar la hora minutos y segundos, además la variable que acumula el conteo total de pulsos obtenidos del medidor de agua en la figura 42 se definen de la siguiente manera

```
int segundos=0, minutos=0, horas=1,h_ant=0;
unsigned int32 pulsos=0;
```

Figura 42 Variables empleadas en el programa.

Fuente: Elaboración propia

El código inicia deshabilitando los periféricos que no se hará usar, para disminuir el consumo de energía, luego se hace un parpadeo de leds para indicar que el microcontrolador inicia sin inconvenientes en su funcionamiento en la figura 43 se muestra el segmento de código.

```
void main()
{
  setup_adc(ADC_OFF);
  setup_vref(VREF_OFF);
  setup_spi(SPI_DISABLED);
  setup_ccp1(CCP_OFF);
  setup_wdt(WDT_OFF);

  fprintf(USER,"Iniciando... "); //imprimir puerto serie para usuario
  for(int p=0; p<=30; p++){
    output_toggle(LED);
    delay_ms(25);
  }
  output_low(LED);
}
```

Figura 43 Inicialización de código de microcontrolador.

Fuente: Elaboración propia

Luego, se procede a configurar los periféricos de interrupción externa por flanco de subida en el pin RB0 para la adquisición de señales de pulso del medidor de agua. También se procede a configurar la interrupción por desbordamiento del *timer 1* alimentado con la frecuencia del oscilador externo de 32.768kHz, con el fin de generar 1 segundo en tiempo real, que servirá posteriormente como base para temporizar de manera exacta los envíos de datos. Se muestra en la figura 44 el bloque de código.

```
//setup_timer_1 (T1_EXTERNAL | T1_ENABLE_SOSC |T1_DIV_BY_1); //clock crystal secondary external
setup_timer_1 (T1_INTERNAL | T1_ENABLE_SOSC |T1_DIV_BY_1); //clock interno secundario lfintrcio

set_timer1(32768); //oscilador de 32768Khz, desbordamiento cada segundo
enable_interrupts(INT_TIMER1);
ext_int_edge(L_TO_H);
enable_interrupts(INT_EXT);
enable_interrupts(GLOBAL);
```

Figura 44 Configuración de interrupción externa y desbordamiento de timer 1 cada segundo.
Fuente: Elaboración propia

Para proceder a habilitar la subrutina de interrupción externa y *timer 1* respectivamente. Se definen las funciones con la macros #INT_EXT cada vez que se detecta un pulso se ejecutará automáticamente la acción de incrementar en 1 la variable “pulsos”, esta variable servirá para almacenar el conteo de los pulsos que emite el medidor de agua.

En la subrutina de macros #INT_TIMER1, cada vez que se desborde el *timer 1* en un lapso de 1 segundo, la variable “segundos” se incrementara en 1 hasta llegar a 59 segundos y se procederá a aumentar en 1 la variable “minutos”, luego que la variable minutos llegue 60, la variable “horas” se incrementara en 1 hasta llegar a 24 y volver a 0 todas las demás variables. Este ciclo se repetirá con el fin de generar un reloj en tiempo real. En la figura 45 se muestra el segmento de código.

```

#INT_EXT
void EXT_isr(void)
{
    pulsos++; //conteo de pulsos
}

#INT_TIMER1
void TIMER1_isr(void)
{
    set_timer1(32768); //recargar el timer 1
    output_toggle(LED);
    if (++segundos>59) {
        segundos=0;
        if(++minutos>59){
            minutos=0;
            horas=horas+1;
            if(++horas>23){
                horas=0;
            }
        }
    }
}

```

Figura 45 Subrutinas para interrupción externa y timer 1.

Fuente: Elaboración propia

En el bucle principal se tienen a los bloques para enviar un resumen de información al usuario por el puerto serial definido como USER, en cual se envía la hora del microcontrolador y el acumulado de pulsos hasta el momento, esto cada 1 minuto.

En el siguiente bloque de código se consulta si la hora ha cambiado para proceder a preguntar si es la hora 1. Si es así, se procede a ejecutar las acciones para encender el MODEM SFM10R4 y enviar comandos AT para la transmisión de información. Previamente se convierte a la variable “pulsos” de tipo int32 a formato en hexadecimal por medio de la función “*fprintf*”, luego de transmitir el comando con la información se procede a apagar al MODEM. ¹⁰ En la figura 46 se muestra el bloque de código.

```

while(TRUE) //bucle principal
{
    if(segundos == 59){ //mostrar datos cada minuto
        fprintf(USER, "RTC: %02u:%02u:%02u | Pulsos: %lu\n\r", horas, minutos, segundos, pulsos);
        delay_ms(500);
    }

    if(horas != h_ant){
        h_ant=horas;
        if(horas==1){
            //if(1){
            fprintf(USER, " TRANSMITIR AHORA...\n\r");
            output_high(SWITCH_FPF); //encender Switch para energizar modem
            delay_ms(100);
            fprintf(USER, "AT\r\n");
            fprintf(SIGFOX, "AT\r\n");
            delay_ms(100);
            fprintf(USER, "AT$GI?\r\n");
            fprintf(SIGFOX, "AT$GI?\r\n");
            delay_ms(100);
            fprintf(USER, "AT$RC\r\n");
            fprintf(SIGFOX, "AT$RC\r\n");
            delay_ms(500);
            fprintf(USER, "AT$SF=%lx\r\n", pulsos);
            fprintf(SIGFOX, "AT$SF=%lx\r\n", pulsos);
            output_low(RST_WS);
            output_float(RST_WS);
            output_low(SWITCH_FPF); //apagar Switch para energizar modem
        }
    }
}
}

```

Figura 46 Bucle principal del código.
Fuente: Elaboración propia

3.2.4 Pruebas.

2 a. Circuito de simulación

En base al circuito electrónico diseñado y mostrado en la figura 38, Se realiza la simulación en el Software Isis de Proteus. con licencia de la empresa TECA. Se elige el microcontrolador PIC16LF1516 que es simulable y se agregan los periféricos necesarios para poner en marcha. En las propiedades del microcontrolador, se procede a cargar el archivo hexadecimal producido luego de la compilación del código de *PIC C compiler*. Y se configura la frecuencia de operación a 500KHz en la figura 47 se muestra el circuito de simulación.

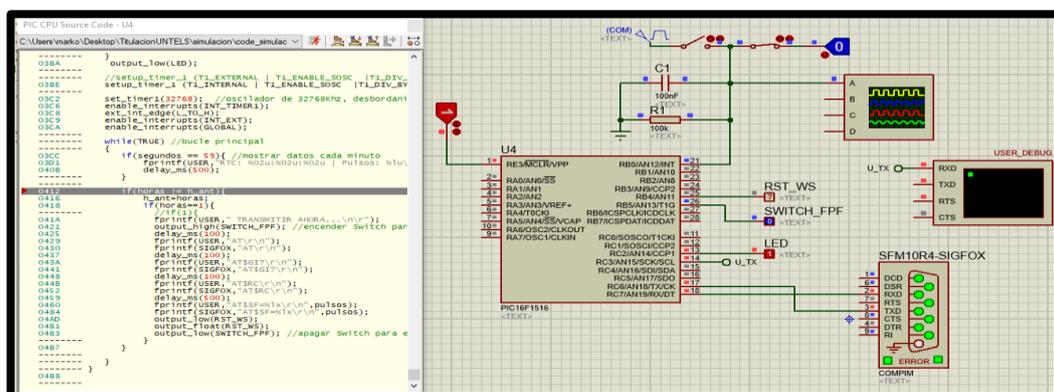


Figura 47 Simulación del circuito de bajo consumo.
Fuente: Elaboración propia

b. Simulación de adquisición de pulsos

La adquisición de señal se realiza por medio del pin RB0 del microcontrolador este pin cuenta con el periférico de interrupción externa. Este periférico asegura que la señal de pulsos sea contabilizada correctamente. Para la simulación se considera la entrada de señal de un tren de pulsos a 10 Hz, el programa contabilizará los pulsos en flanco de subida. Se emplea la terminal virtual de Proteus para observar el comportamiento del código y mostrar los datos vía comunicación serial.

10 En la figura 48 se muestra la simulación.

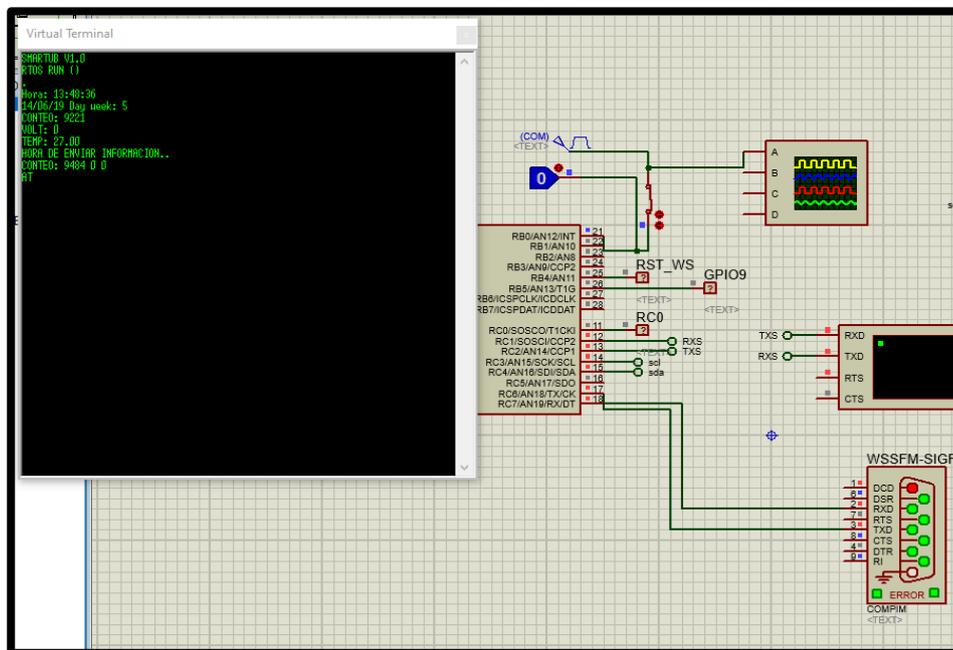


Figura 48 Simulación de adquisición de pulsos.
Fuente: Elaboración propia

f. Simulación de funcionamiento del Temporizador 1

Se realiza la simulación en el software Proteus, empleando una terminal virtual es posible visualizar el funcionamiento del *timer 1* que produce un segundo como base de tiempo para el RTC interno. Es posible temporizar el envío de información de forma periódica como se muestra en la figura 48.

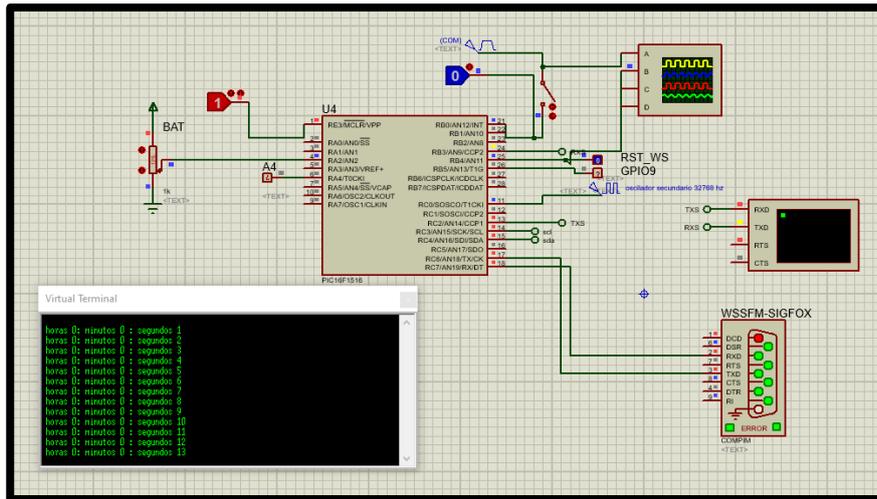


Figura 49 Simulación del funcionamiento del Timer1.
Fuente: Elaboración propia

g. Simulación de transmisión de datos

Para realizar la simulación de transmisión de datos a la red de Sigfox se emplea una terminal serial virtual *COMPIM* disponible en la librería de Proteus. Este puerto virtual realiza un puente con el puerto serial físico de la computadora, donde se realizó la conexión física con un MODEM SFM10R4. En la figura 50 se muestra la secuencia de transmisión de datos.

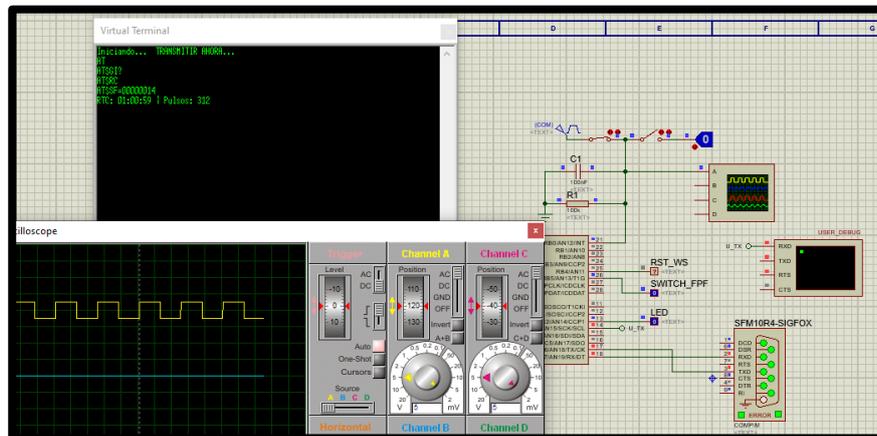


Figura 50 Simulación de transmisión de pulsos contabilizados empleando MODEM SFM10R4.
Fuente: Elaboración propia

3.2.5 Validaciones

a. Fabricación del sistema electrónico de baja potencia

Se realizó la fabricación de la PCB en la empresa JLPCB de China y se procedió a ensamblar los componentes de formato SMD en las instalaciones de la empresa TECA PERU SAC. Para realizar la soldadura se emplea un horno

Infrarrojo calibrado a la temperatura fusión de la pasta de estaño, previamente los componentes han sido colocados en sus respectivos *PADS*. Para la soldadura de la antena helicoidal T10, se emplea una soldadura convencional con un Cautín. El circuito ensamblado se muestra en la figura 51.

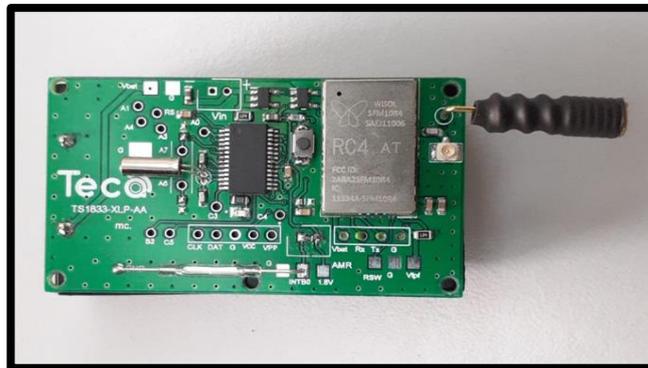


Figura 51 Tarjeta electrónica de bajo consumo con comunicación Sigfox ensamblada.
Fuente: Elaboración propia

Para evaluar el funcionamiento del circuito, se procedió a cargar el código hexadecimal en la memoria flash del microcontrolador PIC16LF1516 empleando el programador modelo PICKIT 3 del fabricante Microchip.

b. Consumo de corriente

Las mediciones de consumo de corriente del circuito se realizan con un multímetro conectado en serie con la alimentación de las baterías alcalinas, en la figura 52 se comprueba que existe un consumo de 67 μA en estado de operación activa.

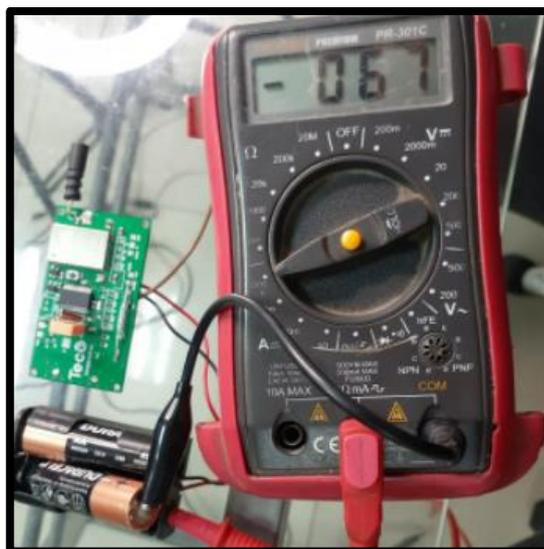


Figura 52 Consumo promedio de corriente del circuito electrónico.
Fuente: Elaboración propia

c. Cálculo de autonomía del sistema electrónico

Con la medición del consumo de corriente de 67 uA se puede calcular el tiempo de operación del circuito electrónico, tomando como referencia la ecuación 12 y reemplazando el valor de corriente de consumo en aplicación I_{app} por 67uA en la ecuación 17 se puede obtener con exactitud la autonomía del circuito operando con batería.

Se obtiene la ecuación (17):

$$2.8 = \frac{\left(24 * 67 * 10^{-6} + 3 * 1 * 0.230 * \frac{2.08}{3600}\right) * N_{aut}}{1 - \frac{24 * 0.9 * 1095}{876000}} \quad (17)$$

Resolviendo, se tiene que la autonomía de operación del sistema en días es:

$$N_{aut} = 1357.67 \quad (18)$$

Donde la autonomía en operación con baterías N_{aut} es de 1357.67 días o 3.7 años en funcionamiento continuo. Con este resultado se comprueba que el circuito puede operar por más de 3 años sin ningún inconveniente.

d. Adquisición de pulsos del medidor Elster M170 en banco de pruebas

Para las pruebas finales, el circuito electrónico es conectado junto al medidor de agua Elster M170 que se encuentra instalado en un banco de pruebas compuesto por un circuito de tuberías, llaves de agua y una bomba de agua que impulsa el flujo en sentido horario. El banco de pruebas está dentro de las instalaciones de la empresa TECA PERU S.A.C. y se muestra en la figura 53.



Figura 53 Vista superior de banco de pruebas en las instalaciones de la empresa TECA PERU S.A.C.
Fuente: Elaboración propia

Los cables de salida de pulsos del medidor de agua Elster M170 son soldados a la PCB como se muestra en la figura 54, y se deja funcionando por 7 días



Figura 54 Conexión de cable de salida de pulsos con tarjeta electrónica
Fuente: Elaboración propia

Por medidas de precaución se utiliza un case protector de propiedad de la empresa que contiene al circuito y lo protegerá de la humedad durante su operación, se muestra en la figura 55 la instalación final.



Figura 55 Circuito de baja potencia instalado en el medidor de agua Elster.
Fuente: Elaboración Propia

De la figura 54 se puede apreciar que el medidor tiene contabilizado hasta el momento en sus tambores 18,768.00 Litros antes de que la tarjeta electrónica contabilizara los pulsos del medidor. En la Tabla 18 se muestra los datos que han sido recopilados en un lapso de 7 días. Tanto en el medidor físico como en la plataforma *Backend Sigfox*. La bomba de agua del banco de pruebas es encendida automáticamente 1 vez al día por 10 minutos.

Tabla 19

Mediciones registradas en el medidor de agua

Acumulado del medidor Elster (Ltrs)	Consumo de Medidor Elster (Ltrs)	Acumulado de Pulsos	Consumo de Pulsos	Hora de registro
18,768	0	0	0	13:11:49
18,976	208	208	208	13:11:52
19,188	212	420	212	13:11:54
19,399	211	631	211	13:11:51
19,611	212	843	212	13:11:52
19,823	212	1055	212	13:11:51
20,034	211	1266	211	13:11:52

Fuente: Elaboración propia

Se puede verificar que la información registrada es incremental, para determinar el consumo se realiza una resta entre el acumulado actual menos el anterior, Se aprecia que en la columna “Consumo de medidor Elster” y “Consumo de pulsos”, los valores son idénticos, por lo que se puede deducir que el error de medición en la adquisición de señal del medidor es de 0%.

c. Verificación de la comunicación hacia la plataforma Backend Sigfox

Se puede corroborar que la información es transmitida inalámbricamente a internet y es visualizada en la plataforma *Backend Sigfox*, los datos son mostrados como registros históricos, además se observa que el nivel de intensidad de señal de la transmisión es de color verde. En la figura 55 se muestra la interface Backend Sigfox junto a las transmisiones del dispositivo.

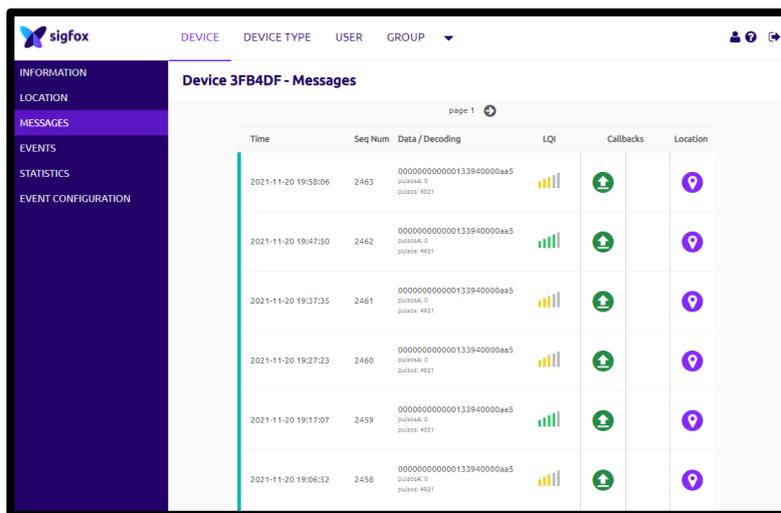


Figura 56 Datos de consumo de agua visualizados en la web Backend Sigfox.
Fuente: Elaboración propia

d. Medición física de la señal inalámbrica

Se emplea un dispositivo radio definido por software o SDR modelo RTL, con el cual se puede comprobar la emisión de señales electromagnéticas en el medio que es generado por el MODEM SFM10R4 al transmitir un mensaje, se comprueba que la frecuencia de la señal Sigfox en RC4 de 920.819 MHz. Además se verifica la tecnología del protocolo Sigfox denominado *Ultra Narrow Band* o UNB en el cual la señal ocupa un pequeño ancho de 192 KHz banda con una transmisión en forma de 3 pulsos que logra fácilmente superar el piso de ruido en el medio.

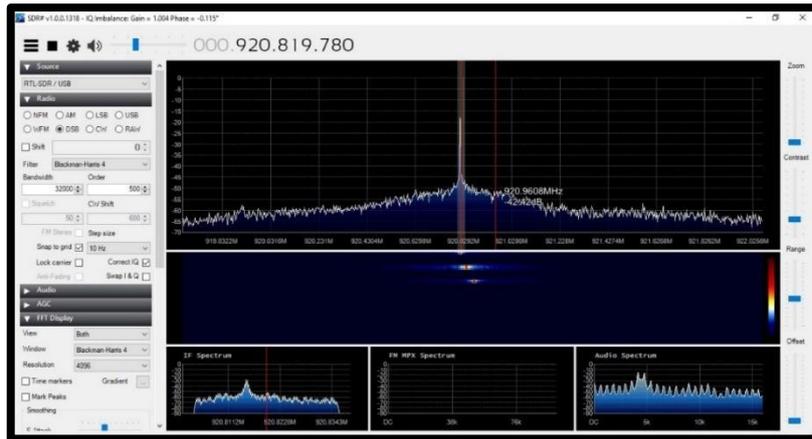


Figura 57 Señal de radiofrecuencia del MODEM SFM10R4. Se transmite la información al con una duración de 3S.

Fuente: Elaboración propia.

3.3 RESULTADOS

Con el trabajo desarrollado se logró obtener un diseño de sistema electrónico de bajo consumo de energía, además se adecua a las necesidades comerciales de la empresa TECA PERU S.A.C. Con este sistema la empresa pueden ofrecer pruebas piloto a algunas EPS's como Sedam Huancayo, los requerimientos en cuanto a medición remota fueron cubiertos.

El costo estimado del sistema electrónico de baja potencia fue de 28.7 USD que incluyen los costos de los componentes electrónicos y el costo de fabricación de la PCB. En la Tabla 19 se muestran resultados del circuito que fueron obtenidos.

Tabla 20

Resultados obtenidos en el diseño del sistema electrónico

Indicador	Esperado	Obtenido	Cumple con requerimiento de EPS's
Consumo de corriente	87.05uA	67uA	Si
Autonomía de sistema	3 años	3.7 años	Si
Dimensiones del circuito	57.5x32.5cms	57.5x32.5cms	Si
Error en la adquisición de señales del medidor	8%	0%	Si
Recepción de mensajes en Backend Sigfox por periodo de pruebas de 7 días	7Mensajes/7dias	7mensajes/7Dias	Si
Veces que se reinició o dejó de operar el sistema electrónico.	0	0	Si

Fuente: Elaboración propia

CONCLUSIONES

1. El sistema electrónico diseñado obtuvo una autosuficiencia estimada es de 3.7 años, considerándose una transmisión de 1 mensaje/día y una auto descarga de baterías de 0.9% por año, se cumple los requerimientos de las EPS's de operación ininterrumpida en la medición remota de consumo de agua.
2. Mediante el análisis y la revisión de las hojas de datos de los microcontroladores de baja potencia, MODEMS Sigfox, antenas y baterías se eligió la lista de componentes electrónicos para el diseño del circuito electrónico de bajo consumo con un precio de 28.7 USD por circuito.
3. Mediante el diseño del sistema electrónico y elaboración del algoritmo en lenguaje C, se generó una tarjeta circuito impreso ensamblado y se comprobó el funcionamiento en la adquisición de señales de pulsos del medidor Elster M170 en un banco de pruebas, verificándose la transmisión de datos hacia plataforma *Backend Sigfox* por un lapso de 7 días.
4. Con la medición de corriente empleando un amperímetro en serie a la alimentación de las baterías alcalinas hacia el circuito, se obtuvo una corriente de 67uA en operación activa, y con el empleando un dispositivo SDR, se logró medir la frecuencia de operación del MODEM SFM10R4 en 920.8 MHz con mensajes que son transmitidos 3 veces en un ancho de banda de 192KHz, los mensajes son recepcionados con una señal óptima.

RECOMENDACIONES

1. Usualmente la ubicación de los medidores de agua en el país es subterránea y húmeda, se recomienda emplear un chasis o *case* de tipo impermeable para evitar que los componentes electrónicos y baterías sufran posibles daños por sulfatación o corrosión.
2. Para una óptima adquisición de señales de pulsos de los medidores de agua, se recomienda para el circuito de *Pull-Down* que la resistencia no sea mayor a un valor de 1 Mega ohm, con esto se evita el ingreso de ruido eléctrico atreves del pin del microcontrolador.
3. Al utilizar baterías alcalinas como fuente de energía, se recomienda que estas no sean sometido a altas temperaturas ya que podría causar derrames de químicos internos, generando cortocircuitos y deterioros en la funcionalidad de los componentes electrónicos.
4. Usualmente cuando se emplean antenas soldadas en una PCB, se recomienda emplear un plano de tierra lo suficientemente grande, generalmente estas dimensiones pueden ser determinadas con exactitud en laboratorios de calibración o laboratorios de *tunning* de antenas.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- aguasresiduales. (26 de 5 de 2021). *www.aguasresiduales.info*. Obtenido de aguasresiduales Web site:
<https://www.aguasresiduales.info/revista/noticias/sabesp-despliega-92-000-medidores-de-agua-intelige-M36cl>
- Angulo Martínez J., A. U. (1997). *Microcontroladores PIC, La solución en un chip* Editorial Paraninfo.
- Angulo Martínez J., A. U. (1998). *Implementación de un Sistema de Desarrollo Utilizando Microcontroladores PIC, Microchip Technology*.
- Assured Automation. (2017). *Assured Automation*. Obtenido de Assured Automation: <https://assuredautomation.com/pulse-output-water-meters/>
- Badger Meter. (6 de febrero de 2020). *www.badgermeter.com*. Obtenido de Badger Meter: <https://www.badgermeter.com/es-es/blog-es-es/amr-vs-ami-cual-es-la-diferencia/>
- Bravo, E. C., & Calvache, B. A. (2020). <http://psi.univalle.edu.co>. Obtenido de <http://psi.univalle.edu.co>: <https://docplayer.es/171250219-Interoperabilidad-en-infraestructuras-de-medicion-avanzada-ami.html>
- Custom Computer Services, Inc. (s.f.). *ccsinfo.com*. Obtenido de <https://www.ccsinfo.com/>:
<https://www.ccsinfo.com/content.php?page=compilers>
- Diario Gestión. (12 de 10 de 2017). *Gestión*. Obtenido de <https://gestion.pe/>:
<https://gestion.pe/blog/ainfraestructura/2017/10/problematika-de-las-eps-un-problema-con-solucion.html/>
- eembc. (2012). *ULP Mark*. Obtenido de <https://www.eembc.org/>:
<https://www.eembc.org/ulpmark/>
- Emi Water Meter. (2019). *Emi Water Meter*. Obtenido de es.emiwatermeter.com:
https://es.emiwatermeter.com/pulse-output-multi-jet-domestic-remote-water-meter_p40.html
- FCC ID. (2017). *fccid.io*. Obtenido de <https://fccid.io/>:
<https://fccid.io/2ABA2SFM10R4/User-Manual/Users-Manual-3311113>

- Gutiérrez, L. G. (2009). *TEORÍA DE LA MEDICIÓN DE CAUDALES Y VOLÚMENES DE AGUA*. Madrid: Centro Español de Metrología.
- Herrera, L. F. (2006). *Telemetría y telegestión en procesos industriales mediante canales inalámbricos Wi Fi utilizando instrumentación virtual y dispositivos PDA (Personal Digital Assitant)*. Obtenido de www.dtic.ua.es:
<https://www.dtic.ua.es/grupoM/recursos/articulos/JDARE-06-J.pdf>
- Hinojo, J. M. (2016). *Diseño de circuitos electrónicos de ultra-bajo consumo en tecnologías nanométricas*. Obtenido de idus.us.es:
https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/52366/tesisJMHM_corta.pdf;jsessionid=4686777C04AE4DAC61D1DE5C1EE3293B?sequence=1
- Iagua. (2019). *Medidor de agua*. Obtenido de <https://www.iagua.es/respuestas/que-es-caudalimetro-y-cuantos-tipos-hay>:
Recuperado de <http://www.iagua.es>
- INACAL. (2018). *INACAL. NMP 005-1: MEDIDORES DE AGUA PARA AGUA POTABLE FRÍA Y AGUA CALIENTE*. Obtenido de <https://www.inacal.gob.pe/repositorioaps/data/1/1/5/jer/normasmetrologicasperuanas/files/NMP-005-1-2018.pdf>.
- Maldonado, G. (2020). *Importancia de la micromedición*. Obtenido de Plataforma digital única del Estado Peruano:
<https://www.gob.pe/institucion/otass/informes-publicaciones/725810-importancia-de-la-micromedicion>
- Microchip. (s.f.). *Microchip*. Obtenido de <https://www.microchip.com/>:
<https://www.microchip.com/en-us/product/PIC16F1516>
- MTC, M. d. (2007). *DECRETO SUPREMO Nº 020-2007-MTC. DECRETO SUPREMO Nº 020-2007-MTC*. Lima, Lima, Perú: El Peruano.
- programmerclick. (s.f.). *programmerclick*. Obtenido de programmerclick.com:
<https://programmerclick.com/>
- Research Gate. (2018). *Research Gate*. Obtenido de Research Gate:
https://www.researchgate.net/figure/Figura-4-Esquema-funcional-y-electrico-del-interruptor-magnetico-tipo-reed_fig2_322014473
- Roch, E. (2020). <https://transistores.info/>. Obtenido de Transistores:
<https://transistores.info/transistor-cmos/>
- Savant, Roden, & Carpenter. (1999). *Diseño electrónico*. Mexico: S.A. ALHAMBRA MEXICANA.

Seong Ji Industrial CO., LTD. (s.f.). *Seong Ji*. Obtenido de <http://support.seongji.co.kr/>: <http://support.seongji.co.kr/>

Seong Ji Industrial Co., LTD. (s.f.). *support.seongji*. Obtenido de <http://support.seongji.co.kr/>: http://support.seongji.co.kr/wp-content/uploads/2018/07/DS_WSSFM10R4AT_REV07_190901.pdf

Sigfox. (2017). *Battery compatibility with Sigfox technology*. Labège.

Sigfox. (2017). *Sigfox.com*. Obtenido de Sigfox.com: <https://www.sigfox.com/en/news/utility-companies-save-time-and-lower-costs-smart-water-meters>

Sigfox. (s.f.). *build.sigfox.com*. Obtenido de <https://build.sigfox.com/>: <https://build.sigfox.com/sigfox-radio-configurations-rc>

Silex technology. (2020). *www.silextechnology.com*. Obtenido de www.silextechnology.com: <https://www.silextechnology.com/unwired/802.11-wi-fi-halow-wp>

Stankovic, M., Hasanbeigi, A., & Neftenov, N. (2020). *Uso de tecnologías de la 4RI en agua y saneamiento en América Latina y el Caribe*. Latin America : Banco Interamericano de Desarrollo .

SUNASS. (2021). *Benchmarking Regulatorio 2021 de las empresas prestadoras (EP)*. Lima: Direccion de Fiscalizacion .

ThingsLog. (2019). *ThingsLog*. Obtenido de ThingsLog: <https://thingslog.com/pulse-output/>

Toshiba. (s.f.). *toshiba.semicon-storage.com*. Obtenido de toshiba.semicon-storage.com: https://toshiba.semicon-storage.com/us/semiconductor/knowledge/faq/linear_low-dropout-voltage/low-dropout14.html

Vergara, M. (s.f.). *www2.elo.utfsm.cl/*. Obtenido de <http://www2.elo.utfsm.cl/>: <http://www2.elo.utfsm.cl/~elo383/apuntes/InformeBaterias.pdf>

ANEXO 02: Código fuente

```
#include <16LF1516.h>

#fuses XT, NOWDT, NOMCLR, NOPROTECT, NOBROWNOUT, NODEBUG, LVP,
NOVCAP, NOFCMEN, NOIESO //clock crystal externo 500Khz (low Power) (funcional!)
//

##FUSES
LVP, XT, NOCLKOUT, NOCKS, NOFCMEN, MCLR, PUT, NOLPBOR, NOBROWNOUT, PPS1WAY, NO
STVREN, NODEBUG, NOWDT, NOSCAN,
#use delay(clock=500kHz)

28 #use rs232(baud=9600,parity=N,xmit=PIN_C6,rcv=PIN_C7,bits=8,stream=SIGFOX)
#use rs232(DISABLE_INTS,baud=5000,parity=N,xmit=PIN_C3,rcv=PIN_C4,bits=8, force_sw,
stream=USER)

#include <stdio.h>
48 #include <string.h>
#include <stdlib.h>

#define RX_PIC PIN_C6
#define TX_PIC PIN_C7
#define RST_WS PIN_B4
#define RST_EEPROM 71 PIN_B1
#define SWITCH_FPF PIN_B5

#define LED PIN_C2

int segundos=0, minutos=0, horas=1,h_ant=0;
unsigned int32 pulsos=0;

1 #INT_EXT
void EXT_isr(void)
{
    pulsos++; //conteo de pulsos
}

1 #INT_TIMER1
void TIMER1_isr(void)
```

```

{

set_timer1(32768); //recargar el timer 1
output_toggle(LED);
  if (++segundos>59) {
    segundos=0;
    if(++minutos>59){
      minutos=0;
      horas=horas+1;
      if(++horas>23){
        horas=0;
      }
    }
  }
}

```

```

void main()
{
  setup_adc(ADC_OFF);
  setup_vref(VREF_OFF);
  setup_spi(SPI_DISABLED);
  setup_ccp1(CCP_OFF);
  setup_wdt(WDT_OFF);

  fprintf(USER,"Iniciando... "); //imprimir puerto serie para usuario
  for(int p=0; p<=30; p++){
    output_toggle(LED);
    delay_ms(25);
  }
  output_low(LED);

```

```

//setup_timer_1 (T1_EXTERNAL | T1_ENABLE_SOSC |T1_DIV_BY_1); //clock crystal
secondary external
//setup_timer_1 (T1_INTERNAL | T1_ENABLE_SOSC |T1_DIV_BY_1); //clock interno
secundario lfinticio

```

```

set_timer1(32768); //oscilador de 32768Khz, desbordamiento cada segundo
enable_interrupts(INT_TIMER1);
ext_int_edge(L_TO_H);
enable_interrupts(INT_EXT);
enable_interrupts(GLOBAL);

```

```

while(TRUE) //bucle principal
{
    if(segundos == 59){ //mostrar datos cada minuto
        fprintf(USER,"RTC: %02u:%02u:%02u | Pulsos:
%lu\n\r",horas,minutos,segundos,pulsos);
        delay_ms(500);
    }

    if(horas != h_ant){
        h_ant=horas;
        if(horas==1){
            //if(1){
                fprintf(USER," TRANSMITIR AHORA...\n\r");
                output_high(SWITCH_FPF); //encender Switch para energizar modem
                27 delay_ms(100);
                fprintf(USER,"AT\r\n");
                fprintf(SIGFOX,"AT\r\n");
                delay_ms(100);
                fprintf(USER,"AT$GI?\r\n");
                fprintf(SIGFOX,"AT$GI?\r\n");
                delay_ms(100);
                27 fprintf(USER,"AT$RC\r\n");
                fprintf(SIGFOX,"AT$RC\r\n");
                delay_ms(500);
                fprintf(USER,"AT$SF=%lx\r\n",pulsos);
                fprintf(SIGFOX,"AT$SF=%lx\r\n",pulsos);
                output_low(RST_WS);
                output_float(RST_WS);
                output_low(SWITCH_FPF); //apagar Switch para energizar modem
            }
        }
    }
}
}

```



PIC16(L)F1516/7/8/9

28/40/44-Pin Flash Microcontrollers with XLP Technology

Devices Included In This Data Sheet

- PIC16F1516
- PIC16F1517
- PIC16F1518
- PIC16F1519
- PIC16LF1516
- PIC16LF1517
- PIC16LF1518
- PIC16LF1519

High-Performance RISC CPU

- C Compiler Optimized Architecture
- Only 49 Instructions
- Operating Speed:
 - DC – 20 MHz clock input @ 2.5V
 - DC – 16 MHz clock input @ 1.8V
 - DC – 200 ns instruction cycle
- Interrupt Capability with Automatic Context Saving
- 16-Level Deep Hardware Stack with Optional Overflow/Underflow Reset
- Direct, Indirect and Relative Addressing modes:
 - Two full 16-bit File Select Registers (FSRs)
 - FSRs can read program and data memory

Memory

- Up to 28 Kbytes Linear Program Memory Addressing
- Up to 1024 Bytes Linear Data Memory Addressing
- High Endurance Flash Data Memory (HEF):
 - 128B of nonvolatile data storage
- 100K Erase/Write Cycles

Flexible Oscillator Structure

- 16 MHz Internal Oscillator Block:
 - Software selectable frequency range from 16 MHz to 31 kHz
- 31 kHz Low-Power Internal Oscillator
- External Oscillator Block with:
 - Four crystal/resonator modes up to 20 MHz
 - Three external clock modes up to 20 MHz
- Fail-Safe Clock Monitor:
 - Allows for safe shutdown if peripheral clock stops
- Two-Speed Oscillator Start-up
- Oscillator Start-up Timer (OST)

Analog Features

- Analog-to-Digital Converter (ADC):
 - 10-bit resolution
 - Up to 28 channels
 - Auto acquisition capability
 - Conversion available during Sleep
- Voltage Reference module:
 - Fixed Voltage Reference (FVR) with 1.024V, 2.048V and 4.096V output levels
- Temperature Indicator

eXtreme Low-Power (XLP) Management PIC16LF1516/7/8/9 with XLP

- Sleep mode: 20 nA @ 1.8V, typical
- Watchdog Timer: 300 nA @ 1.8V, typical
- Secondary Oscillator: 600 nA @ 32 kHz
- Operating Current: 30 μ A/MHz @ 1.8V, typical

Special Microcontroller Features

- Operating Voltage Range:
 - 2.3V-5.5V (PIC16F1516/7/8/9)
 - 1.8V-3.6V (PIC16LF1516/7/8/9)
- Self-Programmable under Software Control
- Power-on Reset (POR)
- Power-up Timer (PWRT)
- Low-Power Brown-out Reset (LPBOR)
- Extended Watchdog Timer (WDT)
- In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™) via Two Pins
- In-Circuit Debug (ICD) via Two Pins
- Enhanced Low-Voltage Programming (LVP)
- Programmable Code Protection
- Low-Power Sleep mode

Peripheral Highlights

- Up to 35 I/O Pins and 1 Input-Only Pin:
 - High current sink/source 25 mA/25 mA
 - Individually programmable weak pull-ups
 - Individually programmable interrupt-on-change (IOC) pins
- Timer0: 8-Bit Timer/Counter with 8-Bit Prescaler
- Enhanced Timer1:
 - 16-bit timer/counter with prescaler
 - External Gate Input mode
 - Low-power 32 kHz secondary oscillator driver
- Timer2: 8-Bit Timer/Counter with 8-Bit Period Register, Prescaler and Postscaler
- Two Capture/Compare (CCP) modules

ANEXO 04: Hoja de datos Modem SFM10R4



PBA RF Module

WSSFM10R4AT

Sigfox / Sub-1GHz

13mm x 20mm x 2.21mm

Version: 07

4. Absolute Maximum Ratings

Symbol	Parameter	Rating	Unit
VCC	Module input voltage	0 to 4.2	V
OT	Operating Temperature	-30 to +85	°C
ST	Storage Temperature	-40 to +125	°C

5. DC Characteristics

Symbol	Parameter	Min	Typ.	Max	Unit
VCC	Module input voltage	2.7	3.3	3.6	V
Current	Tx Current(@ +22.5dBm, MOD)	-	200	-	mA
	Rx Current	-	32	-	mA
	Sleep Current Deep Sleep Current		2.5 0.97		uA

6. I/O Specifications

Symbol	Parameter	Min	Typ.	Max	Unit
VIH	High level input voltage @VCC=3.3V	2.0			V
VIL	Low level input voltage @VCC=3.3V			0.8	V

ANEXO 05: Hoja de datos Medidor Elster M170

M 170i Multi-jet meter e^{sens} communication interface

- Multi-jet dry-dial meter for cold water
- Pre-equipped for communication modules
- Rotatable IP68 register with optional 45° reading design
- European Measuring Instruments Directive approval
- Complies with the requirements of ISO4064 and OIML R49



Performance characteristics

Nominal size	DN	mm	15	20
		inches	½	¾

Metrological performance acc. to ISO4064:2014

Measuring range	Q / Q_n	R160H	R125H
Permanent flowrate	Q_p m ³ /h	2.5	4
Overload flowrate	Q_o m ³ /h	3.1	5
Transitional flowrate	Q_t l/h	25	51.2
Minimum flowrate	Q_m l/h	15.6	32
Starting flow (typical)	l/h	6	8

Metrological performance acc. to ISO4064:1993

Class		C-H	B-H
Nominal flowrate	Q_n m ³ /h	1.5	2.5
Maximum flowrate	Q_{max} m ³ /h	3	5
Transitional flowrate	Q_t l/h	22.5	200
Minimum flowrate	Q_m l/h	15	50
Starting flow (typical)	l/h	6	8

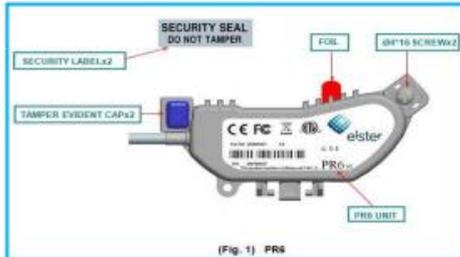
Technical characteristics

Maximum water temperature	°C	40
Maximum operating pressure	bar	16
Headloss at Q_{max}	bar	< 1
Degree of protection		IP68
Maximum reading	m ³	99999
Minimum reading	l	0.05

ANEXO 06: Hoja de datos salida de pulsos PR6 Elster

WIRING PR6 AND PR7

What PR6 and PR7 are used for



(Fig. 1) PR6

1. Elster PR6 inductive pulse unit.

Its fitted to the **V200/V210/V220**

and the **H4000P** series of meters



Remember to remove the foil tab before fitting the pulse unit to the meter!



(Fig. 2) PR7

2. Elster PR7 inductive pulse unit.

Its fitted to the **H4000, C4000 and S2000** series of inductive output meters



ANEXO 07: Hoja de datos de batería MN1500 Duracell



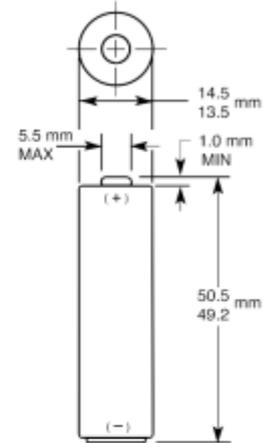
MN1500
Size: AA (LR6)

Alkaline-Manganese Dioxide Battery

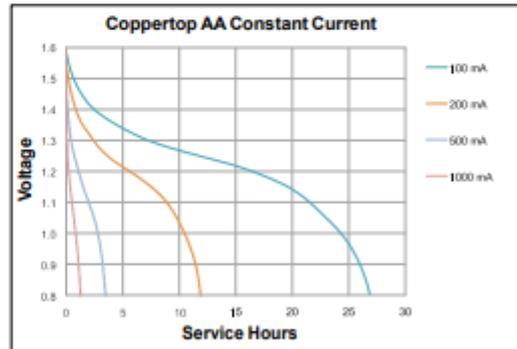
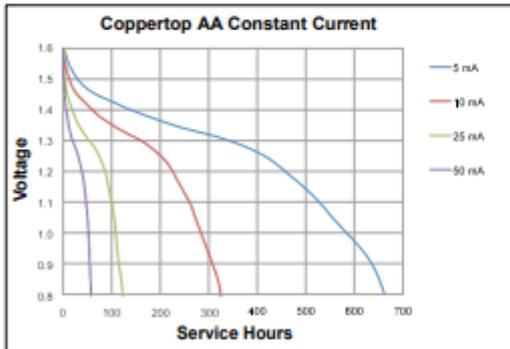
Zn/MnO₂



Nominal voltage	1.5 V
Impedance	120 m-ohm @ 1 kHz
Typical weight	24 g (0.8 oz)
Typical volume	8.4 cm ³ (0.5 in ³)
Terminals	Flat
Storage temperature range	5°C to 30°C (41°F to 86°F)
Operating temperature range	-20°C to 54°C (-4°F to 130°F)
Designation	ANSI: 15A IEC: LR6



Dimensions shown are IEC standards



Berkshire Corporate Park
Bethel, CT. 06801 U.S.A.
Telephone: Toll-free 1-800-544-5454
www.duracell.com

Delivered capacity is dependent on the applied load, operating temperature and cut-off voltage. Please refer to the charts and discharge data shown for examples of the energy/service life that the battery will provide for various load conditions.

● 17% de similitud general

Principales fuentes encontradas en las siguientes bases de datos:

- 17% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 2% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

FUENTES PRINCIPALES

Las fuentes con el mayor número de coincidencias dentro de la entrega. Las fuentes superpuestas no se mostrarán.

1	hdl.handle.net Internet	3%
2	repositorio.untels.edu.pe Internet	2%
3	docplayer.es Internet	1%
4	yumpu.com Internet	1%
5	repositorio.espe.edu.ec Internet	<1%
6	idus.us.es Internet	<1%
7	red.uao.edu.co Internet	<1%
8	pirhua.udep.edu.pe Internet	<1%
9	repositorio.upct.es Internet	<1%

10	es.scribd.com	Internet	<1%
11	wndgroup.io	Internet	<1%
12	gestion.pe	Internet	<1%
13	repositorio.unp.edu.pe	Internet	<1%
14	ptolomeo.unam.mx:8080	Internet	<1%
15	syscomblog.com	Internet	<1%
16	slideshare.net	Internet	<1%
17	FCA CONSULTORES AMBIENTALES S.A.C.. "PAMA del Fundo Blueberri...	Publication	<1%
18	repository.unad.edu.co	Internet	<1%
19	coursehero.com	Internet	<1%
20	es.slideshare.net	Internet	<1%
21	scribd.com	Internet	<1%

22	risisbi.uqroo.mx Internet	<1%
23	cdn.gob.pe Internet	<1%
24	de.slideshare.net Internet	<1%
25	repositorio.ucsg.edu.ec Internet	<1%
26	repositorio.upn.edu.pe Internet	<1%
27	embeddedrelated.com Internet	<1%
28	asm51.com.br Internet	<1%
29	biblioteca.usac.edu.gt Internet	<1%
30	repositorio.uncp.edu.pe Internet	<1%
31	repositorio.unajma.edu.pe Internet	<1%
32	repositorio.une.edu.pe Internet	<1%
33	matooma.com Internet	<1%

34	aprende.com	Internet	<1%
35	1library.co	Internet	<1%
36	doczz.es	Internet	<1%
37	programarfácil.com	Internet	<1%
38	patents.google.com	Internet	<1%
39	qdoc.tips	Internet	<1%
40	telecomunicacionesunmsm.blogspot.com	Internet	<1%
41	researchgate.net	Internet	<1%
42	repositorio.utp.edu.pe	Internet	<1%
43	eppm.com	Internet	<1%
44	przetargi.info	Internet	<1%
45	dropbox.com	Internet	<1%

46	ambito.com	Internet	<1%
47	repositorio.uigv.edu.pe	Internet	<1%
48	utpedia.utp.edu.my	Internet	<1%
49	repositorio.usac.edu.gt	Internet	<1%
50	TIGGEMANN, Henrique. "Análise e desenvolvimento de um inversor m...	Publication	<1%
51	sexoarer.weebly.com	Internet	<1%
52	bvsde.ops-oms.org	Internet	<1%
53	documents.mx	Internet	<1%
54	dokumen.pub	Internet	<1%
55	meggi.usuarios.rdc.puc-rio.br	Internet	<1%
56	repositorio.autonoma.edu.co	Internet	<1%
57	repositorio.ucv.edu.pe	Internet	<1%

58	repositorioacademico.upc.edu.pe	Internet	<1%
59	digitalavmagazine.com	Internet	<1%
60	repositorio.unam.edu.pe	Internet	<1%
61	Guerrero, Naylamp Martin Lopez. "Asignación de Espectro Radioeléctri...	Publication	<1%
62	artwater.20m.com	Internet	<1%
63	bibdigital.epn.edu.ec	Internet	<1%
64	documentop.com	Internet	<1%
65	pt.slideshare.net	Internet	<1%
66	repositorio.umsa.bo	Internet	<1%
67	repositoriodspace.unipamplona.edu.co	Internet	<1%
68	dspace.espol.edu.ec	Internet	<1%
69	plastico.com	Internet	<1%

70

profesionalreview.com

Internet

<1%

71

Kuppuswamy, Bharath Valluvakudi. "Development and implementation ...

Publication

<1%