

UNIVERSIDAD TECNICA DE COTOPAXI

DIRECCION DE POSGRADO



MAESTRIA EN ELECTROMECAÁNICA

MODALIDAD: PROYECTO DE INVESTIGACIÓN.

Título:

Desarrollo de un prototipo para transmitir inalámbricamente en tiempo real las variables de fondo de los yacimientos en sistemas electro sumergibles

Autor

Ing. Diego Fernando Zambrano Freire

Tutor

Mg. Byron Paúl Corrales Bastidas

LATACUNGA – ECUADOR

2021

AVAL DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Titulación “Desarrollo de un prototipo para transmitir inalámbricamente en tiempo real las variables de fondo de los yacimientos en sistemas electro sumergibles” presentado por Zambrano Freire Diego Fernando para optar por el título Magister en Electromecánica.

CERTIFICO.

Que dicho trabajo de investigación ha sido revisado en todas sus partes y se considera que reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación para la valoración por parte del Tribunal de Lectores que se designe y su exposición y defensa pública.

Latacunga, Noviembre, 11, 2021


.....
Mg. Byron Paúl Corrales Bastidas

CC. 050234776-8

AVAL DEL TRIBUNAL

El trabajo de titulación: Desarrollo de un prototipo para transmitir inalámbricamente en tiempo real las variables de fondo de los yacimientos en sistemas electro sumergibles, ha sido revisado, aprobado y autorizado su impresión y empastado, previo a la obtención del título de Magister en Electromecánica; el presente trabajo reúne los requisitos de fondo y forma para que el estudiante pueda presentarse a la exposición y defensa.

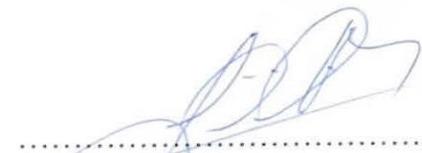
Latacunga, Diciembre, 09, 2021



Mg. Edwin Homero Moreano Martínez

CC.050260750-0

Presidente del tribunal



Mg. Jefferson Alberto Porras Reyes

CC. 070440044-9

Lector 2



Mg. Luigi Orlando Freire Martínez

CC. 050252958-9

Lector 3

DEDICATORIA

El presente trabajo lo dedico a mi compañera de vida, mi esposa Sandra, quien me brinda la fuerza y seguridad para alcanzar mi crecimiento personal y profesional, a mis hijos Esteban, Diego y Douglas, quienes son mi fuente de inspiración y a mis abuelitos maternos (Ignacio y Marina) que siempre están en mi corazón.

Diego

AGRADECIMIENTO

A Dios, por darme la vida y salud completa en estos momentos inhóspitos, a mi madre, sus consejos me enseñaron a tomar las oportunidades cuando se presentan, y a la Universidad Técnica de Cotopaxi con su personal docente de alto nivel incentivan el desarrollo de profesionales técnicos especialistas con el fin de aportar a la productividad de la provincia y del país.

Diego Fernando Zambrano Freire

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA.

Quien suscribe, declara que asume la auditoria de los contenidos y los resultados obtenidos en el presente trabajo de titulación.

Latacunga, Noviembre, 11, 2021



.....
Ing. Diego Fernando Zambrano Freire

CC. 0501654727

RENUNCIA DE DERECHOS

Quien suscribe, cede los derechos de autoría intelectual total y/o parcial del presente trabajo de titulación a la Universidad Técnica de Cotopaxi.

Latacunga, Noviembre, 11, 2021

Handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Zambrano y of' with a horizontal line above the 'o' and a small '3' below the 'o'.

.....
Ing. Diego Fernando Zambrano Freire

CC. 0501654727

AVAL DEL PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

Quien suscribe, declara que el presente Trabajo de Titulación: Desarrollo de un prototipo para transmitir inalámbricamente en tiempo real las variables de fondo de los yacimientos en sistemas electro sumergibles contiene las correcciones a las observaciones realizadas por los lectores en sesión científica del tribunal.

Latacunga, Diciembre, 09, 2021



Mg. Edwin Homero Moreano Martínez
CC.050260750-0

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
DIRECCIÓN DE POSGRADO
MAESTRÍA EN ELECTROMECAÁNICA

Título: Desarrollo de un prototipo para transmitir inalámbricamente en tiempo real las variables de fondo de los yacimientos en sistemas electro sumergibles

Autor: Zambrano Freire Diego Fernando

Tutor: Byron Paúl Corrales Bastida Mg.

RESUMEN

La validez y confiabilidad de la información representa una estrategia de liderazgo competitiva dentro de cualquier mercado. La importancia de la transmisión de los parámetros en la instalación de equipos electro sumergibles garantizan la correcta toma de decisiones en las operaciones, y determinan con precisión las variables a considerar para la puesta en marcha de los equipos de manera eficiente, adicional, se encuentran directamente relacionados con el seguimiento del tiempo de vida útil del sistema. El presente trabajo de titulación se basa en el diseño y desarrollo de un prototipo que permite la transmisión de los parámetros del yacimiento en tiempo real en la instalación de equipos electro sumergibles dentro de un ambiente seguro de trabajo. Por la cantidad de variables de seguimiento como presiones de entrada-descarga, temperaturas de entrada-motor de fondo, vibración del sistema, corrientes de fuga, considerable cobertura y capacidad limitada de transmitir alta cantidad de información, la tecnología LoRaWAN cumple todas las características mencionadas. El prototipo incorpora dos módulos, el emisor que obtiene los datos del panel de control, el cual registra las lecturas del sensor de fondo, posteriormente los datos son enviados al módulo receptor de manera inalámbrica, los datos recibidos por el módulo receptor son capturados y mediante la interfaz computacional que se encuentra conectada al módulo receptor se visualizan y almacenan las variables en tiempo real de manera puntual y grafica. Con la implementación del prototipo de comunicaciones inalámbricas en tiempo real se garantiza reducir los costos operativos y tiempo de operación

PALABRAS CLAVE: Yacimiento; inalámbrico; electro sumergibles; LoRaWAN; prototipo; interfaz.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
DIRECCIÓN DE POSGRADOS
MAESTRIA EN ELECTROMECAÁNICA

Title: Development of a prototype for real-time wireless transmission of reservoir background variables in electro-submersible systems.

AUTHOR: Zambrano Freire Diego Fernando

TUTOR: Mgs. Corrales Bastidas Byron Paúl

ABSTRACT

The validity and reliability of the information represents a competitive leadership strategy within any market. The importance of the transmission of parameters in the installation of electro-submersible equipment guarantees the correct decision making in operations, and accurately determines the variables to be considered for the efficient start-up of the equipment, in addition, they are directly related to the monitoring of the useful life of the system. This degree work is based on the design and development of a prototype that allows the transmission of reservoir parameters in real time in the installation of electro-submersible equipment in a safe working environment. Due to the number of monitoring variables such as inlet-discharge pressures, inlet-bottom motor temperatures, system vibration, leakage currents, considerable coverage and limited capacity to transmit a high amount of information, LoRaWAN technology meets all the above mentioned characteristics. The prototype incorporates two modules, the transmitter that obtains the data from the control panel, which records the readings of the background sensor, then the data are sent to the receiver module wirelessly, the data received by the receiver module are captured and through the computer interface that is connected to the receiver module, the variables are displayed and stored in real time in a timely and graphical manner. With the implementation of the prototype of wireless communications in real time, it is guaranteed to reduce operating costs and operation time.

KEYWORDS: Reservoir; wireless; electro submersible; LoRaWAN; prototype; interface.

Yo, Mg Marco Paúl Beltrán Semblantes con cédula de identidad número 0502666514 Licenciado en Ciencias de la Educación especialización Inglés con número de registro de la SENESCYT: 1020-06-701921; **CERTIFICO** haber revisado y aprobado la traducción al idioma inglés del resumen del trabajo de investigación con el título: "Desarrollo de un prototipo para transmitir inalámbricamente en tiempo real las variables de fondo de los yacimientos en sistemas electro sumergibles." de: Zambrano Freire Diego Fernando aspirante a Magister en Electromecánica.


Mg. Marco Paúl Beltrán Semblantes
0502666514



CENTRO
DE IDIOMAS

Latacunga, diciembre, 09, 2021

ÍNDICE DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN	14
CAPITULO I. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	20
1.1. Introducción y objetivo del capítulo	20
1.2 Antecedentes de la investigación o fundamentación del estado de arte	20
1.3. Fundamentación teórica	22
1.3.1. Yacimientos de producción petrolera	22
1.3.2. Sistemas de Levantamiento Artificial	25
1.3.3. Comunicación Inalámbrica con IoT	34
1.4. Descripción del objeto de estudio	40
1.5 Conclusiones	41
CAPITULO II. MATERIALES Y MÉTODOS	42
2.1. Introducción y objetivo del capítulo	42
2.2. Metodología de cálculo	42
2.2.1. Análisis de los diferentes tipos de tecnologías vinculadas al IoT	43
2.2.2. Diseño del prototipo	45
2.2.3. Implementación del prototipo	48
2.2.4. Conexión de los módulos de comunicación AS66-DTU20	50
2.2.4. Conclusiones	61
CAPITULO III. ANÁLISIS DE RESULTADOS	62
3.1. Introducción y objetivo del capítulo	62
3.2. Análisis de resultados	62
3.3. Valoración técnica y económica de los resultados	69
3.3.1. Conclusiones	72
Bibliografía	73
ANEXOS	77
Anexo 1. Chip SI4463	77
Anexo 2. AS66-DTU20	82
Anexo 3. Dirección Modbus del panel del sensor	85
Anexo 4. Topología de la red. Diagrama de flujo del módulo emisor	86
Anexo 5. Topología de la red. Diagrama de flujo del módulo receptor	87

Anexo 6. Certificación de la transmisión de datos del prototipo.	88
Anexo 7. Plano estructural del prototipo.	89

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Actividades de acuerdo con los objetivos específicos	17
Tabla 2. Redes de comunicación utilizadas en IoT	37
Tabla 3. Especificaciones eléctricas del módulo inalámbrico AS66-DTU20	48
Tabla 4. Especificaciones del instrumento de fondo	50
Tabla 5. Comparativa de variables de transmisión inalámbrica	67
Tabla 6. Costos operativos de la operación BES	68
Tabla 7. Cronograma de captura de medidas sin el prototipo de comunicaciones	71

INDICE DE GRAFICOS

Fig. 1. Daño de formación según Hawkins	23
Fig. 2. Curva de IPR.	24
Fig. 3. IPR de Vogel.	24
Fig. 4. Punto de operación de IRP y VLP	25
Fig. 5. Bombeo electro sumergible	26
Fig. 6. Esquema de una instalación de Bombeo mecánico	27
Fig. 7. Bombeo hidráulico	27
Fig. 8. Partes del cabezal del pozo	28
Fig. 9. Caja de venteo.	29
Fig. 10. Transformador elevador.	29
Fig. 11. Variador de frecuencia.	30
Fig. 12. Sensor de fondo	30
Fig. 13. Partes del motor eléctrico.	31
Fig. 14. Tipos de protectores	32
Fig. 15. Separadores de gas	32
Fig. 16. Impulsor y difusor.	33
Fig. 17. Empuje ascendente y descendente	34
Fig. 18. Cable de potencia redondo y plano	34
Fig. 19. Arquitectura de 3 niveles	38
Fig. 20. Arquitectura de 3 niveles y 5 niveles	39
Fig. 21. Comparativa de tecnologías inalámbricas.	43

Fig. 22. Comparativa de tecnologías inalámbricas.....	44
Fig. 23. Diseño de red y componentes de comunicación.....	46
Fig. 24. Módulo inalámbrico AS66-DTU20.....	47
Fig. 25. Emisor - receptor módulos AS66-DTU20.....	49
Fig. 26. Lazo de comunicación del DHT.....	49
Fig. 27. Diagrama de flujo del módulo emisor.....	51
Fig. 28. Conexión de los módulos de comunicación.....	52
Fig. 29. Diagrama de recomendaciones del fabricante para conexiones de los módulos.....	53
Fig. 30. Instalación de los controladores de los módulos de comunicación.....	53
Fig. 31. Prueba de comunicación de los módulos emisor y receptor.....	54
Fig. 32. Parametrización del panel de control.....	54
Fig. 33. Confirmación de valores de acuerdo a las direcciones Modbus.....	55
Fig. 34. Interface de visualización de variables.....	56
Fig. 35. Panel frontal.....	58
Fig. 36. Lazo principal.....	59
Fig. 37. Lazo paralelo.....	59
Fig. 38. Configuración de la Interface de visualización de variables.....	63
Fig. 39. Selección de variables en la interface.....	63
Fig. 40. Casillero de selección para descarga de variables en la interface.....	64
Fig. 41. Descarga de variables en la interface.....	64
Fig. 42. Monitoreo de variables de presión y temperatura de fondo.....	65
Fig. 43. Monitoreo de variables de Vib, Cla y Clp.....	65
Fig. 44. Monitoreo de variables de fondo en el panel e interfaz.....	66
Fig. 45. Tiempo de renta del taladro para la operación.....	69
Fig. 46. Comparativa de costos operativos.....	69

INTRODUCCIÓN

Antecedentes: De acuerdo al artículo 21 del reglamento de Trabajo de Titulación de Posgrados de la Universidad Técnica de Cotopaxi el presente trabajo se encuentra relacionado a la línea de investigación de los Procesos Industriales y la sublínea de investigación de Automatización, control y protecciones de sistemas electromecánicos, en cuanto al desarrollo de un prototipo para la adquisición de variables de fondo de los yacimientos en tiempo real mediante tecnología inalámbrica en la instalación de sistemas electro sumergibles.

En la actualidad, el número de consumidores de energía en el mundo ha aumentado de manera continua, siendo el petróleo la fuente principal de abastecimiento para satisfacer las necesidades cotidianas mundiales, debido a ello el precio del petróleo es determinante para el desempeño económico de los países importadores y exportadores de petróleo. Según los pronósticos de la economía globalizada, el petróleo genera aproximadamente 4.7% del producto interno bruto (PIB) mundial, lo que representa el aporte de casi un tercio de la energía total que utiliza la humanidad. [1]

El petróleo a presión y temperatura ambiente es una sustancia combustible, viscosa, líquida, por su naturaleza obliga a emigrar vertical u horizontalmente, aprovechando la permeabilidad de las capas rocosas que se encuentran a su paso, cuando esto sucede, por efecto de la presión de yacimiento, el petróleo es obligado a llegar a la superficie, los productos ligeros que lo componen se evaporan y el resto se oxida provocando asfaltos o forman un yacimiento cuando encuentra una capa impermeable que no puede atravesar.

La evolución de las nuevas tecnologías durante las últimas décadas no se ha detenido en su desarrollo, la transformación en los sistemas y formas de comunicación se los puede visualizar y utilizar cotidianamente, los mismos han provocado una metamorfosis en la conducta de los aplicaciones y costumbres tecnológicas.

Los avances alcanzados en la miniaturización de los chips, los avances logrados en el Internet con la adaptación de almacenar los archivos de forma virtual (nube), sitios Web, comunicaciones inalámbricas con tecnología de sensores RFID y la aceptación de la tecnología UPnP en el hogar, han contribuido en el progreso de la era del Internet de las cosas, aquella donde todo dispositivo eléctrico o mecánico se convierte en un ente inteligente, capaz de comunicarse, compartir información y tomar decisiones de forma autónoma empleando la comunicación inalámbrica.

El ambiente de la IoT se extiende sobre las fronteras de los países con diferentes aplicaciones, la combinación de miles de dispositivos, que difieren según su estructura, capacidad y recursos disponibles. Para superar las limitaciones de los protocolos de corto alcance se introducen redes de área amplia y baja potencia (LPWAN), ofreciendo una conectividad de largo alcance en el orden de kilómetros.

LPWAN es una tecnología de transporte inalámbrico de datos que actualmente es el origen de los protocolos básicos para la implementación de la IoT, adicional, ha contribuido al desarrollo para diferentes tecnologías como Sixfox, LoRaWAN y NP-IoT.

Las variables iniciales de los yacimientos son de gran importancia al momento de seleccionar los métodos de levantamiento artificial a implementar en cada pozo, por lo que el monitoreo en tiempo real de los parámetros de fondo contribuirán a tomar las mejores decisiones en las operaciones de extracción y producción de crudo.

El seguimiento y monitoreo de las variables de fondo de los yacimientos en la instalación de los equipos electro sumergibles son de alta importancia para garantizar la instalación, arranque e incrementar la vida útil del equipo.

Actualmente la adquisición de datos se realiza de manera intermitente (cada 1000 ft) y de forma manual, es decir, mediante la conexión física del panel del sensor de fondo y los cables de potencia, dependiendo de la profundidad a la cual se va a asentar el equipo electro sumergible se obtienen los registros de las variables de fondo del yacimiento,

lo que provoca una alta incertidumbre en la evolución de la operación y en los resultados del comportamiento del yacimiento.

Actualmente no se dispone de datos en tiempo real de las variables de fondo de los yacimientos en la instalación de los equipos electro sumergibles, la adquisición física de las variables puntuales de fondo de los yacimientos provoca pérdidas de tiempo, debido a que se debe detener la instalación para vincular el panel del sensor al cable de potencia del sistema BES y obtener las lecturas de fondo del yacimiento, incrementando los costos operativos y riesgos laborales por la exposición del personal técnico a condiciones climatológicas adversas (lluvia, humedad).

El objeto de investigación

Prototipo para transferir inalámbricamente en tiempo real las variables de fondo de los yacimientos en la instalación de equipos electro sumergibles.

El campo de acción

Automatización industrial

El objetivo del presente trabajo es **desarrollar un prototipo para la adquisición de variables de fondo de los yacimientos en tiempo real mediante tecnología inalámbrica en la instalación de sistemas electro sumergibles.**

Para alcanzar el objetivo general se plantea llevar a cabo los siguientes objetivos específicos:

- **Fundamentar los diferentes métodos y técnicas de transferencia de datos inalámbricos en tiempo real que se ajusten a las condiciones de campo.**
- **Diseñar el prototipo con la tecnología inalámbrica requerida para la transferencia de datos adecuado.**
- **Implementar el prototipo, método de transferencia de datos y visualización en tiempo real de las variables de fondo de los yacimientos.**
- **Validar el correcto funcionamiento del prototipo.**

Para cumplir con el proyecto se asignaron tareas de acuerdo con los objetivos específicos, dichas actividades serán medidas cuantitativamente.

Tabla 1. Actividades de acuerdo con los objetivos específicos

Objetivos específicos.	Actividad (tarea)	Resultado de la actividad	Descripción de la actividad
Fundamentar los diferentes métodos y técnicas de transferencia de datos inalámbricos en tiempo real que se ajusten a las condiciones de campo.	Revisión bibliográfica. Recopilación de información.	Análisis de los diferentes tipos de comunicación inalámbrica.	Investigación bibliográfica.
Diseñar el prototipo con la tecnología inalámbrica requerida para la transmisión de datos adecuado.	Recopilación de datos. Simulaciones o programación.	Prototipo diseñado. Pruebas de campo.	Experimentación.
Implementar el prototipo, método de transferencia de datos y visualización en tiempo real de las variables de fondo.	Desarrollo del prototipo. Pruebas experimentales.	Adquisición de datos en tiempo real.	Prototipo.
Validar el correcto funcionamiento del prototipo.	Comparación de datos obtenidos con los datos reales	Análisis estadístico de la exactitud del prototipo.	Estadística. Certificación de funcionamiento (Anexo 6)

Elaborado por: Diego Zambrano

El presente proyecto tiene el propósito de desarrollar un prototipo para transferir inalámbricamente en tiempo real las variables de fondo de los yacimientos en la instalación de los equipos electro sumergibles, actualmente la medición de parámetros del yacimiento se encuentra disponibles con las siguientes características.

- Lecturas periódicas (cada 1000 ft)

- Toma física de las lecturas de manera manual, lo que provoca un riesgo laboral por las adversas condiciones climáticas de campo.
- Incertidumbre en las lecturas de fondo debido a la condición del pozo (nivel de fluido) vs condiciones de diseño.
- Alto costo en la operación debido al tiempo y recursos que se emplean para tomar las lecturas fondo.

Con la asistencia de la tecnología (comunicaciones inalámbricas y electrónica digital) se puede brindar una solución innovadora para visualizar y monitorear el comportamiento de las variables de fondo de los yacimientos en tiempo real en la instalación de los equipos electro sumergibles.

La transferencia de datos en tiempo real mediante la presencia de comunicaciones inalámbricas en el proceso de instalación de equipos electro sumergibles puede contribuir a optimizar los tiempos de instalación, identificar fallas eléctricas en el sistema al momento y reducir costos en la operación.

Con los datos en tiempo real de las variables de fondo de los yacimientos se puede definir las condiciones iniciales del pozo como, nivel de fluido y daños en la formación, adicional se pueden ajustar los parámetros operativos para futuras operaciones como comisionamiento y arranque de los equipos electro sumergibles.

En el país los equipos de completación y reacondicionamiento de pozos pertenecen a empresas privadas, la renta diaria por cada equipo oscila entre \$30.000 USD y 60.000 USD y el valor de cada equipo electro sumergible fluctúa entre 200.000 USD y 400.000 USD, por lo que cada parada del equipo en la instalación para la adquisición de las variables de fondo del yacimiento representa un valor considerable, el objetivo de este proyecto es reducir las paradas programadas durante la instalación, garantizar la fiabilidad de la operación e incrementar la vida útil del equipo sumergible.

Las variables que se consideran para el proyecto de investigación son los siguientes:

Variable Independiente:

- Monitoreo en tiempo real de las variables de fondo del pozo.

Variable Dependiente.

- Incrementar la cantidad de datos capturados por el sensor de fondo durante la instalación de equipos electro sumergible.
- Reducir el tiempo de exposición del personal técnico frente a trabajos en condiciones climáticas adversas (lluvia, humedad).
- Disminuir los costos y tiempo de operación en la instalación de equipos electro sumergible.

Hipótesis

La adquisición en tiempo real de las variables de fondo de los yacimientos en los sistemas electro sumergibles permitirá disponer de datos exactos de presión, temperatura, vibración, ..., a fin de conocer el estado real del yacimiento para analizarlos adecuadamente y con ello mejorar el proceso de extracción del crudo en un ambiente seguro de trabajo.

CAPITULO I. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

1.1. Introducción y objetivo del capítulo

Considerando que hasta hoy se discute el origen geológico del petróleo, se tiene claro que existen estructuras que incluyen yacimientos en donde el petróleo migra, se forma y se acumula. Las técnicas de extracción del petróleo requieren de estudios previos, en los cuales, se deben tomar en cuenta las variables y comportamiento de los yacimientos que pudieran mejorar el proceso. Las tecnologías de comunicaciones contribuirán al monitoreo en tiempo real de las variables en la instalación de los equipos electro sumergibles. En tal sentido, se declara como objetivos del capítulo:

- Establecer el estado del arte a partir de la revisión bibliográfica relacionada a las tecnologías de transferencia de datos inalámbricamente en tiempo real.
- Investigar teorías que fundamenten el desarrollo del prototipo para la adquisición de variables de yacimiento en la instalación de equipos electro sumergibles.

1.2 Antecedentes de la investigación o fundamentación del estado de arte

El crecimiento de la demanda de energía a nivel mundial obliga a las compañías petroleras para incorporar reservas a pesar que los campos se encuentran en etapas maduras de explotación, en términos porcentuales se estima que la demanda mundial de energía se incrementa a una tasa del 2%, el nivel de producción de los pozos activos a nivel mundial decrece en una tasa del 5%, en consecuencia, el objetivo de las compañías operadoras para optimizar la producción de sus yacimientos es limitar los costos operativos durante el proceso de explotación y mantenimiento de sus campos. [2]

El declive de presión en las cercanías del pozo influye en la productividad e inyectividad del pozo, la misma se estima a través del factor de daño, por tal motivo, el monitoreo de las variables del yacimiento es de interés para el proceso de exploración. [3]

Comprender los principios del flujo de fluido a través de sistemas de producción es fundamental para calcular el rendimiento individual de los pozos y optimizar la

productividad del mismo. En el sentido general, el sistema de producción es el sistema que transporta los fluidos desde el yacimiento hasta superficie, procesa y los caracteriza para el almacenamiento y transferencia para la venta. [4]

Dependiendo de la región y del tipo de yacimientos, el pozo tiene el potencial de producir a flujo natural ya que la presión del yacimiento es suficiente para impulsar los fluidos a superficie a una tasa comercial sin necesidad de ningún tipo de levantamiento artificial.

La producción continua de hidrocarburos provoca la declinación de la presión del yacimiento, por tanto, para levantar la columna de fluido desde el yacimiento hacia los centros de producción es necesario suministrar energía externa mediante las nuevas técnicas de extracción de crudo, las más comunes son Bombeo Mecánico, Bombeo Hidráulico y Bombeo Electro sumergible.

El concepto de instalaciones inteligentes [5], desarrollo de campos inteligentes [6] y campos petroleros digitales [7] gradualmente ha ganado mucha aceptación en la industria, en la actualidad gran parte de las instalaciones inteligentes se han implementado en los campos costa afuera, enfocándose en la aplicación e instalación de instrumentos permanentes en el fondo del pozo [8], para proporcionar datos de la producción de crudo en tiempo real y mejorar el nivel de administración del yacimiento.

La Industria del Petróleo y Gas a nivel mundial sigue los lineamientos y unidades de medida de las normas API, considerando todos los elementos para el diseño y operación el equipo electro sumergible, en la norma API se puede encontrar los criterios de aceptación de las bombas electro sumergibles enviadas por el fabricante indicando que los componentes del sistema cumplen con los requisitos para la certificación API.

En el presente, estamos inmersos en la revolución tecnológica de las comunicaciones inalámbricas, el término de movilidad en las redes inalámbricas se aplica al desplazamiento de usuarios conectados a lo largo de un área geográfica. [9]

El IoT o Internet de las cosas es utilizado para delinear la conectividad de la red, la cual abarca sensores, equipos y objetos de uso cotidiano sin ser equipos computacionales inteligentes, pero con la habilidad de conexión independiente. [10]. En los últimos años

se ha observado un tremendo interés en las redes de largo alcance para el monitoreo de las industrias inteligentes. LoRa [11] ha sido el actor principal de esta revolución, sus particularidades de cobertura de larga duración y larga distancia han atraído la atención de los investigadores y usuarios.

1.3. Fundamentación teórica

1.3.1. Yacimientos de producción petrolera

El reservorio es una fuente natural de fluidos subterránea de hidrocarburos, es el medio poroso y permeable en el que se almacenan los fluidos del yacimiento y por medio del cual los fluidos filtraran hacia el interior del pozo. También proporciona la energía primaria para el sistema de producción. El pozo sirve como canal de acceso al yacimiento desde superficie, está compuesto por el pozo perforado que previamente ha sido cementado y revestido con tubería. La productividad de un pozo depende de una gran cantidad de variables como presión, propiedades de formación y propiedades de los fluidos, las mismas que se encuentran directamente relacionadas. Según Dake [12], la producción de petróleo se debe a los siguientes mecanismos de accionamiento: agua natural, solución de gas, tapón de gas y compactación.

1.3.1.1. Parámetros físicos calculados en los diferentes yacimientos

- Presión de yacimiento. Es la presión que ejercen los fluidos en los poros de las rocas, esta presión depende del peso de la sobrecarga (capas de rocas) por encima de la formación, las misma que ejerce presión en los granos y poros con fluidos de la roca reservorio.
- Permeabilidad. La permeabilidad de una roca de acumulación es la capacidad que posee la formación para facilitar a los fluidos el movimiento a través de la red de poros interconectados.

La permeabilidad obtenida mediante pruebas de formación es la permeabilidad efectiva promedio de la formación respecto al fluido producido, la mejor referencia de la permeabilidad efectiva se obtiene a partir de las curvas de restauración de presión ya que se obtiene a condiciones de yacimiento.

- Daño de la formación. Es el descenso de caudal de un yacimiento, como consecuencia de la disminución de la permeabilidad y presión de la formación, se obtiene a partir de las pruebas de formación, el cual tiene un efecto temporal, luego de determinar la magnitud mediante un adecuado tratamiento de estimulación se puede recuperar la permeabilidad. [13]

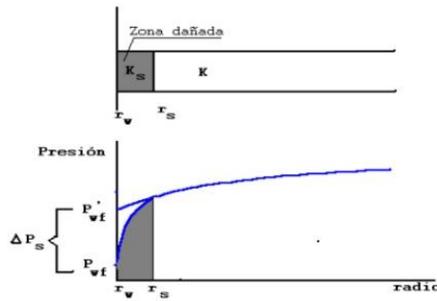


Fig. 1. Daño de formación según Hawkins

Fuente: [13]

1.3.1.2. Índice de Productividad (IP)

Se define matemáticamente como la capacidad de un yacimiento para abastecer fluidos al pozo, el enfoque más simple para describir el desempeño del flujo de entrada a los pozos petroleros es mediante el uso del índice de productividad (IP) el cual fue desarrollado considerando lo siguiente.

- El flujo es radial alrededor del pozo.
- Un líquido monofásico se encuentra en movimiento.
- En la formación la distribución de la permeabilidad es homogénea.
- La formación está completamente saturada con el líquido dado.

Cuando se produce desde un reservorio trifásico la curva no se trazará como una línea recta, tan pronto como el petróleo se acerca al pozo y la presión cae más abajo del punto de burbuja, el gas escapa de la solución, por lo tanto, la saturación de gas libre en las proximidades del petróleo de manera constante aumenta, lo que implica que la

permeabilidad relativa al gas aumenta constantemente en el gasto de la permeabilidad relativa del aceite.

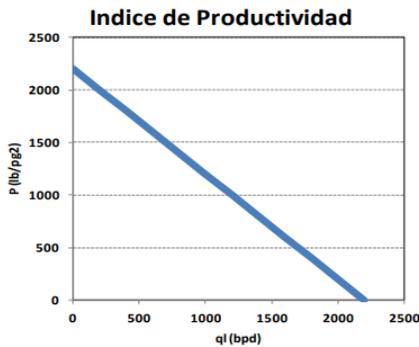


Fig. 2. Curva de IPR.

Fuente: [14]

1.3.1.3. Inflow Performance Relationship (IPR) de Vogel

En 1968 Vogel desarrolló un simulador numérico para estudiar el flujo de dos fases (líquido y gas) en un yacimiento de petróleo saturado mediante el montaje de una curva sobre el producto de la multiplicidad de simulaciones con gas en solución. [15]. La ecuación brinda resultados confiables para casi cualquier pozo con una presión de fondo por debajo del punto de burbuja.

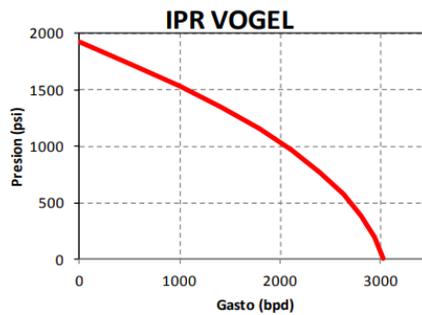


Fig. 3. IPR de Vogel.

Fuente: [15]

1.3.1.4. Outflow Performance (VLP)

Describe a la presión de fondo como una función de los rangos o tasas de flujo. De acuerdo a Golan y Whitson [14] el rendimiento de flujo de salida depende de diferentes factores como: tasa del líquido, tipo de fluido (relación gas-liquido, corte de agua), propiedades del fluido y tamaño de la tubería. Según G. Takacs [16] divide la caída de presión total de un pozo en un componente hidrostático, un componente de fricción y un componente de aceleración.

1.3.1.5. Punto de operación de IPR y VLP

Para calcular la tasa o índice de producción del pozo, se requiere la presión de fondo del pozo que se ajuste simultáneamente las relaciones IPR y VLP. Al trazar la curva del IPR y el VLP en el mismo grafico se puede identificar la tasa de producción, el sistema puede describirse mediante una expresión de balance de energía, simplemente el principio de conservación de energía sobre un elemento de longitud incremental de tubería. La energía que ingresa al sistema por el fluido debe ser igual a la energía resultante del sistema más la energía intercambiada entre el fluido y su entorno.

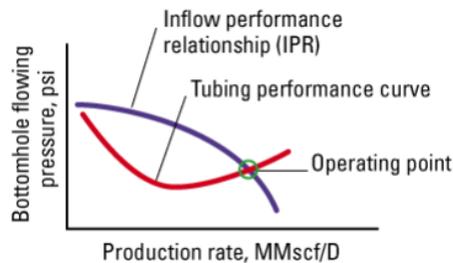


Fig. 4. Punto de operación de IRP y VLP.

Fuente: [13]

1.3.2. Sistemas de Levantamiento Artificial

Dependiendo de la calidad del yacimiento, un pozo tiene la capacidad de producir de forma natural si presenta la energía necesaria para el levantamiento, siendo esta la forma más aconsejable y económica. Sin embargo, existen algunos pozos que necesitan de un método de levantamiento artificial para elevar el fluido a superficie. Se debe

considerar los siguientes conceptos para el diseño de los métodos de levantamiento artificial.

- Propiedades del fluido a producir como viscosidad, API, BSW, GOR.
- Presión estática
- Presión del yacimiento
- Profundidad
- Índice de Productividad.

1.3.2.1. Métodos de levantamiento artificial

En nuestro país los métodos de levantamiento más comunes son: Bombeo Electro Sumergible, Bombeo mecánico y Bombeo Hidráulico.

- Bombeo Electro sumergible. Es la acción continua de una bomba centrífuga multi-etapas, cuya potencia es suministrada por un motor eléctrico trifásico tipo jaula de ardilla alimentado desde la superficie a través de un cable de potencia y una fuente de tensión primaria. [17] [18]

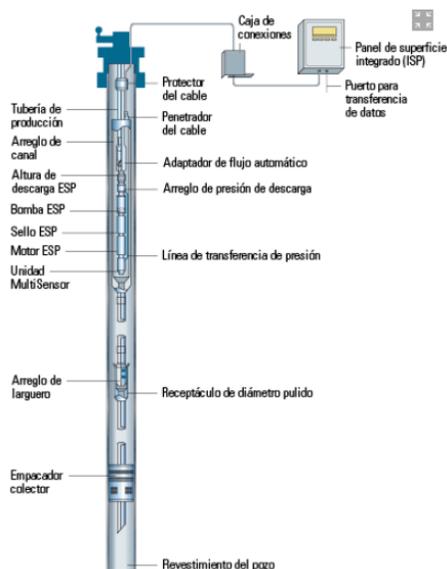


Fig. 5. Bombeo electro sumergible.

Fuente: [17]

- Bombeo mecánico. Consiste en el levantamiento del fluido a superficie mediante una sarta de varillas accionadas por la transmisión de potencia de una bomba estacionaria y otra viajera que se encuentran en el pozo, el movimiento de la sarta de varillas abre y cierra las válvulas para capturar el fluido o permitir que el fluido circule hacia el pozo. [19]

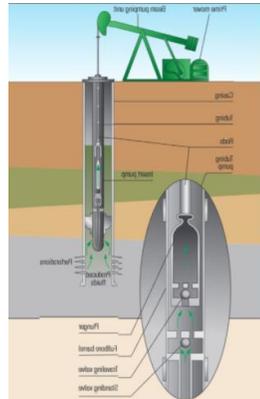


Fig. 6. Esquema de una instalación de Bombeo mecánico

Fuente: [19]

- Bombeo hidráulico. Para levantar el fluido se requiere la inyección de un fluido de potencia a altas presiones, que al mezclarse con el fluido de yacimiento dentro del equipo de subsuelo le transmite la energía necesaria para forzar al fluido a llegar a superficie, ya sea por el conducto alternativo o por el anular. [20]

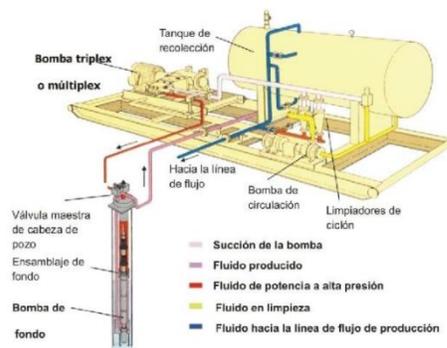


Fig. 7. Bombeo hidráulico

Fuente: [20]

1.3.2.2. Sistemas Electro sumergibles

El sistema se encuentra integrado por el equipo de superficie y el equipo de fondo.

El equipo de superficie brinda la seguridad mecánica de la completación mediante la conexión de válvulas de control y proporciona la energía eléctrica al motor electro sumergible y permite controlar, monitorear y proteger al sistema eléctrico mediante las alarmas del controlador, los componentes del equipo de superficie son:

- Cabezal del pozo. Diseñado para soportar el peso de la completación de producción, equipo de fondo y mantener el control del pozo en el anular y tubing, adicional proporciona las facilidades mecánicas para instalar el cable de potencia de manera hermética.

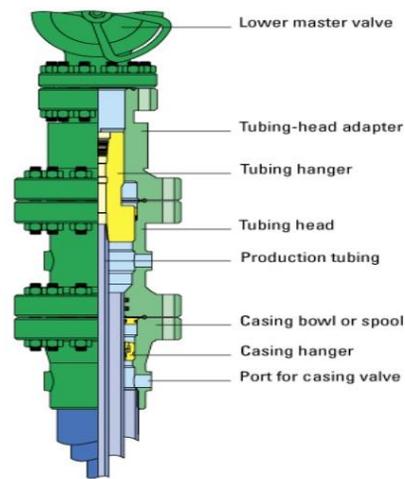


Fig. 8. Partes del cabezal del pozo

Fuente: [19]

- Caja de venteo. Permite ventear a la atmosfera el gas que atraviesa a lo largo del cable superficial, esta caja se encuentra entre el cabezal del pozo y el controlador y es la caja de conexiones que facilita las pruebas de rutina, localización de averías y aislamiento del sistema eléctrico para la intervención del pozo.



Fig. 9. Caja de venteo.

Fuente: [17]

- Transformador elevador (SUT). Es un dispositivo eléctrico estático trifásico de corriente alterna que en base a la inducción electromagnética incrementa relativamente el bajo voltaje de salida del controlador (VSD) a valor útiles para el motor electro sumergible manteniendo constante la potencia eléctrica.



Fig. 10. Transformador elevador.

- Controlador o variador de frecuencia. Es un dispositivo desarrollado para modificar la frecuencia y voltaje de salida que alimenta al motor electro sumergible desde 0-120 Hz y 0-480 V respectivamente, adicional se emplea para controlar y proteger al sistema contra diferentes condiciones de operación como sobre corriente, sobre voltaje, sobre velocidad y arranques excesivos.



Fig. 11. Variador de frecuencia.

El equipo de fondo se encuentra suspendido a la tubería de producción, los componentes se encargan de levantar la columna de fluido hacia superficie y monitorear los parámetros del pozo, los componentes del equipo de fondo son:

- Sensor de fondo. Se encuentra acoplado a la base del motor electro sumergible, construido internamente por circuitos electrónicos que permiten detectar las variables de operación del pozo e integridad eléctrica del sistema, los parámetros de fondo se transmiten hasta superficie por medio del cable de potencia, los datos de fondo se pueden capturar y registrar luego de la conexión del panel del sensor de fondo en superficie, los parámetros que mide el sensor de fondo son: presión, temperatura, flujo, corrientes de fuga, flujo y vibración.



Fig. 12. Sensor de fondo

Fuente: [17]

- Motor. Los motores utilizados en el diseño de equipos electro centrífugos son de tipo dipolares, trifásicos de inducción tipo jaula de ardilla, se encuentran llenos de aceite mineral altamente refinado el cual lubrica los cojinetes del motor y transfiere el calor generado en el interior del motor hacia la carcasa del mismo, donde el calor es absorbido por el fluido que atraviesa por la parte exterior. La función principal del motor eléctrico es proporcionar la potencia que requiere la bomba para levantar el fluido a la superficie.

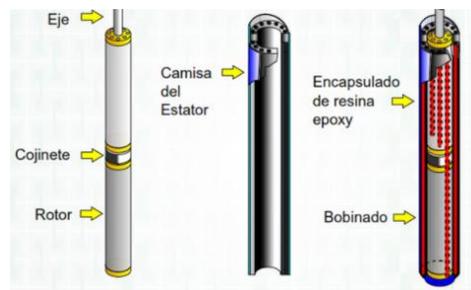


Fig. 13. Partes del motor eléctrico.

Fuente: [17]

- Protector. Conocido como la sección sellante, se instala sobre la cabeza del motor, las principales funciones son:
 - Mantener los fluidos del pozo fuera del motor.
 - Absorber el empuje axial generado por la bomba.
 - Permitir la equalización de presiones entre el aceite del motor y el fluido del pozo.
 - Conectar el torque desarrollado en el motor hacia la bomba a lo largo del eje del protector.
 - Proporcionar al motor un depósito de aceite para equilibrar la expansión y contracción del aceite del motor debido al cambio de temperatura del motor eléctrico durante la operación.

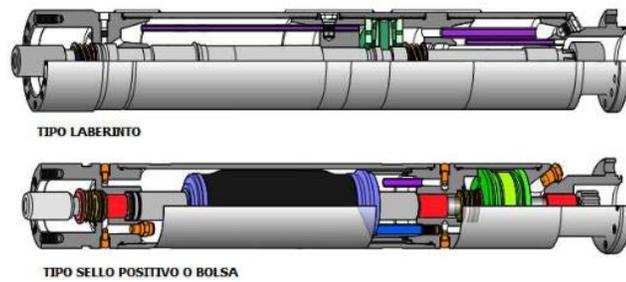


Fig. 14. Tipos de protectores

Fuente: [18]

- Separadores de gas. Permite la entrada de los fluidos del pozo hacia la bomba, la función principal es separar el gas libre proveniente del pozo y enviarlo al espacio anular, existen dos tipos de separadores de gas: estáticos y dinámicos.
 - Separadores de gas estáticos. Por diferencia de densidad el gas sigue una trayectoria ascendente para luego salir al anular, el líquido ingresa a la cámara para luego ser bombeado.
 - Separadores dinámicos. EL movimiento del impulsor obliga a las partículas de gas a adherirse a la parte interna del impulsor y envía al líquido hacia la parte externa del impulsor, posteriormente el líquido y gas son direccionados hacia la bomba y anular respectivamente.

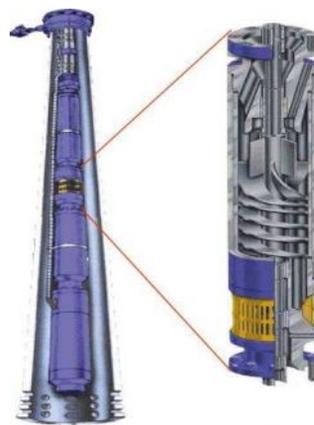


Fig. 15. Separadores de gas

Fuente: [17]

- Bomba electro centrífuga. Es una bomba tipo multietapa, la función es proporcionar la energía adicional a los fluidos del pozo para levantar la producción esperada a superficie. Cada etapa está compuesta de un impulsor rotario que entrega al fluido la energía cinética y el difusor estacionario cambia esta energía a energía potencial. Dependiendo de la aplicación del sistema electro centrífugo se debe considerar el tipo y número de etapas.

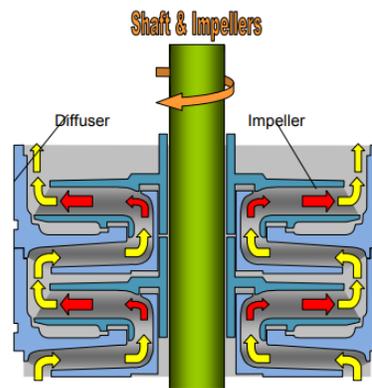


Fig. 16. Impulsor y difusor.

Fuente: [18]

Si la bomba se encuentra trabajando con un caudal mayor al diseñado, la fuerza que genera la succión es mayor a la fuerza generada por la descarga, produciéndose un empuje ascendente (Upthrust), mientras que, si la bomba se encuentra operando con un caudal menor que el diseñado, la fuerza generada en el lado de la descarga es mayor provocando un empuje descendente (Downthrust).

Se recomienda que la capacidad de la bomba no sea menor al 75% de la capacidad máxima y no supere el 25% de la capacidad máxima para considerar que la bomba se encuentre en el Rango Operativo Recomendado.

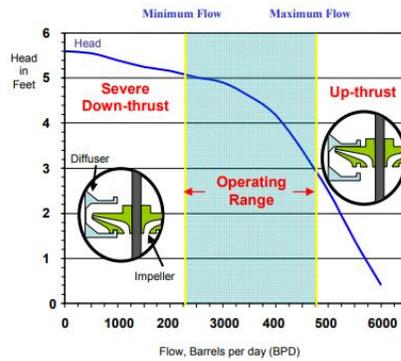


Fig. 17. Empuje ascendente y descendente

Fuente: [18]

- Cable de potencia. La función es suministrar la energía eléctrica requerida por el motor eléctrico de fondo, adicional, se emplea para vincular las señales de presión, temperatura y vibración del sensor de fondo al panel de superficie.

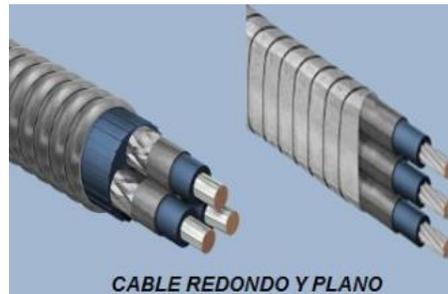


Fig. 18. Cable de potencia redondo y plano

Fuente: [17]

1.3.3. Comunicación Inalámbrica con IoT

Durante los últimos años, Internet de las cosas (IoT) ha atraído la atención de las industrias, en particular con el auge de las redes de amplia área y baja potencia (LPWAN) [21]. IoT es sensible al desarrollo sostenible 4 que formara un futuro inteligente y confortable la cual promete una red interconectada de cosas u objetos inteligentes, incluso sensores, cámaras, dispositivos electrónicos de consumo, etc. La

conectividad es la columna vertebral de la IoT que se establece por la variedad de estándares de comunicación de protocolos de red inalámbricas que se utilizan en aplicaciones de hogares inteligentes, como IEEE 802.11 (Wi-Fi), Bluetooth LE (baja energía), celular, ZigBee (dispositivo inalámbrico de baja potencia), Z-Wave y Thread.

La evolución de las redes dentro de IoT se han desarrollado con la siguiente secuencia.

- Red 1G. Lanzada en 1970, la cobertura era intermitente únicamente con servicio de voz, multiplicación FDMA y frecuencia de 800 a 900 MHz.
- Red 2G. Proceso digital que facilita voz y datos, roaming internacional, llamada en espera, retención de llamada. Transferencia de llamada, velocidad era de 14kpps a 64kbps, tecnología TDMA y CDMA, frecuencia 850-1900 MHz (GSM) y 825-849 MHz (CDMA).
- Red 3G. Integra el aumento de tasa de datos, mayor capacidad de voz y datos, transferencia de archivos multimedia, estándar UMTS (WCDMA) basado en GSM y CDMA, aplicaba para servicio de acceso a internet de alta velocidad, chat, televisión móvil, mapas de navegación, etc.
- Red 4G. Alta velocidad, calidad y seguridad, esta tecnología se basó en IP, aplica para acceso móvil web, telefonía IP, video conferencia, DVB digital video broadcasting.
- Red 5G. Maneja estándares IP, LAN, WAN, PAN, alta velocidad, rendimiento en tiempo real, velocidad de 1 a 10Gbps, soporte IoT y M2M con mayor cobertura y eficiencia.

1.3.3.1. Redes área amplia de baja potencia LPWAN

LPWAN presenta una amplia cobertura y bajo consumo de energía. En comparación con la tecnología de comunicación de corto alcance como Wi-Fi, Bluetooth y ZigBee, la tecnología LPWAN ofrece una amplia cobertura de IoT a bajo costo, las tecnologías LPWAN se encuentran entre las tecnologías más recomendadas para sistemas celulares.

Similar a las redes celulares, la tecnología LPWAN se caracteriza por su transmisión de largo alcance (en orden de kilómetros) con topología de red en estrella, habitualmente funcionan en la banda industrial médica de sub-GHz.

La creciente popularidad de los casos de aplicación de las IoT en dominios que dependen de la conectividad que abarca grandes áreas y la posibilidad de manejar una gran cantidad de conexiones está impulsando la demanda de acceso LPWAN. Con el avance de la electrónica miniaturizada, las comunicaciones, la informática es posible diseñar tecnologías de red de largo alcance y bajo consumo con muchos años de duración de la batería y decenas de kilómetros de cobertura. Estas tecnologías deben ser compatibles con Internet para que la gestión de datos, dispositivos y redes se pueda realizar por medio de plataformas basadas en la nube. Las tecnologías LPWAN se pueden implementar para una amplia gama de aplicaciones inteligentes que incluyen monitoreo de sistemas, automatización industrial, atención médica, seguimiento de activos de la cadena logística.

La cobertura tiene un valor fundamental para casi todas las aplicaciones LPWAN y por tanto, se identifica como de gran relevancia para la mayoría de ellas. Sin embargo, un entorno de fabricación típico puede implicar operaciones localizadas. En tal caso, se puede realizar compensaciones para centrarse en los tipos y la cantidad de dispositivos que se admitirán, y los requisitos de cobertura pueden verse comprometidos.

1.3.3.2. Tecnologías de comunicación para IoT

Considerando variables como consumo, alcance, seguridad y tasa de datos, se encuentran las siguientes redes de comunicación para IoT.

- GSM/GPRS. Utilizada por las operadoras de telefonía, tiene desventajas como alto costo para volumen de datos y alto consumo de batería.
- SigFox. Red de comunicación LPWA, operadora de su propia tecnología ya que no requiere de una licencia para ofrecerla al mercado, tecnología de bajo costo.

- LoRa. Red similar a la SigFox ya que pertenece a la red LPWAN, mejor cobertura, compatible con IPV6, mejor preparada para la comunicación bidireccional en tiempo real, mejora la seguridad mediante la encriptación.
- NB IoT. Cobertura dentro de rango LTE o 4G, presenta estándares para permitir a los dispositivos que se conecten a la red lo realicen sin restricciones.
- BLE. Bluetooth de baja energía, tecnología inalámbrica enfocada a las aplicaciones de IoT a pequeña escala que envían pequeñas cantidades de datos, normalmente utilizado para localización de activos. [22]
- ZigBee, Utilizada en aplicaciones domóticas e industriales, bajo consumo de energía, soporta gran número de nodos, la cobertura es de 100 metros.

Tabla 2. Redes de comunicación utilizadas en IoT

TECNOLOGIA	CONSUMO	ALCANCE	DISPONIBILIDAD	SEGURIDAD	TASA DE DATOS
GSM/GPRS	Muy alto	Alto	Muy alto	Alta	Alta
SigFox	Bajo	Medio	Medio	Media	Muy baja
LoRa	Bajo	Medio	Muy bajo	NA	Muy baja
NB IoT					
WiFi	Alto	Bajo	Alto	Baja	Muy alta
BLE	Muy bajo	Muy bajo	Bajo	Baja	Baja
ZigBee	Medio	Bajo	Muy bajo	Alta	Baja

Fuente: [23]

1.3.3.3. Arquitectura de la IoT

Considerando que hasta la fecha no hay un consenso investigativo para definir la arquitectura de la IoT debido a la complejidad de los detalles, alcance y aplicaciones de la tecnología, a continuación, se menciona las más importantes.

- Arquitectura de tres niveles. Conforme a los niveles se puede establecer que es la más fundamental y es el origen para las demás arquitecturas, los niveles son: nivel de percepción, nivel de red y nivel de aplicación.
 - Nivel de percepción adaptado para que los sensores recojan la información del ambiente de operación.

- Nivel de red es el encargado realizar el enlace entre los sensores y servidores entre sí para transmitir y procesar los datos recogidos.
- Nivel de aplicación responsable de presentar los datos al usuario.

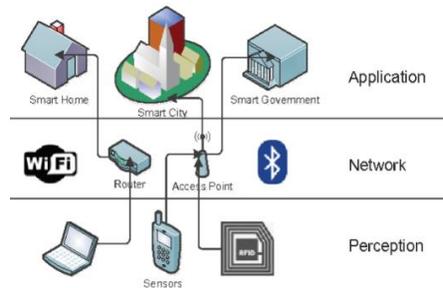


Fig. 19. Arquitectura de 3 niveles

Fuente: [24]

- Arquitectura de cinco niveles. Considerando que los niveles de percepción y aplicación son los mismos que en la arquitectura de tres niveles, la arquitectura se encuentra integrada por los niveles de percepción, transporte, proceso, aplicación y nivel de negocio.
 - Nivel de transporte. Mediante redes 3G, LAN, Bluetooth, RFID y NFC transfiere los datos de los sensores desde el nivel de percepción al nivel de proceso recíprocamente.
 - Nivel de proceso facilita y gestiona servicios, los niveles más bajos emplean tecnologías de base de datos, cloud computing y big data, adicional este nivel almacena, analiza y procesa un número importante de datos derivados del nivel de percepción.
 - Nivel de negocio administra las aplicaciones, modelo de negocio y la privacidad.

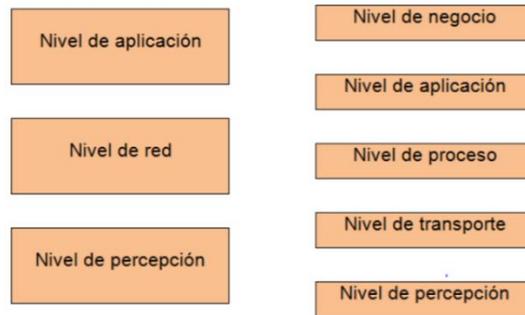


Fig. 20. Arquitectura de 3 niveles y 5 niveles

Fuente: [22]

1.3.3.4. LoRa y LoRaWAN

LoRa es una plataforma inalámbrica de largo alcance y baja potencia que utiliza espectro de radio sin licencia en la banda de radio industrial, científica y médica. [25] LoRa tiene como objeto eliminar los repetidores, reducir el costo de los dispositivos, aumentar el ciclo de vida de la batería en los dispositivos, mejorar el potencial de la red y admitir una cantidad importante de dispositivos. Es una capa física utilizada para comunicaciones a largo plazo, para lograr un bajo consumo, en su mayoría las tecnologías inalámbricas utilizan modulación de tecla de cambio de frecuencia (FSK), sin embargo, LoRa utiliza modulación Chirp de espectro ensanchado (CSS) con el objetivo de mantener características de baja potencia para ampliar el rango de comunicación.

El protocolo LoRaWAN es un protocolo de comunicación inalámbrica desarrollado por LoRa Alliance para atender los desafíos que se enfrentan con la comunicación de largo alcance frente a IoT. La filosofía es específicamente de largo alcance, bajo consumo de energía a una baja tasa de bits producto de su arquitectura de sistema basada en LoRaWAN. EL protocolo y su arquitectura de red tienen una gran influencia en la determinación del ciclo de vida de la batería de un nodo, capacidad de la red, calidad del servicio (QoS), la seguridad y una diversidad de aplicaciones servidas por la red.

1.4. Descripción del objeto de estudio

El petróleo es una fuente de energía imperativa y el factor macroeconómico representa el mercado de productos básicos más grande del mundo, la variación de producción genera efectos directos e indirectos en la actividad económica a nivel mundial. Los precios del petróleo y el comportamiento económico global están altamente correlacionados. La presión inflacionaria y los shocks inflacionarios se derivan principalmente de los precios del petróleo, si no existe un sustituto más cercano de la energía del petróleo.

En la industria petrolera las actividades de la cadena de valor se dividen en:

- Exploración y producción.
- Transporte de crudos.
- Refinado.
- Distribución de productos derivados.

La exploración y producción es con diferencia, el más complejo y costoso, que comprende las siguientes actividades:

- Prospección de hidrocarburos.
- Perforación para confirmar la existencia de crudo.
- Evaluación de los yacimientos encontrados.
- Extracción de crudo dependiendo de los resultados encontrados.

Para lograr una producción económicamente eficiente, la selección del método de levantamiento artificial es de vital importancia. La elección del método óptimo se realiza considerando los parámetros del yacimiento, fluidos, tipo de pozo, condiciones ambientales, facilidades de superficie y los factores económicos (costos de capital y operativos).

Dentro de los diversos tipos de levantamiento artificial se encuentra el sistema electro sumergible, considerado como un medio económico y efectivo para producir altos volúmenes de fluido (100 bpd hasta 100.000 bpd) desde grandes profundidades,

especialmente en pozos con baja energía de reservorio. La historia de la evolución de los equipos electro sumergibles está marcada por la innovación, los cuales se ven reflejados en el desempeño y resistencia de los materiales de los componentes que provocan la mejora en los rangos de producción de las aplicaciones para ambientes de pozos hostiles [26]. Debido al costo de operación de los equipos de reacondicionamiento y al valor de los equipos electro sumergibles, el proceso de instalación y monitoreo del mismo es de suma importancia para el cliente y para la empresa prestadora de servicios, ya que una falla prematura provocaría pérdidas de tiempo, dinero y mala reputación del fabricante.

Las aplicaciones del Internet de las cosas (IoT) necesitan cada vez más tecnologías que puedan ofrecer un funcionamiento con bajo consumo de energía, dispositivos de bajo costo y baja complejidad que puedan comunicarse de forma inalámbrica a grandes distancias. En la mayoría de los casos, los dispositivos finales de IoT son nodos de sensores alimentados por batería, el perfil de uso de energía debe diseñarse cuidadosamente para extender el ciclo de vida de la batería. En rango de comunicación debe ir desde varios cientos de metros hasta varios kilómetros, ya que los dispositivos finales se distribuyen en una gran área de operación. Teniendo en cuenta todas las características antes mencionadas, esto solo se lo puede lograr utilizando tecnologías de red amplia de baja potencia (LPWAN).

1.5 Conclusiones

- Como resultado de la fundamentación teórica presentada, se puede concluir la importancia de monitorear las variables de los yacimientos en la instalación de equipos electro sumergibles.
- Para pozos con baja energía de reservorio el óptimo tipo de levantamiento artificial es el sistema de bombeo electro sumergible.
- Las redes LPWAN cuentan con grandes ventajas para proyectos de Internet de las cosas (IoT), las mismas pueden ser aplicables al proyecto de transmisión inalámbrica en tiempo real.

CAPITULO II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Introducción y objetivo del capítulo.

La revolución de las comunicaciones inalámbricas se ha enfocado en buscar automatizar las gestiones empresariales a gran medida para reducir costos operativos, dinero y tiempo. En la industria del petróleo, a causa de los altos costos de operación de los equipos de reacondicionamiento y la limitada información inicial de los yacimientos, se plantea desarrollar una aplicación para transmitir los datos en tiempo real de manera inalámbrica en la instalación de los equipos electro sumergibles utilizando la tecnología LPWAN, en tal sentido los objetivos del capítulo son los siguientes.

- Establecer la investigación teórica y métodos de transferencia de datos de forma inalámbrica.
- Especificar las diferentes técnicas experimentales a utilizar en la investigación.

2.2. Metodología de cálculo.

Por la importancia de los datos iniciales de los yacimientos en los procesos de extracción de crudo, el desarrollo de la tecnología del prototipo debe cumplir la norma IEEE 802.11 que regula las siguientes características:

- Bajo costo.
- Larga duración de la batería.
- Amplia cobertura.
- Resistencia o funcionamiento en ambientes industriales

Por brindar seguridad y protección al lugar donde exista una alta probabilidad de presencia de una atmosfera explosiva, la implementación del prototipo reducirá la probabilidad de crear una fuente de ignición. [27]

2.2.1. Análisis de los diferentes tipos de tecnologías vinculadas al IoT.

Las redes móviles actuales son adecuadas para servicios que requieren considerable cantidad de datos, en movimiento, sin embargo, esas redes no son adecuadas para dispositivos de baja velocidad de datos, bajo consumo y económicos que funcionan con baterías. La visión de Internet de las cosas (IoT) han provocado una serie de nuevos protocolos para ofrecer velocidades de datos bajas, aplicaciones de IoT con mayores enlaces de tráfico ascendentes que descendentes. Para una evaluación de las diferentes tecnologías inalámbricas se debe tener en cuenta el alcance y ancho de banda empleado.

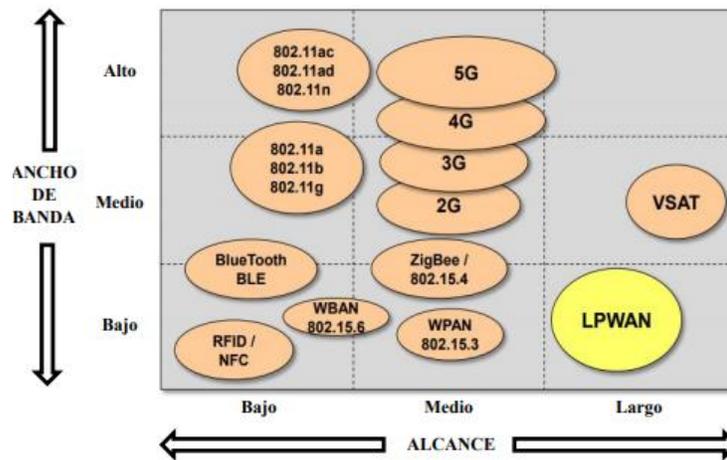


Fig. 21. Comparativa de tecnologías inalámbricas.

Fuente: [28]

La tecnología LPWAN son redes que brindan un bajo consumo de potencia en un área de cobertura de larga distancia, en resumen, las redes LPWAN envían y reciben pequeñas tramas que contiene información en intervalos de tiempo poco frecuentes o periódicos. [29].



Fig. 22. Comparativa de tecnologías inalámbricas.

Fuente: [23]

Actualmente se puede identificar varias aplicaciones de la tecnología IoT en campos de seguridad, industrial, control de activos, etc., los cuales deben cumplir requisitos de acuerdo a su aplicación y condiciones de operación. Las tecnologías de radio de corto alcance como ZigBee, Bluetooth, etc., no están adaptadas al requerimiento de transmisión de largo alcance, mientras que las tecnologías celulares (2G, 3G y 4G) pueden proporcionar una mayor cobertura, pero con la limitante del consumo de energía del dispositivo para la comunicación, por esta razón, el estudio de la tecnología LPWAN se ha enfocado a desarrollar redes de área amplia a bajo costo y menor consumo de potencia para dispositivos pequeños que pueden actuar como medidores o sensores inteligentes.

LPWAN presenta ventajas respecto a otros tipos de redes de baja tasa de datos, los principales beneficios son el bajo consumo de energía, bajo costo y largo alcance hasta 10-40 Km en zonas rurales y 1-5 km en zonas urbanas, lo que facilita configurar mayor cantidad de aplicaciones debido a que la tecnología trabaja con mayor ancho de banda y menor tasa de bits.

Las tecnologías LPWAN son recomendadas para aplicaciones de la IoT que solo requieren transmitir pequeñas cantidades de datos a larga distancia, mientras que las tecnologías como Bluetooth, Zigbee y Wi-Fi están orientadas a la transmisión de información de aplicaciones más complejas y costosas.

Por medio del presente proyecto se espera transferir de manera inalámbrica las variables de los yacimientos (presión, temperatura, corrientes de fuga y vibración) en la instalación de los equipos electro sumergibles mediante la adquisición de baja tasa de datos, con bajo consumo de energía, bajo costo y largo alcance desde el pozo hasta el cuarto de máquinas (control room).

Dependiendo de la aplicación se debe considerar los componentes que brinden la confiabilidad operativa y seguridad al personal involucrado, anteriormente las comunicaciones por cable fueron la base para la instalación de sistemas de automatización y control industrial, considerando que la excavación de cables requiere mucho capital y mano de obra, sin mencionar el hecho que el mantenimiento preventivo o correctivo del mismo conlleva un significativo tiempo de ejecución y por ende pérdida de producción, adicional, en un cambio o actualización de los protocolos del cableado implican el desmontaje y remplazo de los cables y conductos.

La selección de la transmisión inalámbrica que se consideró para el proyecto es debido a las regulaciones de seguridad de la Industria Oíl & Gas y a la clasificación de áreas peligrosas, tomando en cuenta que el lugar donde se implementó el prototipo de comunicaciones es una locación con suficientes fuentes potenciales de combustible (vapores inflamables, gases o polvos combustibles) capaces de crear mezclas incendiables o explosivas, adicional, la transmisión inalámbrica no interfiere en la transito peatonal-vehicular que se genera en la operación y evita el costo de instalar protecciones para proteger el cable de comunicación.

2.2.2. Diseño del prototipo.

El diseño del prototipo a desarrollar para la transferencia inalámbrica en tiempo real de las variables de los yacimientos en la instalación de los equipos electro sumergibles vinculará el cable de potencia que alimenta el sistema con el panel del sensor de fondo, las variables registradas en el panel serán capturadas y enviadas por el módulo emisor de acuerdo a la dirección Modbus de cada variable. En el cuarto de máquinas se encuentra el módulo receptor que muestra los datos transferidos inalámbricamente

mediante la red LoRaWAN de forma puntual y gráfica, adicional, los parámetros se pueden descargar a una base de datos.

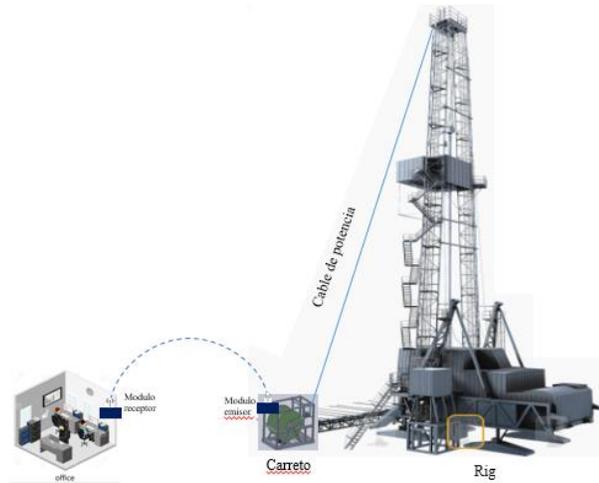


Fig. 23. Diseño de red y componentes de comunicación.

2.2.2.1. Módulo Inalámbrico LoRa.

Para experimentar los beneficios de LoRa en el campo de IoT se puede utilizar el módulo inalámbrico AS66-DTU20 que es una radio de datos inalámbrico industrial de 100mW con alta estabilidad, rango de operación 915MHz, la tarjeta del módulo central tiene el chip RF de última generación SI4463 (Anexo 1), entrada y salida de nivel RS232 y RS485, para mejorar la anti interferencia y la estabilidad de la transmisión el módulo adopta el eficiente algoritmo de codificación de corrección de errores que se caracteriza por tener una alta eficiencia de codificación y una robusta capacidad de rectificación de errores, en el Anexo 2 se puede encontrar el datasheet del fabricante con la información y detalles del módulo de comunicación AS66-DTU20.



Fig. 24. Módulo inalámbrico AS66-DTU20.

Fuente: [30]

Características.

- Transmisión punto a punto (transparente y de activación)
- Corrección de errores de entrelazado cíclico eficiente (máximo 64bits)
- Sensibilidad de recepción de hasta -121 dBm, rango 2200 m.
- Relé automático y transmisión continua
- Cifrado AES
- Múltiples niveles de potencia de transmisión
 - 4 niveles de potencia ajustables (0-3), variación de 3dBm.
 - Rango de potencia: 11-20 dBm, máximo 100 mW.
- Múltiples rangos de velocidad de transmisión.
 - Por defecto 9600bps
- Múltiples velocidades de aire.
 - Por defecto: 1Kbps.
- Frecuencia 900 – 925.5 MHz, proporciona 256 canales.
- Rango de voltaje de entrada: 8V – 28VDC
- Datos circulares 250 FIFO
 - Transmisión FIFO de 256 bytes.
 - Recepción FIFO de 256 bytes.
 - Transmisión automática.
- Transmisión de datos y monitorización.
- Transmisión punto a punto.

- Los datos enviados por el módulo aleatorio se pueden recibir por el módulo designado.
- Se puede realizar redes, transmisiones y otras aplicaciones.

Parámetros eléctricos del módulo inalámbrico AS66-DTU20.

La tabla III muestra las especificaciones eléctricas del módulo inalámbrico AS66-DTU20 según el fabricante.

Tabla 3. Especificaciones eléctricas del módulo inalámbrico AS66-DTU20

Parámetro	Por defecto	Unidad
Tensión de alimentación	8-28	VDC
Corriente de transmisión	43-78	mA
Corriente de recepción	33	mA
Frecuencia de operación	915	MHz
Potencia de transmisión	11.-20	dBm
Velocidad de aire	1K	bps
Sensibilidad de recepción	-121	dBm
Temperatura de operación	-40/85	C
Humedad de operación	10/90	%
Temperatura de almacenamiento	-40/+125	C

Fuente: [31]

2.2.3. Implementación del prototipo.

Considerando que la comunicación es punto a punto (P2P), para la implementación del prototipo se requiere enlazar los dos módulos inalámbricos AS66-DTU20, el emisor y receptor para lograr la transferencia de las variables del yacimiento (presión, temperatura, corrientes de fuga y vibración), en la figura 25 se puede observar los módulos emisor y receptor.

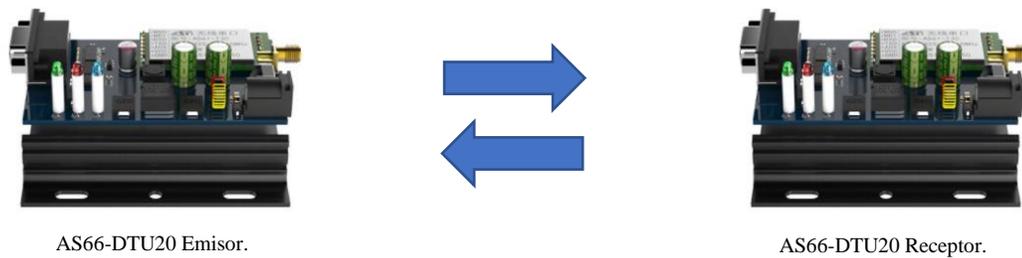


Fig. 25. Emisor - receptor módulos AS66-DTU20.

Fuente: [31]

El sensor de fondo y el panel del sensor necesitan un elemento físico para su vinculación y transferencia de las variables del yacimiento, el cable de potencia trifásico proporciona la facilidad de las conexiones superficiales en aplicaciones electro sumergibles.

La telemetría DHT puede ser de dos tipos, digital y analógico, en función del diseño del equipo se seleccionan los sensores de fondo, en la figura 26 de puede observar el lazo de comunicación del sensor de fondo (fondo y superficie).

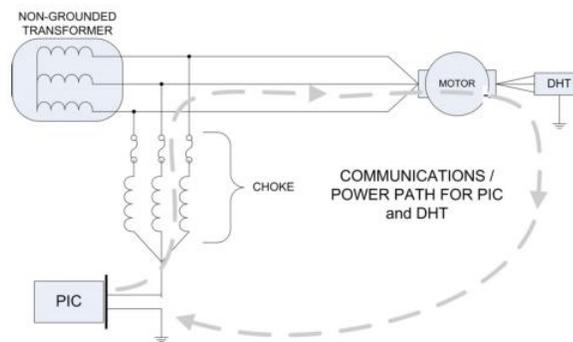


Fig. 26. Lazo de comunicación del DHT

Fuente: [32]

En la siguiente tabla se puede observar las características de la herramienta de fondo (sensor) con sus respectivas tolerancias.

Tabla 4. Especificaciones del instrumento de fondo

Parametro	Rango	Exactitud herramienta	Resolucion	Tiempo de actualizacion
Presion de Intake	0@5800 Psi	± 5 Psi	0.1 Psi	4 s
Presion de Descarga	0 @ 5800 Psi	± 5 Psi	0.1 Psi	4 s
Temperatura de Intake	0 @ 150 C	± 2 C	0.1 C	4 s / 8 s
Temperatura de Motor	0 @ 409 C	± 2 C	0.1 C	36 s
Vibracion	0 @ 30 g	1 g	0.1 g	Variable
Corriente de fuga	0 @ 25 mA	0.05 mA	0.001 mA	Variable

Fuente: [32]

2.2.4. Conexión de los módulos de comunicación AS66-DTU20

Considerando que la transmisión es inalámbrica, las conexiones del prototipo se dividen en 2 etapas.

- Conexión de transmisión.

Una vez energizado el módulo emisor de comunicación AS66-DTU20, de la salida RS232 del módulo de comunicación se conecta al conector RS232 de la Comm Card (tarjeta de comunicación) del panel del sensor, el cual se encarga de vincular las lecturas de las variables del yacimiento. El módulo emisor tiene la misión de capturar los datos generados por la herramienta del sensor de fondo, los cuales se visualizan en el panel del sensor, esta información es posteriormente enviada al módulo receptor. En la figura 27 se puede apreciar el diagrama de flujo del módulo emisor.

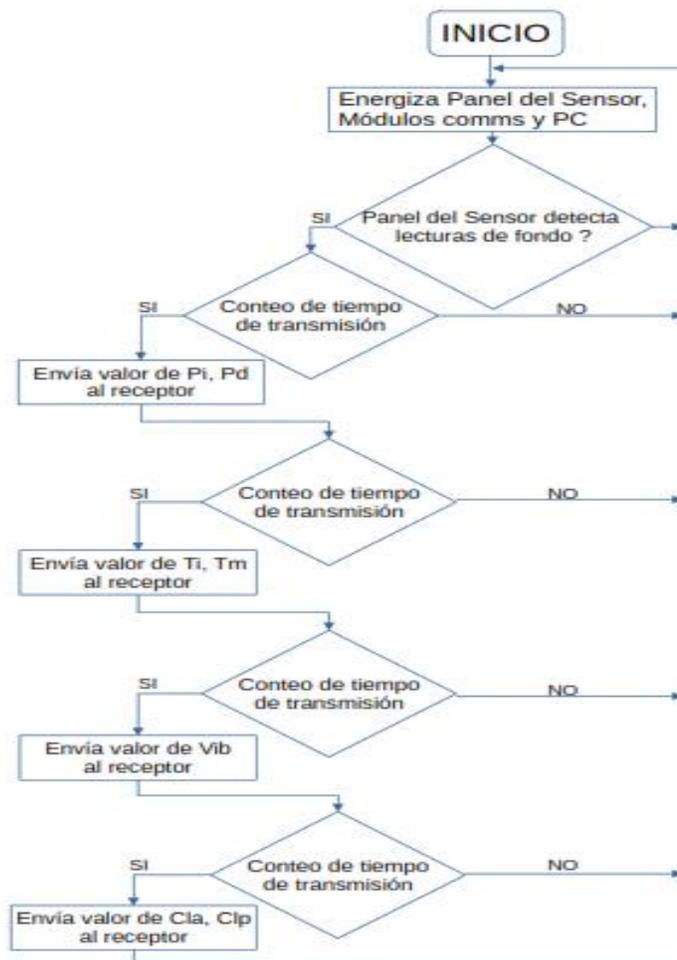


Fig. 27. Diagrama de flujo del módulo emisor.

- Conexión de recepción.

El módulo emisor envía los datos de manera inalámbrica al módulo receptor de comunicación AS66-DTU20 para que este lo procese y transmita la información, el enlace del módulo se lo realiza mediante la conexión RS232 del módulo a la entrada USB de la PC como se puede observar en la figura 28.

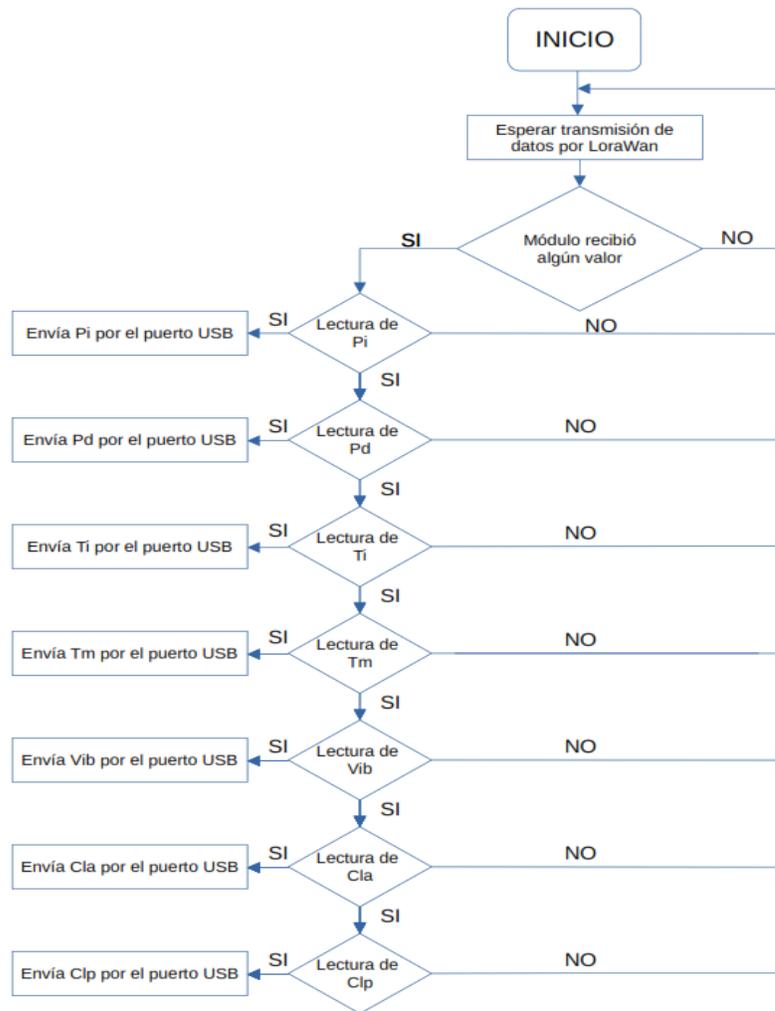


Fig. 28. Conexión de los módulos de comunicación.

- **Programación de los módulos de comunicación AS66-DTU20.**

Para la instalación de los módulos de comunicación AS-DTU20 se debe tomar en cuenta la recomendación del fabricante para la conexión entre la PC y los módulos de comunicación, considerando que la conexión a la PC puede ser por los puertos RS232 - RS485 y los módulos presentan entrada RS232, en la figura 29 se observa las diferentes opciones de conexión entre la PC y los módulos de comunicación.

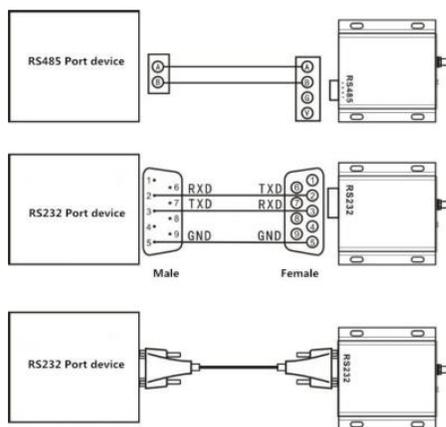


Fig. 29. Diagrama de recomendaciones del fabricante para conexiones de los módulos.

Fuente: [30]

Antes de programar los módulos de comunicación AS-DTU20 se debe instalar los controladores (para Windows) de los módulos de emisión y recepción, posteriormente abrir el Administrador de dispositivos y verificar la numeración de los puertos de cada módulo como se observa en la figura 30.

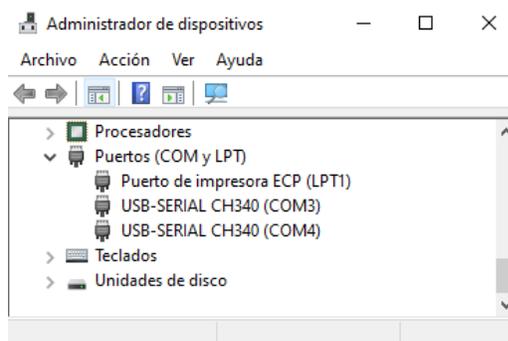


Fig. 30. Instalación de los controladores de los módulos de comunicación.

Por medio de programas de comunicación, los módulos AS66-DTU20 se deben programar de manera individual con los mismos protocolos seriales de comunicación (bits de datos, bits de sincronización, bits de paridad y tasa de baudios), y para asegurar su funcionamiento se recomienda realizar una

comprobación de enlace de los dos módulos, en la figura 31 se puede observar la prueba de comunicación de los módulos emisor y receptor.

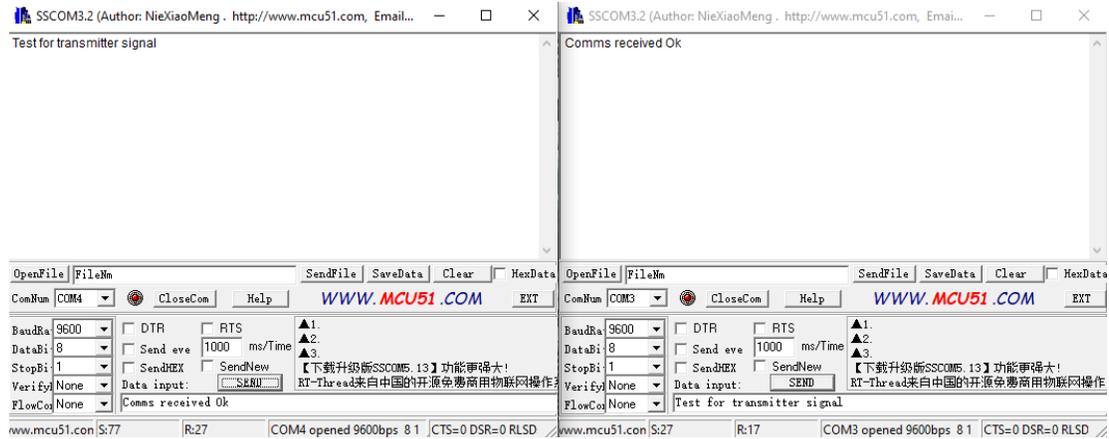


Fig. 31. Prueba de comunicación de los módulos emisor y receptor.

Para transferir las lecturas del panel del sensor hacia los módulos de comunicación, los protocolos seriales del panel deben ser parametrizados de manera semejante a la de los módulos emisor y receptor, la figura 32 señala la configuración del panel de control.

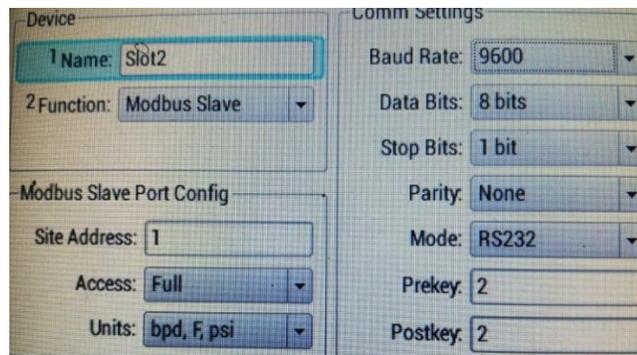


Fig. 32. Parametrización del panel de control.

Una vez programados los módulos de comunicación AS66-DTU20 se requiere vincular el módulo emisor con el panel del sensor de fondo y por medio de programas de comunicación confirmar las lecturas de acuerdo a la dirección

Modbus de cada variable, en el Anexo 3 se puede observar las direcciones Modbus de las variables del sensor de fondo, la figura 33 indica la confirmación de valores de acuerdo a las variables a monitorear.

The screenshot shows a software interface for Modbus communication. At the top, there are 'Read Status' and 'Write Status' sections, both showing 'OK' and '0' respectively. Below this is a 'Modbus Settings' section with fields for 'Device address' (1), 'Data type' (3: Input registers), 'Start address' (2135), 'Length' (14), 'Scan rate' (1000 [ms]), and 'Data format' (Decimal). A 'Status' indicator shows 'Not connected'. To the right, a table displays the following data:

Address	Value
32135	1
32136	0
32137	30816
32138	30794
32139	0
32140	2019
32141	2023
32142	100
32143	809
32144	6
32145	807
32146	810
32147	0
32148	195

Fig. 33. Confirmación de valores de acuerdo a las direcciones Modbus.

El módulo emisor tiene la función de capturar los datos mostrados por el panel del sensor de fondo después de cierto tiempo, posteriormente los datos deben ser enviados al módulo receptor para que este lo reciba, almacene y transmita de forma inalámbricamente la información, esta operación se la realizará en toda la instalación del equipo electro sumergible de acuerdo al requerimiento del usuario (operador)

- **Base de datos e interface**

La información de los datos del sensor de fondo se la obtiene por medio del módulo receptor de comunicaciones y se visualiza el comportamiento de las variables de manera puntual y gráfica en la HMI (Interface Humano Maquina) de acuerdo al estándar ANSI/ISA-101.01, el cual se encarga de abordar la filosofía, diseño, implementación, operación y mantenimiento de las HMI para los sistemas de automatización de procesos a lo largo de su ciclo de vida y ayudar al operador a desarrollar habilidades para manejar efectivamente la respuesta a situaciones anormales.

Los principales criterios de diseño de las HMI son los siguientes:

- Dato no es igual que información, las personas son capaces de reconocer patrones gráficos.
- La información se muestra de manera procesable, significativa y contextualizada en lugar de datos brutos.
- Se utiliza un conjunto limitado de colores para reducir la carga cognitiva.
- Representación apropiada de alarmas.
- Navegación y jerarquía de pantallas.

De acuerdo a los criterios de diseño de la HMI acorde a la aplicación establecida, se procedió a crear la base de datos, en la cual se procesa la información enviada por el modulo emisor con la fecha y hora que fueron recolectados, en la figura 34 se puede observar el diagrama de flujo que contiene la lógica de programación para la visualización de datos a través de la PC.

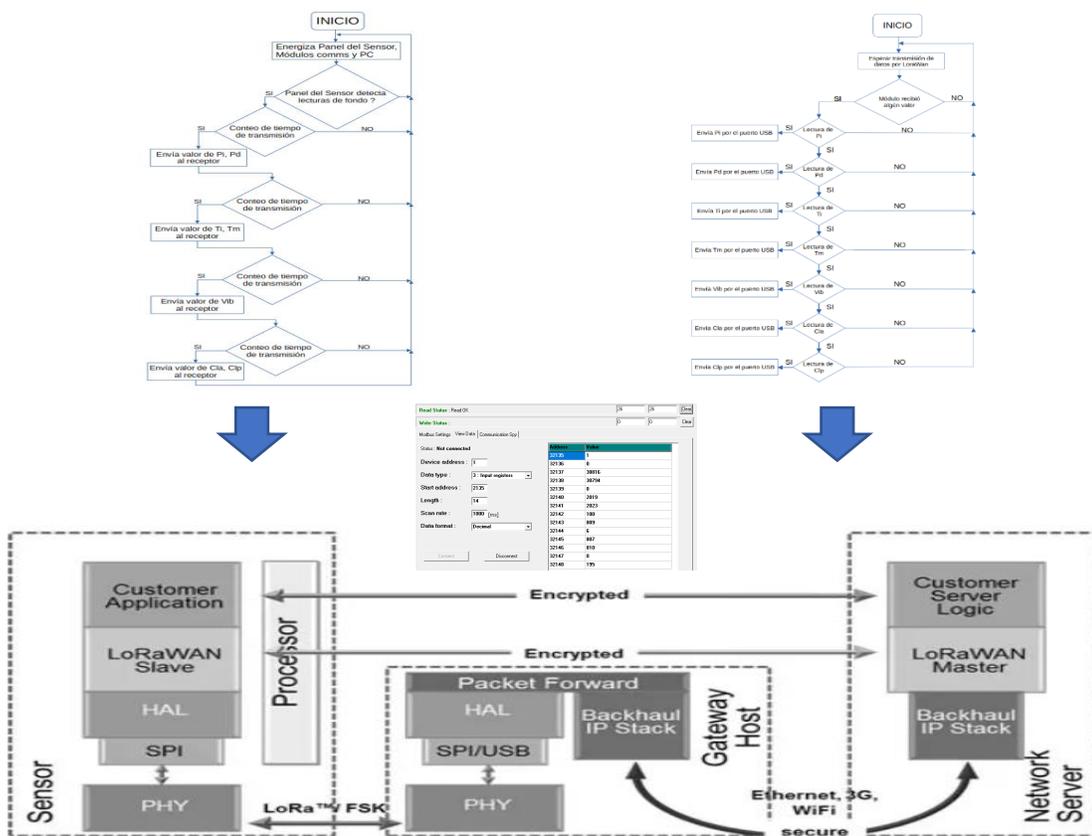


Fig. 34. Interface de visualización de variables.

El software que se utilizó para este proyecto es un entorno de desarrollo y diseño de sistemas con lenguaje visual gráfico, el programa utiliza el lenguaje G (lenguaje gráfico) que acelera la productividad o desarrollo de programas para una mejor eficiencia en el desarrollo de sistemas, al desarrollar el programa se crea un instrumento virtual o VI que contiene la interfaz gráfica del programa y el diagrama de bloques (código) los cuales establecen una comunicación con los módulos.

La programación inicial se desarrolló en el diagrama de bloques, en el cual se puede modificar o crear las condiciones del programa, una vez terminado la programación el usuario final puede visualizarlo en el panel frontal, donde se encuentra todo lo necesario para controlar el sistema. Actualmente el software de programación se puede utilizar en los sistemas operativos de Microsoft Windows, MAC OS X y Linux.

En general el software es utilizado para el manejo de datos, la comunicación entre circuitos externos o computadoras, los principales tipos de enlace son:

- Puerto serial
- Puerto paralelo
- GPIB
- PXI
- VXI
- TCP/IP
- Bluetooth
- USB

Cada archivo del programa cuenta con dos interfaces: panel frontal o de usuario y el diagrama de bloques los cuales cuentan con paletas que contienen los objetos necesarios para implementar y desarrollar las tareas.

El panel frontal es la interfaz gráfica que le permite al usuario ingresar datos de condiciones y visualizar la salida de los datos, estos pueden contener perillas, botones, indicadores y gráficos. Para nuestro caso los controles son las variables de entrada y los indicadores sirven para presentar los resultados entregados por el programa y no

pueden ser manipulados por el usuario, en nuestro proyecto con los antecedentes del mapa modbus y cantidad de registros, la única variable a seleccionar es el número de puerto serial, la cual depende de la configuración inicial y disponibilidad de puertos de la PC.

Cada control o indicador del panel frontal se encuentra enlazado con una terminal correspondiente en el diagrama de bloques, una vez ejecutado la aplicación los valores de los controles fluyen a través del diagrama de bloques, los mismos que son utilizados en las funciones del diagrama, y los resultados se convierten en otras funciones o indicadores.



Fig. 35. Panel frontal.

El diagrama de bloques contiene el código de la fuente gráfico, posee estructuras y funciones incorporadas en las bibliotecas del programa que vinculan las entradas con las salidas creadas en el panel frontal, cada uno de los nodos en el diagrama de bloques son conectados por cables, incluyendo indicadores y controles de terminal.

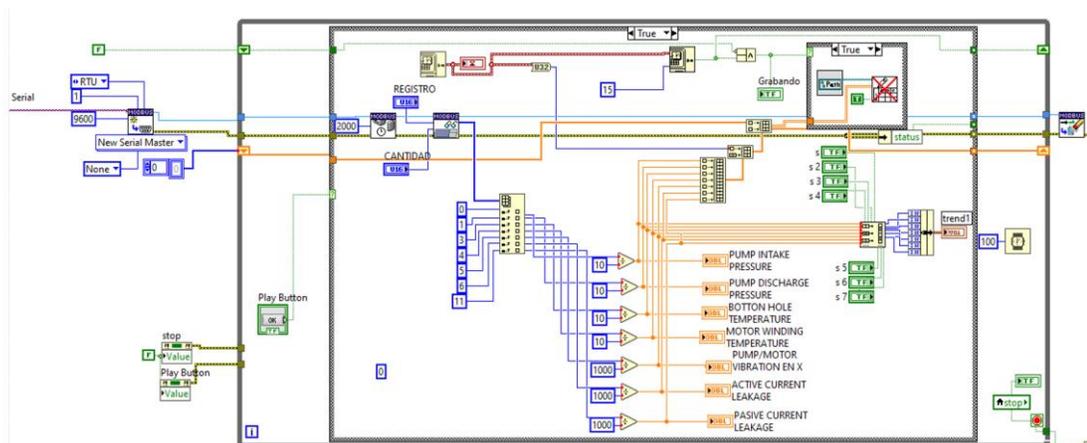


Fig. 36. Lazo principal

Con el fin de optimizar la transmisión y almacenamiento de los datos registrados por el panel se vinculó otro lazo paralelo dentro de la secuencia.

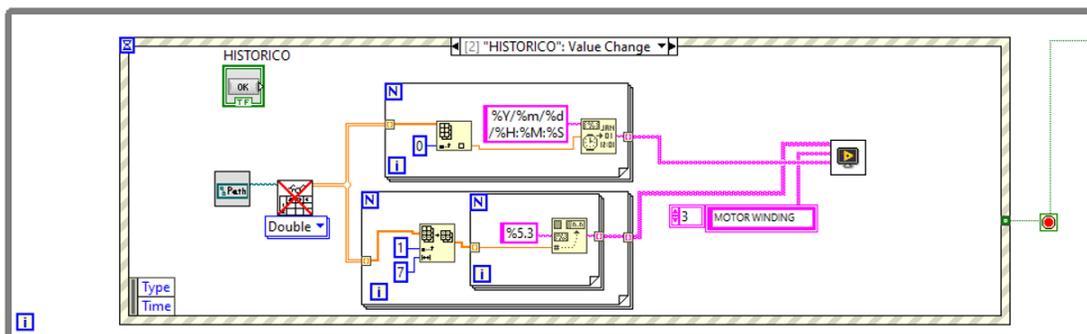


Fig. 37. Lazo paralelo

Para la programación se consideró en primera instancia las direcciones modbus que corresponden a cada variable, la visualización gráfica y el almacenamiento de los datos obtenidos, con la ayuda de la librería del programa el orden cronológico de vinculación de estructuras y funciones fue el siguiente:

- Controlador de puerto serial
- Creación del lazo principal

- Lazo de espera de respuesta (tiempo de respuesta de enviar/recibir datos)
- Registrar el registro para identificar el número de partida para conteo de direcciones modbus.
- Establecer la cantidad de registros va a leer el programa.
- Empaquetar los datos anteriores mediante la función (ARRAY) para enlazar los siguientes datos.
 - Grafica de variables.
 - Visualización de parámetros de operación.
 - Registrar la fecha de obtención de datos en formato de fecha, hora, minutos y segundos.
- Crear otro lazo paralelo dentro de la secuencia, estructurado para que el ciclo se cumpla una sola vez (descargar los datos)
 - La secuencia de descarga es de acuerdo con las direcciones modbus que las establecimos anteriormente.
- Detener el ciclo de transmisión mediante el botón STOP.

- **Implementación del prototipo.**

Los módulos de comunicación AS66-DTU20 (emisor y receptor), el panel del sensor de fondo del sensor de fondo y la PC con los programas computacionales para visualización y almacenamiento de datos, es posible observar la transmisión de datos en tiempo real de las variables de los yacimientos (presión, temperatura, corrientes de fuga y vibración) acorde a las condiciones del pozo.

- **Validar funcionamiento del prototipo.**

Con las variables obtenidas en tiempo real por el prototipo y visualizadas en la interfaz se realizará el análisis comparativo y estadístico de las variables transmitidas con los datos de las lecturas del sensor de fondo capturadas directamente en el panel del sensor, con el objetivo de cuantificar el comportamiento de los parámetros del yacimiento, garantizar la integridad eléctrica

del sistema e incrementar las opciones de evaluación de futuras operaciones en el pozo luego de la instalación del equipo electro sumergible.

Las variables de presión, temperatura y vibración a diferentes profundidades durante la instalación de equipos electro sumergibles son importantes para:

- Conocer el nivel de llenado del pozo
- Determinar el daño del yacimiento
- Precisar la densidad de fluido del pozo
- Establecer la presión estática a diferentes profundidades.
- Garantizar la integridad del sistema eléctrico post instalación.

2.2.4. Conclusiones.

- Como resultado de los materiales y métodos, se puede concluir la importancia de fundamentar los diferentes métodos de transferencia inalámbrica para determinar la óptima tecnología a desarrollar para satisfacer los requerimientos de campo.
- Para el diseño del prototipo se debe investigar los datos del fabricante de todos los componentes del sistema y verificar la compatibilidad de los mismos.
- De acuerdo con la capacidad, cobertura, costo y consumo energético la red LPWAN ofrece mejores resultados comparado con las tecnologías NB-IoT, LTE-M y Sigfox.

CAPITULO III. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. Introducción y objetivo del capítulo.

La modernización de los procesos industriales exige validar la información para aprovechar al máximo los recursos, tiempo y dinero. La incertidumbre de las variables del yacimiento en la instalación de equipos electro sumergibles para la toma de decisiones se resuelve mediante el aprovechamiento de la tecnología inalámbrica LPWAN vinculado con programas computacionales, en consecuencia, los objetivos del capítulo son:

- Identificar los valores recibidos en la PC luego del proceso de transferencia de comunicación con los módulos de comunicación AS66-DTU20.
- Calcular la exactitud entre las variables del panel del sensor y las variables capturadas y transmitidas.

3.2. Análisis de resultados.

Una vez configurados los dispositivos (panel del sensor de fondo, módulos de comunicación AS66-DTU20 y PC) como se indicó en el capítulo 2, solamente se requiere energizar los mismos para vincular los componentes, en la figura 34 se observa la interfaz de visualización de variables con los datos de temperatura de entrada, temperatura de motor, presión de descarga, presión de entrada, vibración, corriente de fuga activa y corriente de fuga pasiva con sus respectivas unidades. Para activar la comunicación el módulo receptor de comunicación AS66-DTU20 con la PC se debe insertar los siguientes valores en la interfaz de visualización para anclar el protocolo correcto de comunicación de acuerdo a las variables a monitorear según las direcciones Modbus.

- Puerto serial. COM3 (puerto configurado para el estudio), Figura 29.
- Registro. 2136 (dirección Modbus de las variables), Anexo 3
- Cantidad. 12 (cantidad de registros Modbus), Anexo 3



Fig. 38. Configuración de la Interface de visualización de variables

Una vez que se ejecuta la orden de iniciar el programa, se observarán las variables del yacimiento en el bloque de Parámetros del equipo BES. Para activar la visualización grafica se requiere seleccionar las variables de interés a monitorear, la interfaz tiene la capacidad de ajustar la escala y permitir esta acción durante el funcionamiento del programa, la siguiente figura muestra la incorporación de diferentes variables en la interfaz.

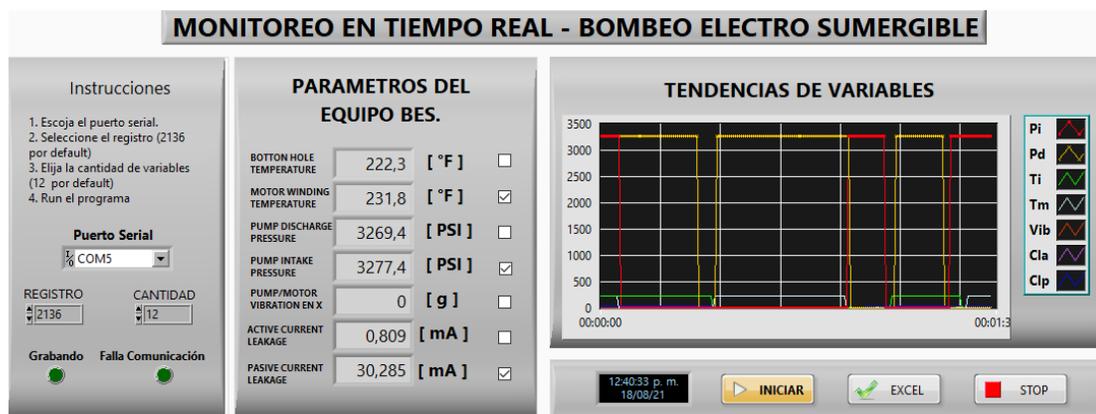


Fig. 39. Selección de variables en la interface

Considerando que actualmente la toma de variables del yacimiento se realiza de manera puntual y manual cada 1000 pies, con la implementación del prototipo se puede observar los datos de manera ininterrumpida, tanto puntuales como gráficos, adicional, la interfaz tiene la opción de guardar y descargar todos los datos que se encuentran en el bloque de Parámetros del equipo BES en una hoja de Excel con la fecha y hora que

fueron recolectados, la figura 40 muestra el casillero para descargar los datos y la figura 41 la base de datos en Excel que genera la interface.



Fig. 40. Casillero de selección para descarga de variables en la interface.

Fecha	PUMP INTAKE PRESSURE [Psi]	PUMP DISCHARGE PRESSURE [Psi]	BOTTON HOLE TEMPERATURE [F]	MOTOR WINDING TEMPERATURE [F]	VIBRATION [g]	ACTIVE CURRENT LEAKAGE [mA]	PASIVE CURRENT LEAKAGE [mA]
2021/05/21 /22:22:43	3,081,600	3,079,400	201,900	202,300	0,010	0,081	0,019
2021/05/21 /22:22:45	3,081,600	3,079,400	201,900	202,300	0,010	0,081	0,019
2021/05/21 /22:23:14	3,081,600	3,079,400	201,900	202,300	0,010	0,081	0,019
2021/05/21 /22:23:15	3,081,600	3,079,400	201,900	202,300	0,010	0,081	0,019
2021/05/21 /22:23:28	3,081,600	3,079,400	201,900	202,300	0,010	0,081	0,019
2021/05/21 /22:23:30	3,081,600	3,079,400	201,900	202,300	0,010	0,081	0,019
2021/05/21 /22:23:59	3,081,600	3,079,400	201,900	202,300	0,010	0,081	0,019
2021/05/21 /22:24:00	3,081,600	3,079,400	201,900	202,300	0,010	0,081	0,019
2021/05/21 /22:24:13	3,081,600	3,079,400	201,900	202,300	0,010	0,081	0,019

Fig. 41. Descarga de variables en la interface

La implementación del prototipo para transmitir inalámbricamente en tiempo real las variables de fondo de los yacimientos se realizaron en la ciudad de Latacunga. Según lo revisado anteriormente, el rango de cobertura de LoRaWAN es de gran alcance con línea de vista, en zonas rurales puede alcanzar hasta 15 Km, mientras que en zonas urbanas puede llegar a los 5 Km.

Considerando que no fue posible conectar físicamente el prototipo al sensor de fondo, se utilizó la tarjeta del panel de control, el cual contiene información real de un sensor que trabajó anteriormente (valores estáticos), por lo que con la implementación del módulo de comunicaciones AS66-DTU20 se puede comparar las variables del panel del sensor y de la interfaz, el monitoreo de variables en la interfaz se realizó por 72

horas de manera continua, debido a la escala los resultados de las variables de presión y temperatura de fondo se muestran en la Figura 39.

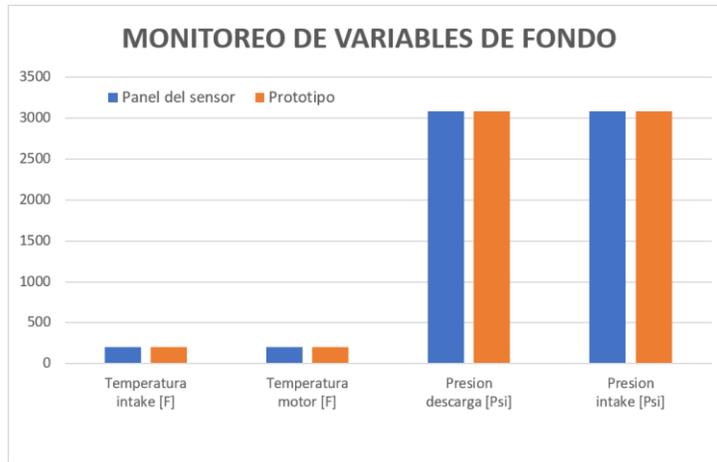


Fig. 42. Monitoreo de variables de presión y temperatura de fondo

Los resultados de las variables de vibración, corriente de fuga activa (Cla) y corriente de fuga pasiva (Clp) en la siguiente tabla.

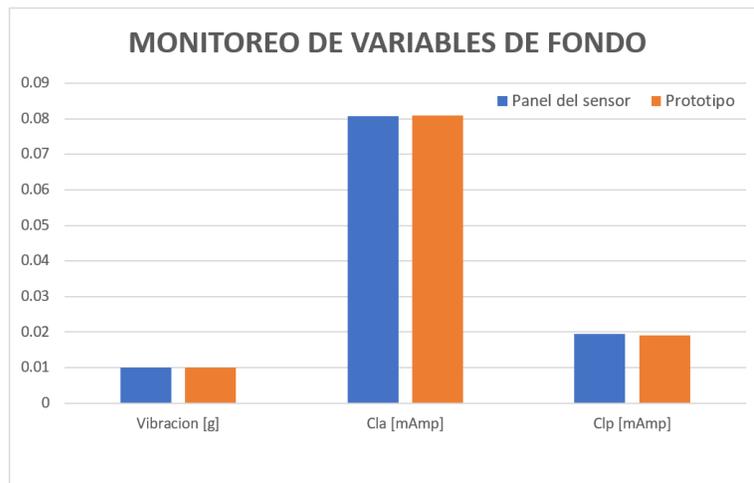


Fig. 43. Monitoreo de variables de Vib, Cla y Clp

Las siguientes figuras indican los datos que muestra el display del sensor de fondo, la interfaz del prototipo y los valores con los registros según las direcciones modbus, los

cuales muestran una similitud de las lecturas en todos los parámetros registrados por el sensor de fondo.

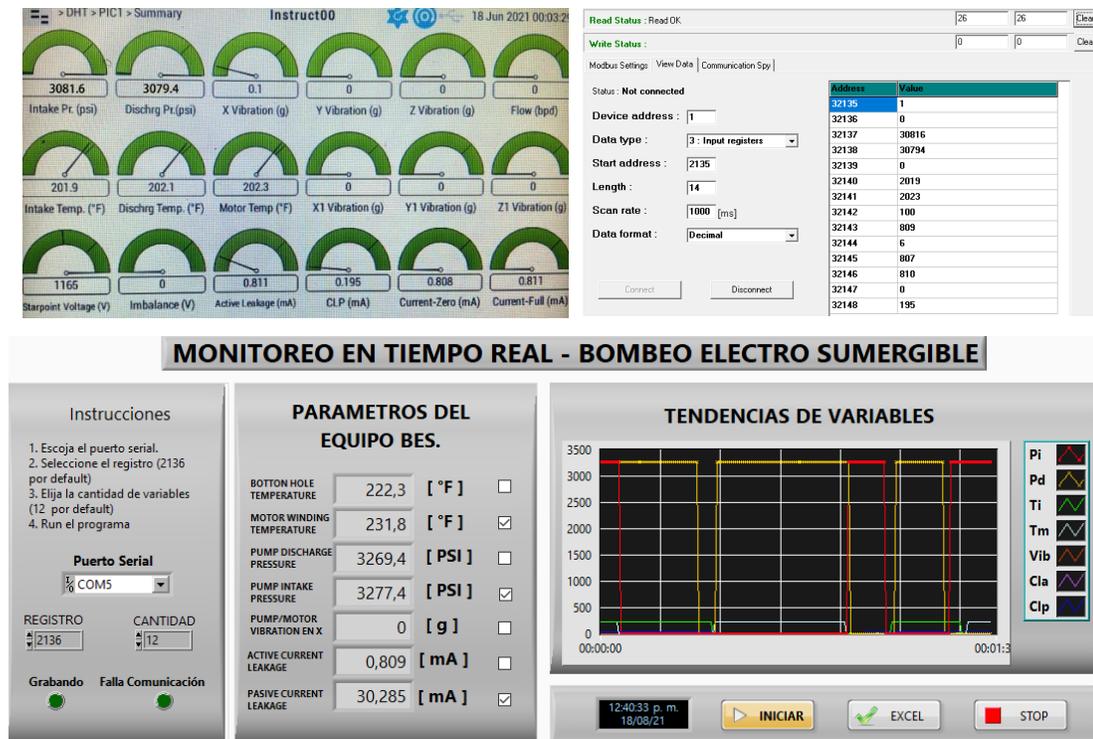


Fig. 44. Monitoreo de variables de fondo en el panel e interfaz.

La tabla VI muestra la comparativa estadística con el error absoluto y porcentaje del error relativo de las lecturas capturadas por el sensor de fondo y las lecturas recibidas por el prototipo.

Tabla 5. Comparativa de variables de transmisión inalámbrica

Parametros BES	Panel del sensor	Prototipo	Error absoluto	Error relativo %
Temperatura intake [F]	201.9	201.9	0	0.00
Temperatura motor [F]	202.3	202.3	0	0.00
Presion descarga [Psi]	3079.4	3079.4	0	0.00
Presion intake [Psi]	3081.6	3081.6	0	0.00
Vibracion [g]	0.01	0.01	0	0.00
Cla [mAmp]	0.0808	0.081	0.0002	0.00
Clp [mAmp]	0.0195	0.019	-0.0005	-0.03

De acuerdo a la tabla VI se puede observar que el prototipo presenta una excelente exactitud y precisión, los valores de los errores calculados de las medidas capturadas por el sensor de fondo y las lecturas del prototipo reflejadas en la interface son menos del 0.1%, garantizando la fiabilidad de los parámetros de fondo en tiempo real de las variables de los yacimientos en la instalación de los equipos electro sumergibles.

El presente proyecto pretende mostrar las ventajas de aplicar la comunicación inalámbrica en la instalación de los sistemas electro sumergibles, entre los más importantes tenemos:

- Largo alcance.
- Consumo reducido de energía.
- En el sector petrolero presenta la mejor opción para el monitoreo ya que no requiere de infraestructura previa.
- Fácil configuración en comparación con otras tecnologías.
- Fiabilidad y confiabilidad en los datos enviados y recibidos.
- Bajo costo de mantenimiento e instalación.

- Contribuye a disminuir la exposición del personal técnico a ejecutar trabajos en ambientes con atmosferas explosivas, por ende, mejora la seguridad laboral y salud ocupacional.

Con la continuidad de la operación debido a la implementación del prototipo para la adquisición de variables de fondo de los yacimientos en tiempo real mediante tecnología inalámbrica en la instalación de los equipos electro sumergibles se puede estimar el impacto económico en el proceso de reacondicionamiento de pozos petroleros, en la tabla VII se indica los costos de los servicios para el proyecto considerando 5 días de operación con un equipo de reacondicionamiento, profundidad de 10.000 ft y 10 lecturas del sensor de fondo de forma manual cada 1000 ft.

Tabla 6. Costos operativos de la operación BES

Servicio	Horas servicio	Horas con prototipo	Costo diario	Costo total	Costo con prototipo
Renta de taladro (horas)	120	100			
Renta de taladro (costo)			\$17,000	\$85,000	\$70,833
Movilizacion				\$25,000	\$25,000
Slick line				\$20,000	\$20,000
Agua de matado				\$21,000	\$21,000
Pildora viscosa				\$2,000	\$2,000
Spooler				\$5,000	\$5,000
BES				\$275,000	\$275,000
Echometer				\$1,000	\$1,000
Logistica de materiales				\$5,000	\$5,000
Vacuum				\$3,000	\$3,000
IT & telecom				\$1,000	\$1,000
Combustible (diesel)			\$3,000	\$15,000	\$15,000
Corrida de tubing				\$20,000	\$20,000
Accesorios completacion				\$26,500	\$26,500
Backpressure de cabezal				\$4,000	\$4,000
Total	120	100	\$20,000	\$508,500	\$494,333
Diferencia					\$14,167

La tabla VII indica el resumen económico de los costos operativos para una operación de 5 días (120 horas), considerando que con la implementación del prototipo de comunicaciones y con la operación continua, el tiempo de operación se reducirá a 100 horas como se puede observar en la figura 45.

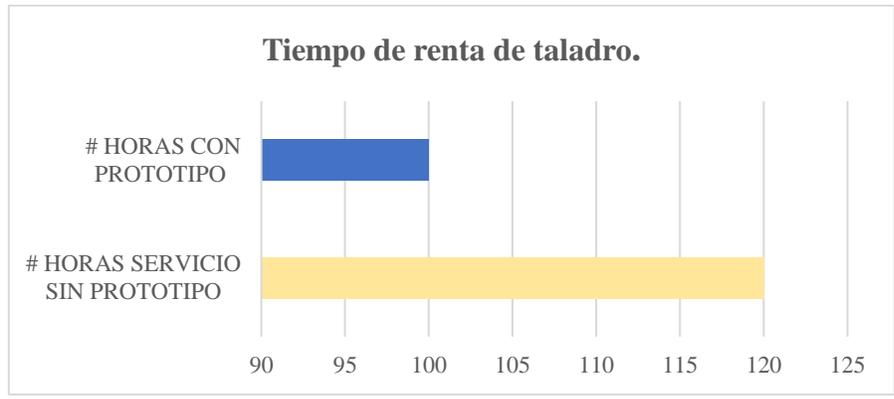


Fig. 45. Tiempo de renta del taladro para la operación.

De acuerdo con la reducción del tiempo de operación del taladro debido a la implementación del prototipo de comunicaciones inalámbricas, el costo de renta del equipo de reacondicionamiento en los 5 días de disminuirá de \$85.000 USD a \$70.883 USD y el costo total del trabajo de reacondicionamiento también descenderá de \$508.500 USD a \$494.900 USD, en la figura 46 se puede observar la comparativa antes y después de la implementación del prototipo de comunicaciones inalámbricas

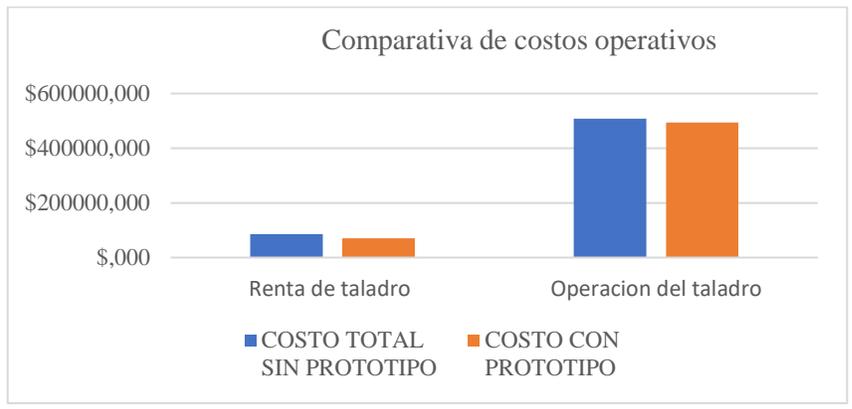


Fig. 46. Comparativa de costos operativos

3.3. Valoración técnica y económica de los resultados.

Con el desarrollo del prototipo para la adquisición de variables de fondo de los yacimientos en tiempo real mediante tecnología inalámbrica y el análisis estadístico de

los resultados, muestran un índice de confiabilidad de las lecturas capturadas y transmitidas en tiempo real por el prototipo que alcanza los 99.9%, los cuales pueden proporcionar a planificar de mejor manera las futuras operaciones. Con la operación continua en la instalación del equipo electro sumergible el personal técnico no tiene la necesidad de registrar las lecturas del yacimiento de manera manual y puntual, generando un ambiente seguro de trabajo.

Los datos visualizados en el panel del sensor de fondo son enviados, transmitidos inalámbricamente y capturados en tiempo real se encuentran debidamente identificados de acuerdo a la fecha y hora de la recepción de datos, debido a que en la programación de la interface las variables fueron vinculadas de acuerdo a cada dirección modbus, datos que son de suma importancia para identificar factores como nivel de fluido del pozo, densidad del fluido de control e integridad eléctrica del sistema, ya que la pérdida de señal del sensor significaría corto circuito del cable de potencia por golpe o falla del sensor de fondo, condición que no es aceptada por el cliente para el arranque del equipo electro sumergible.

En la tabla VIII se observa el cronograma de captura de lecturas de fondo sin la implementación del prototipo de comunicaciones, según el procedimiento de instalación de equipos electro sumergibles se deben tomar lecturas del sensor de fondo cada 1000 ft, la duración por cada toma puntual de parámetros del yacimiento es de 2 horas, tiempo que incluye los trabajos del personal que trabaja en el equipo de reacondicionamiento para asegurar la integridad de la tubería de producción y cerrar el pozo, considerando que la profundidad promedio de asentamiento del equipo de fondo en nuestro país es 10.000 ft significa que debemos tomar 10 datos puntuales de las lecturas del yacimiento, lo que implica 20 horas de trabajo y exposición del personal a riesgos laborales.

Tabla 7. Cronograma de captura de medidas sin el prototipo de comunicaciones

Numero de lecturas del sensor	Profundidad [ft]	Tiempo [horas]
1	1000	2
2	2000	2
3	3000	2
4	4000	2
5	5000	2
6	6000	2
7	7000	2
8	8000	2
9	9000	2
10	10000	2
Total		20

En términos económicos se puede mencionar que la implementación del prototipo para la adquisición de variables de fondo de los yacimientos en tiempo real mediante tecnología inalámbrica en el proyecto representa una reducción del tiempo de operación de 20 horas, equivalente al -16% del tiempo total y disminución de los costos operativos del 13.6 K\$USD (-2.7%) debido a que con el prototipo la operación será continua y sin interrupciones, es decir no tendremos paradas programadas para la toma de medidas de las variables del yacimiento.

Además, se puede mencionar, que más allá de la implantación del prototipo de comunicaciones para disminuir los costos operativos, se puede lograr reducir el tiempo de operación y arrancar de una manera óptima los equipos electro sumergibles ya que conoceremos en tiempo real los parámetros estáticos del yacimiento, logrando minimizar la producción diferida por trabajos de reacondicionamiento, la validación de la comunicación inalámbrica en tiempo real del prototipo por parte del especialista en instalación de equipos electro sumergibles (Ingeniero de campo) se realizó con un sensor de fondo y panel del sensor en superficie.

3.3.1. Conclusiones.

- Se determinó que mediante el prototipo de comunicaciones inalámbricas en tiempo real se logró capturar, transmitir y visualizar las variables de fondo de los yacimientos con un amplio rango de exactitud y confiabilidad.
- La implementación del prototipo de comunicaciones inalámbricas en tiempo real tiene la capacidad de disminuir el costo operativo y el tiempo de operación de la instalación electro sumergible de 120 horas a 100 horas, lo que equivale al 16%, dicho de otra manera, el 80% de 1 día de operación se recortó para así arrancar el equipo de fondo y lograr la producción esperada de manera inmediata.
- De acuerdo con los resultados de la valoración técnica y económica, el diseño e implementación de la red LPWAN presenta mejores resultados y la posibilidad de generar un ambiente seguro de trabajo en la instalación de los equipos electro sumergibles, debido a que se disminuye la probabilidad de crear una fuente de ignición.

CONCLUSIONES GENERALES.

- Posterior a la fundamentación teórica de la red LPWAN se puede observar que ofrece mejores resultados en cuanto a la capacidad, cobertura, seguridad y costo energético comparado con la transmisión de datos por cable.
- La introducción de la tecnología inalámbrica LPWAN en la instalación de equipos electro sumergibles genera un índice de confiabilidad en la transmisión de variables de los yacimientos del 99.9%.
- La incidencia económica por el desarrollo y aplicación del prototipo para la adquisición de variables de fondo de los yacimientos en tiempo real mediante la tecnología inalámbrica en la instalación de equipos electro sumergibles presenta una disminución de los costos operativos (-2.7%) y tiempo de operación (-20 horas).

- Con la implementación del prototipo de comunicaciones en tiempo real mediante tecnología inalámbrica se genera un ambiente seguro de trabajo para personal técnico de campo, ya que no están expuestos al contacto físico con los componentes eléctricos en condiciones climatológicas adversas y evitar trabajar en áreas peligrosas con presencia de gases líquidos o vapores inflamables.

RECOMENDACIONES.

- Implementar en el prototipo de comunicaciones la transmisión de parámetros eléctricos que reflejen la integridad eléctrica del motor eléctrico.
- Asociar el prototipo de comunicaciones en el interior del panel del sensor a fin de optimizar la interconexión de los módulos.
- Vincular el prototipo de comunicaciones a la red de monitoreo del cliente en la instalación de equipos electro sumergibles.
- Desarrollar el prototipo para la adquisición de variables de fondo de los yacimientos en tiempo real mediante la tecnología inalámbrica con diferentes marcas de sensor de fondo.

Bibliografía

- [1] OPEP, «OPEP Monthly Oil Market Report,» OPEP, Vienna , Austria, 2020.
- [2] A. a. G. C. T. Satter, Integrated Petroleum Reservoir Management, Tulsa Oklahoma USA: PennWell Books, 1994.
- [3] K. R. y. P. D. Klotz JA, «Effect of Perforation Damade on Well Productivity,» Journal of Petroleum Technology, vol. 26, nº 1303.
- [4] L. W. Lake, PETROLEUM ENGINEERING HANDBOOK, TX USA: Editor-in-Chief, 2007.

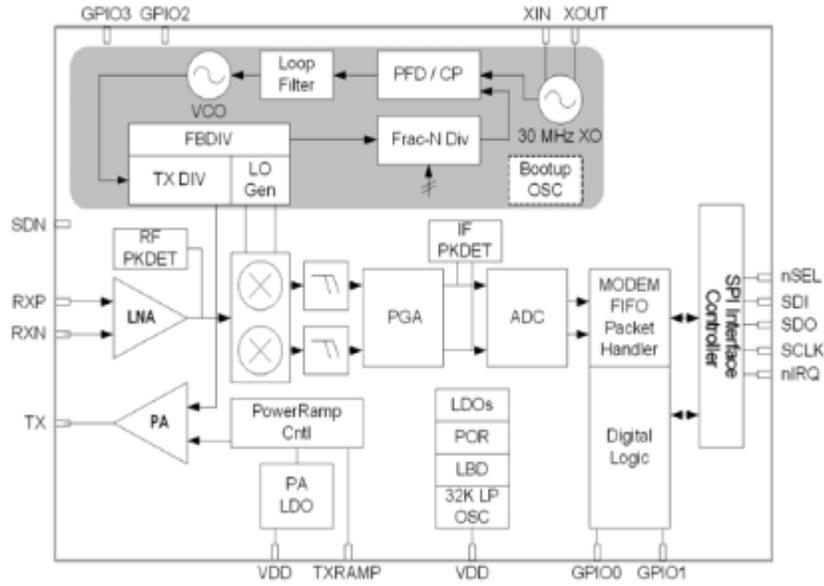
- [5] M. D. S. J. D. Stair, «Intelligent wells: Design and construction,» de SPE 90215, USA, 2004.
- [6] P. K. H. Potters, «Reservoir surveillance and smart field,» de IPTC 11039, USA, 2005.
- [7] A. Anderson, «tion of intelligent wells with multi-laterals, sand control and electric submersible pumps.,» de IPTC 10905, USA, 2005.
- [8] M. Keene, «Offshore completions overview,» de Journal of Petroleum Technology, USA, 2002.
- [9] M. V. & M. C. E. Pibaque, «Ingenieria en Sistemas de Comutación,» Universidad del Sur de Manabi, 2012. [En línea]. Available: <http://repositorio.unesum.edu.ec/handle/53000/26>. [Último acceso: 5 Septiembre 2020].
- [10] K. E. S. & C. L. Rose, La Internet de las Cosas-Una breve reseña, Madrid: ISOC, 2015.
- [11] L. LoRa-Alliance, «<https://lora-alliance.org/>,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.lora-alliance.org/>. [Último acceso: 17 9 2020].
- [12] L. Dake, Fundamentals of Reservoir Engineering, The Hague, The Netherlands: ELSEVIER SCIENCE B.V, 2002.
- [13] E. d. P. d. l. Patagonia, “Manual de Producción”, Unidad de Gestión Golfo San Jorge, Argentina: Pan American Energy, 2002.
- [14] M. Whitson y G. a. H. Cutis, Well Performance, USA: Prentice-Hall Inc., 1985.
- [15] F. Gaviara, R. Santos y L. O., «Pushing the Boundaries of Artificial Lift Applications: SAGD ESP installations in Canada,» de SPE 110103, Canada, 2007.
- [16] G. Takacs, Gas Lift Manual, USA: PennWell Corporation, 2005.
- [17] REDA, Submersible Pump Handbook, Battersille USA: REDA, 2001.
- [18] Centrilift, Submersible Pump Handbook, Oklahoma USA: Centrilift, 1994.
- [19] B. Adam, Schlumberger Oilfield Glossary, Texas USA: Schlumberger, 2015.

- [20] B. Kermit, The Technology of Artificial Lift Method, USA: Hydraulic Pumping. Pennwell Publishing Company, 1980.
- [21] T. D. G. R. R. E. M. M. J. C. & C. J. P. Mendes, Smart home communication technologies and applications: Wireless protocol assessment for home area network resources, USA: Energies, 2015.
- [22] M. Wedd, «Aplicaciones de Bluetooth IoT: de BLE a malla.» 17 10 2018. [En línea]. Available: <https://www.iotforall.com/bluetooth-iot-applications/>. [Último acceso: 19 9 2020].
- [23] Efor, «Tecnologias de comunicacion para IoT,» [En línea]. Available: <https://www.efor.es/sites/default/files/tecnologias-de-comunicacion-para-iot.pdf>. [Último acceso: 22 9 2020].
- [24] Y. Tasneem, M. Rwan, A. Fadi y Z. Imran, «Internet of Things (IoT) Security: Current Status, Challenges and Countermeasures,» de International Journal for Information Security Research, USA, 2015.
- [25] P. K. H. L. A. T. A. A. a. N. S. A. J. Wixted, "Evaluation of LoRa and LoRaWAN for wireless sensor networks", USA: IEEE SENSORS, 2016.
- [26] R. Fleshman y O. Lekic, Artificial Lift for High-Volum Production, USA: Oilfield Review, 1999.
- [27] NEC, «Diseno de Instalaciones Electricas en Plantas Industriales,» de Petroleos Mexicanos Pemex, Cd de Mexico, Pemex, 2003, pp. 1-85.
- [28] P. R. Egli, «Indigoo.com,» 2015. [En línea]. Available: http://indigoo.com/dox/itdp/12_MobileWireless/LPWAN.pdf?_ga=2.17821886.621052436.1604600264-284755478.1604600264. [Último acceso: 05 Noviembre 2020].
- [29] A. C. W. Valarezo, «Disenio y estudio del uso de una red LPWN (Low Power Wide Area Network) para la optimizacion de la medicion, comunicacion y correccion de errores, en el consumo de agua potable,» ESPOL, Guayaquil, Ecuador, 2017.
- [30] Ashining, «AS66_DTU20 Data Sheet,» Ashining , China, 2019.
- [31] S. Technology, «Seeeduino LoRaWAN,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.seeedstudio.com/Seeeduino-LoRaWAN-p-2780.html>. [Último acceso: 04 Noviembre 2020].

[32] SLB, DHT reference guide, USA: EPC, 2013.

Si4464/63/61/60

Functional Block Diagram



Product	Freq. Range	Max Output Power	TX Current	RX Current	Narrow Band Support	Image Cal
Si4464	Banded 119–960 MHz	+20 dBm	915 MHz: 85 mA	10.6/13.6 mA	✓	✓
Si4463	Major bands 142–1050 MHz	+20 dBm	169 MHz: 70 mA 915 MHz: 85 mA	10/13 mA	✓	✓
Si4461	Major bands 142–1050 MHz	+16 dBm	+13 dBm: 29 mA +14 dBm: 33 mA	10/13 mA	✓	✓
Si4460	Major bands 142–1050 MHz	+13 dBm	+10 dBm: 18 mA +11 dBm: 20 mA	10/13 mA	✓	✓

Si4464/63/61/60

1. Electrical Specifications

Table 1. DC Characteristics¹

Parameter	Symbol	Test Condition	Min	Typ	Max	Unit
Supply Voltage Range	V _{DD}		1.8	3.3	3.6	V
Power Saving Modes	I _{Shutdown}	RC Oscillator, Main Digital Regulator, and Low Power Digital Regulator OFF	—	30	—	nA
	I _{Standby}	Register values maintained and RC oscillator/WUT OFF	—	50	—	nA
	I _{SleepRC}	RC Oscillator/WUT ON and all register values maintained, and all other blocks OFF	—	900	—	nA
	I _{SleepXO}	Sleep current using an external 32 kHz crystal. ²	—	1.7	—	μA
	I _{Sensor-LBD}	Low battery detector ON, register values maintained, and all other blocks OFF	—	1	—	μA
	I _{Ready}	Crystal Oscillator and Main Digital Regulator ON, all other blocks OFF	—	1.8	—	mA
TUNE Mode Current	I _{Tune_RX}	RX Tune, High Performance Mode	—	7.2	—	mA
	I _{Tune_TX}	TX Tune, High Performance Mode	—	8	—	mA
RX Mode Current	I _{RXH}	High Performance Mode	—	13.7	—	mA
	I _{RXL}	Low Power Mode ²	—	10.7	—	mA
TX Mode Current (Si4464/63)	I _{TX_+20}	+20 dBm output power, class-E match, 915 MHz, 3.3 V	—	85	—	mA
		+20 dBm output power, class-E match, 460 MHz, 3.3 V	—	75	—	mA
		+20 dBm output power, square-wave match, 169 MHz, 3.3 V	—	70	—	mA
TX Mode Current (Si4461)	I _{TX_+16}	+16 dBm output power, class-E match, 868 MHz, 3.3 V ²	—	43	—	mA
		+14 dBm output power, Switched-current match, 868 MHz, 3.3 V ²	—	37	—	mA
		+13 dBm output power, switched-current match, 868 MHz, 3.3 V ²	—	29	—	mA
TX Mode Current (Si4460)	I _{TX_+10}	+10 dBm output power, Class-E match, 868 MHz, 3.3 V ²	—	18	—	mA
Notes:						
1. All specifications guaranteed by production test unless otherwise noted. Production test conditions and max limits are listed in the "Production Test Conditions" section of "1.1. Definition of Test Conditions" on page 14.						
2. Guaranteed by qualification. Qualification test conditions are listed in the "Qualification Test Conditions" section in "1.1. Definition of Test Conditions" on page 14.						

Si4464/63/61/60

Table 2. Synthesizer AC Electrical Characteristics¹

Parameter	Symbol	Test Condition	Min	Typ	Max	Unit
Synthesizer Frequency Range (Si4463/61/60)	F_{SYN}		850	—	1050	MHz
			420	—	525	MHz
			284	—	350	MHz
			142	—	175	MHz
Synthesizer Frequency Range (Si4464)	F_{SYN}		705	—	960	MHz
			353	—	479	MHz
			177	—	319	MHz
			119	—	159	MHz
Synthesizer Frequency Resolution ³	$F_{\text{RES-960}}$	850–1050 MHz	—	28.6	—	Hz
	$F_{\text{RES-525}}$	420–525 MHz	—	14.3	—	Hz
	$F_{\text{RES-350}}$	283–350 MHz	—	9.5	—	Hz
	$F_{\text{RES-175}}$	142–175 MHz	—	4.7	—	Hz
Synthesizer Frequency Resolution (Si4464) ³	$F_{\text{RES-960}}$	705–960 MHz	—	28.6	—	Hz
	$F_{\text{RES-639}}$	470–639 MHz	—	19.1	—	Hz
	$F_{\text{RES-479}}$	353–479 MHz	—	14.3	—	Hz
	$F_{\text{RES-319}}$	235–319 MHz	—	9.5	—	Hz
	$F_{\text{RES-239}}$	177–239 MHz	—	7.1	—	Hz
	$F_{\text{RES-159}}$	119–159 MHz	—	4.7	—	Hz
Synthesizer Settling Time ⁴	t_{LOCK}	Measured from exiting Ready mode with XOSC running to any frequency. Including VCO Calibration.	—	50	—	μs
Phase Noise ⁴	$L_{\phi}(f_M)$	$\Delta F = 10 \text{ kHz}, 460 \text{ MHz}, \text{ High Perf Mode}$	—	-106	—	dBc/Hz
		$\Delta F = 100 \text{ kHz}, 460 \text{ MHz}, \text{ High Perf Mode}$	—	-110	—	dBc/Hz
		$\Delta F = 1 \text{ MHz}, 460 \text{ MHz}, \text{ High Perf Mode}$	—	-123	—	dBc/Hz
		$\Delta F = 10 \text{ MHz}, 460 \text{ MHz}, \text{ High Perf Mode}$	—	-130	—	dBc/Hz

Notes:

1. All specification guaranteed by production test unless otherwise noted. Production test conditions and max limits are listed in the "Production Test Conditions" section in "1.1. Definition of Test Conditions" on page 14.
2. For applications that use the major bands covered by Si4463/61/60, customers should use those parts instead of Si4464.
3. Default API setting for modulation deviation resolution is double the typical value specified.
4. Guaranteed by qualification. Qualification test conditions are listed in the "Qualification Test Conditions" section in "1.1. Definition of Test Conditions" on page 14.

Si4464/63/61/60

Table 3. Receiver AC Electrical Characteristics¹

Parameter	Symbol	Test Condition	Min	Typ	Max	Unit
RX Frequency Range (Si4463/61/60)	F _{RX}		850	—	1050	MHz
			420	—	525	MHz
			284	—	350	MHz
			142	—	175	MHz
RX Frequency Range (Si4464)	F _{RX}		705	—	960	MHz
			353	—	479	MHz
			177	—	319	MHz
			119	—	159	MHz
Notes: <ol style="list-style-type: none">1. All specification guaranteed by production test unless otherwise noted. Production test conditions and max limits are listed in the "Production Test Conditions" section in "1.1. Definition of Test Conditions" on page 14.2. For applications that use the major bands covered by Si4463/61/60, customers should use those parts instead of Si4464.3. Guaranteed by qualification. BER is specified for the 450–470 MHz band. Qualification test conditions are listed in the "Qualification Test Conditions" section in "1.1. Definition of Test Conditions" on page 14.4. For PER tests, 48 preamble symbols, 4 byte sync word, 10 byte payload and CRC-32 was used. PER and BER tested in the 450–470 MHz band.5. Guaranteed by bench characterization.						

Anexo 2. AS66-DTU20

Chengdu Ashining Technology Co., Ltd.

<http://en.ashining.com> 1053352919@qq.com WhatsApp/Mobile/WuChat: +86 18181581797



1. Product Overview

AS66-DTU20 is a 100mW industrial wireless data radio with high stability, operates at 915MHz. The core module of the radio adopts the newest RF chip SI4463 of Silicon. It has RS232 and RS485 ports and features an efficient loop error correction algorithm, which has high coding efficiency and strong error correction capability, which greatly improves the anti-interference and stability of the radio.

2. Product Features

- Point-to-point transmission, transparent transmission, wake on radio.
- Efficient cyclic interleaving error correction coding, maximum error correction 64bit
- Receiving sensitivity is up to -121dBm, range 2200 meters
- Automatic relay and continuous transmission
- AES encryption
- RSSI^[2] and voltage are readable
- Built-in multiple exception handling mechanisms ensure the stable operation for a long time
- Multiple transmitting power levels
 - 4 power levels adjustable (0-3), each level increases or decreases 3dBm
 - Power range: 11-20dBm, max 100mW
- Multiple baud rates^[1]
 - 8 commonly used baud rates, default baud rate 9600bps
 - Baud rate range:1200bps~115200bps
- Multiple air speeds^[2]
 - 8 air speeds adjustable, default air speed 1Kbps
 - 1~40kbps (1kbps, 5kbps, 10kbps, 12kbps, 15kbps, 20kbps, 25kbps, 40kbps)
- Frequency 900~925.5MHz, providing 256 channels^[4]. The interval of each channel is 0.1MHz^[4]
 - 900M + CHAN * 0.1MHz
 - CHAN:0* 00~0*FFH (corresponding to 900~925.5MHz)
- Default operation frequency 915MHz, application free band
- Supply voltage range
 - 8V-28VDC
 - Built-in LDO ensures stable power supply, meeting variety system requirements
- Data 250 circular FIFO
 - Transmit FIFO of 256 bytes
 - Receive FIFO of 256 bytes
 - Automatic subcontracting transmission
 - The module can send infinite data packet length with some particular combinations of air rate and baud rate
- Broadcasting data and monitor^[5]
 - Module address set as 0*FFFF, monitor data transmission of all modules in the same channel (monitor). The data sent can be received by all modules of random address and the same channel (broadcasting).
- Point-to-point transmission^[5]
 - The data sent by random module can be received by appointed module. Multiple receivers of the same address and channel all can receive the data
 - Can realize networking, relay and other applications.
- Wake on Radio^[6]
 - When the wireless wake-up time is not 0, the sending radio will automatically add a wake-up code when sending data, and wake up the target module^[6].
 - Transmit mode is the same as point-to-point transmission

Remarks:

- 1) Test conditions: clear, open, maximum power, antenna gain of 5dBi, height greater than 2m, air speed of 1K.
- 2) Radio RSSI is an internal intelligent processing, users do not need to care, special requirements can be read by command
- 3) For details, see the SPEED register in Chapter 7.2 of module parameter configuration.
- 4) For details, see the CHAN register in Chapter 7.2 of module parameter configuration.
- 5) For details, See the module function table in Chapter 8.
- 6) Wireless data transmission station is compatible with our wireless serial port module, which can wake up the wireless serial port module in the air.

3. Series Products

Table 3-1 Brief Specification of AS66-DTU20

Item model	Carrier frequency (Hz)	IC	Interface	Size (mm)	Max transmit power (dBm)	Range (km)	Antenna
AS66-DTU20	900~925.5M	SI4463	RS232/RS485	95*84*25	20	2.2	Rubber antenna, sucker antenna
All models of the AS66 series can communicate with each other							

4. Electrical Parameters

Table 4-1 Electrical Parameters of AS66-DTU20

Test Condition: Tc=25°C, VCC=12V

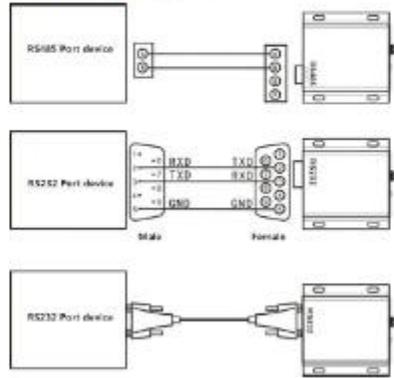
Item Model	Parameter Name	Description	Min	Typical Value	Max	Units
AS66-DTU20	Supply voltage		8		28	V
AS66-DTU20	Transmit current	SendPower ⁽¹⁾ = 0		78		mA
		SendPower = 1		63		mA
		SendPower = 2		50		mA
		SendPower = 3		43		mA
AS66-DTU20	Receive current			33		mA
AS66-DTU20	Operation frequency	900~925.5MHz, 0.1MHz stepping, 256 channels in total. Factory default 915MHz.	900	915	925.5	MHz
AS66-DTU20	Transmit power	SendPower = 0		20		dBm
		SendPower = 1		17		
		SendPower = 2		14		
		SendPower = 3		11		
AS66-DTU20	Air speed	8 levels adjustable (1kbps, 5kbps, 10kbps, 12kbps, 15kbps, 20kbps, 25kbps, 40kbps)	1K	1K	40K	bps
AS66-DTU20	Receiving sensitivity	Receive sensitivity has nothing to do with serial baud rate or delay time		-121		dBm
AS66-DTU20	Operation temperature	AS66-DTU20 industrial product	-40		+85	°C
AS66-DTU20	Operation humidity	Relative humidity, no condensation	10%		90%	
AS66-DTU20	Storage temperature		-40		+125	°C

Remarks:

SendPower = 0 (1, 2, 3), indicating the transmitting power of the radio station. See the radio parameter register for the configuration of transmitting power.

5. Module Functions

5.1 Recommended Connection Diagram



0-1 Recommended Connection Diagram

Remarks:

- 1) Detailed connection methods and procedures are detailed in the DTU product manual.
- 2) RS232 and RS485 can only use one at a time.

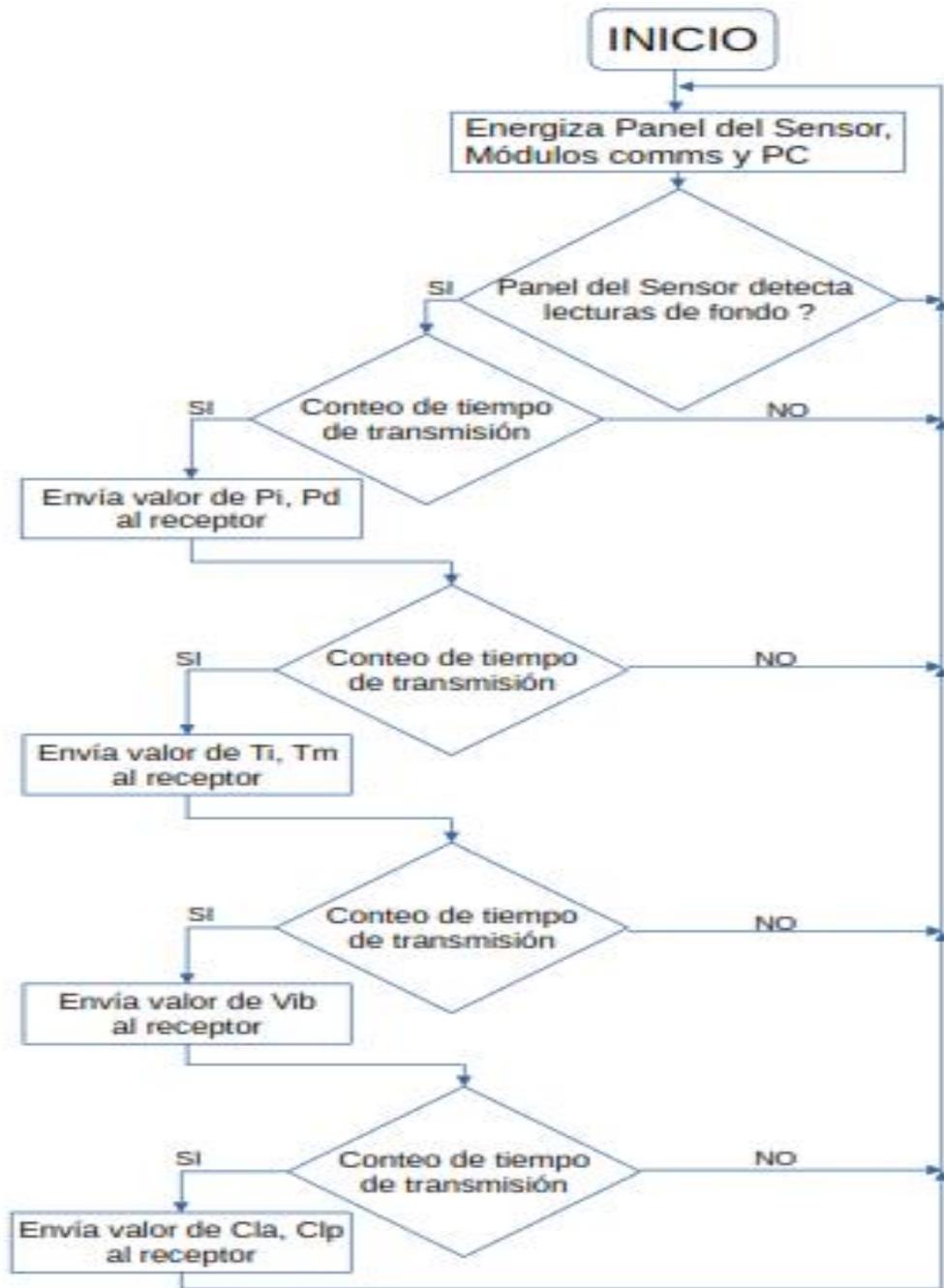
6. Radio Reset

The default status of the radio RESET indicator is off. Press and hold the RESET button for 3 seconds until the RESET indicator flashes. Release the button, the device will generate a reset and restore the factory settings.

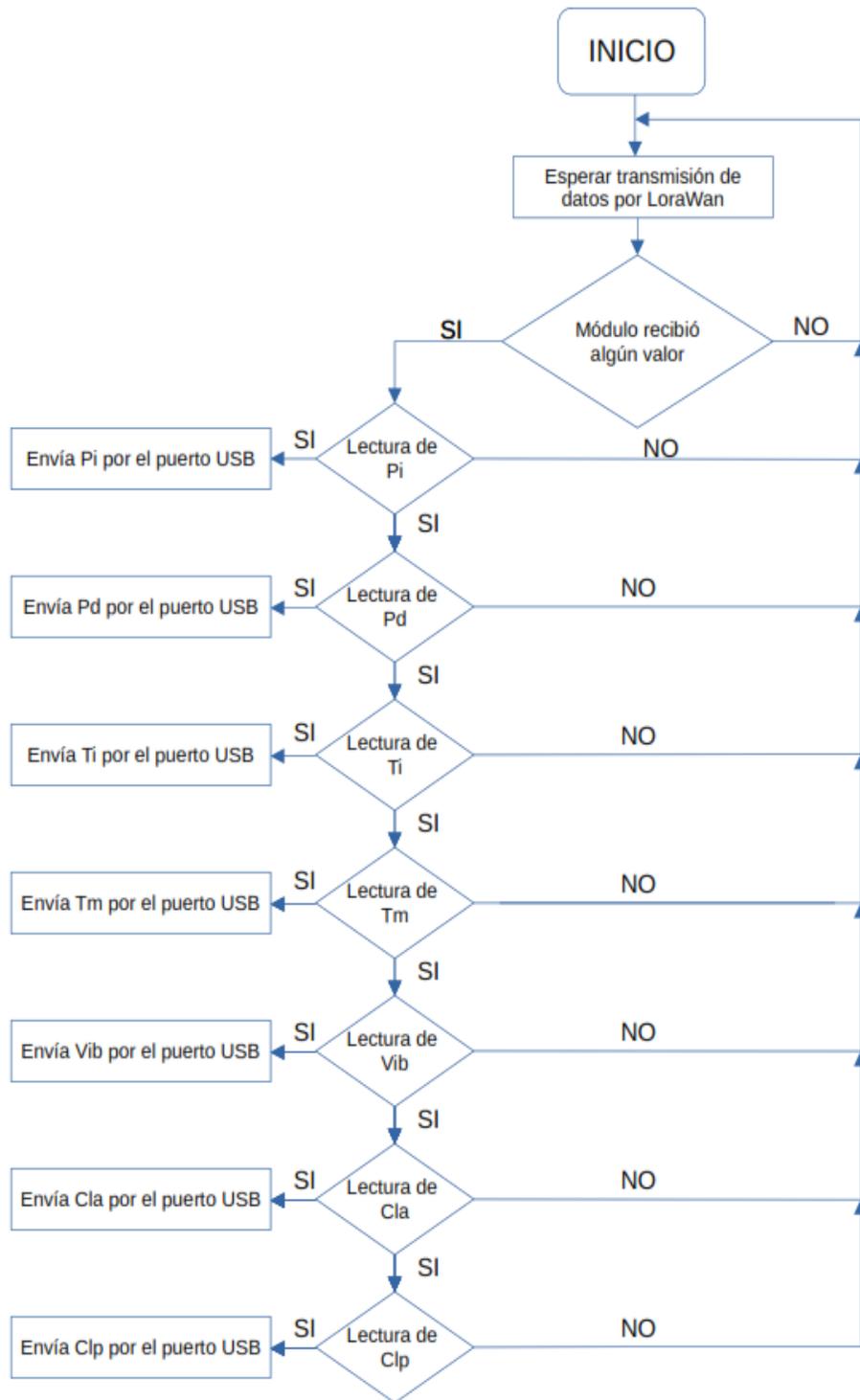
Anexo 3. Dirección Modbus del panel del sensor.

Description	I/O Name	Field 2	Storage Unit	Units
Remote Stop	Stop VSD	1		
Remote Start	Start VSD	3		
Number of Starts	Number of Starts	2065	#	#
Current Run Time	Drive run hours	2077	sec	sec
Total Run Time	Total Run Time	2081	days	Raw=(days*86400)
Shutdown Cause	Shutdown Cause	2089	-	-
I/O Type 1 - Pressure	Wellhead Tubing Pressure	2125	psi	psi
I/O Type 2 - Pressure	Wellhead Casing Pressure	2126	psi	psi
Intake Pressure	Intake Pressure	2137	psi	Raw=(psi*10)
Discharge Pressure	Discharge Pressure	2138	psi	Raw=(psi*10)
Intake Temperature	Intake Temperature	2140	F	Raw=(F*10)
Motor Temperature	Motor Temperature	2141	F	Raw=(F*10)
Vibration	Vibration	2142	gravity	Raw=(gravit*1000)
Active Current Leakage	Active Current Leakage	2143	mA	Raw=(mA*1000)
Zero Current	Zero Current	2145	mA	Raw=(mA*1000)
Full Scale Current	Full Scale Current	2146	mA	Raw=(mA*1000)
Passive Current Leakage	Passive Current Leakage	2148	mA	Raw=(mA*1000)
Drive Frequency	Drive Frequency	2166	Hz	Raw=(Hz*100)
Input Voltage	Input Voltage	2170	V	Raw=(V*10)
VSD Output Amps	VSD Current	2175	A	Raw=(A*10)
Average Amps	Average Amps	2176	Amps	Raw=(Amps*10)

Anexo 4. Topología de la red. Diagrama de flujo del módulo emisor.



Anexo 5. Topología de la red. Diagrama de flujo del módulo receptor.



Anexo 6. Certificación de la transmisión de datos del prototipo.

Dowell Schlumberger de México S.A. de C.V. / OFS Servicios S.A. de C.V.
Av. Justo Sierra No. 107
Esq. Periférica Norte
Fracc. Lomas de Holche,
C.P. 24130 Ciudad del Carmen,
Campeche, México
Tel. (938) 381 27 00



Cd. Del Carmen, Campeche a 4 de Diciembre del 2021.

UNIVERSIDAD TECNICA DE COTOPAXI.

Presente.

Yo Francisco Arturo Bravo Arias, con credencial de lector No. BAAF780901 **CERTIFICO** que las variables observadas en la interfaz del prototipo de transmisión de datos inalámbrica diseñado por el Ing. Diego Fernando Zambrano Freire concuerdan con los valores mostrados en el panel de control del sensor de fondo y de acuerdo con las pruebas de campo presentan excelente exactitud y respuesta a los cambios operacionales.

El interesado puede hacer uso del presente documento como creyere conveniente.

Atentamente,

A handwritten signature in blue ink, appearing to be "F. Bravo Arias", written over a horizontal line.

Ing. Francisco Arturo Bravo Arias
Credencial de Lector. BAAF780901
Field Engineer.
Dowell Schlumberger de México S.A. de C.V. / OFS Servicios S.A de C.V.

Anexo 7. Plano estructural del prototipo.

