



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**PROPUESTA DE UN SISTEMA DE MONITOREO INALÁMBRICO PARA  
LA OPTIMIZACIÓN DEL CIRCUITO DE AGUA DE ENFRIAMIENTO  
EN LA PRODUCCIÓN DE AZÚCAR DE INGENIO LA UNIÓN, S.A.**

**Luis Enrique González Pivaral**  
Asesorado por el Ing. José Luis Alfaro Donis

Guatemala, agosto de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROPUESTA DE UN SISTEMA DE MONITOREO INALÁMBRICO PARA  
LA OPTIMIZACIÓN DEL CIRCUITO DE AGUA DE ENFRIAMIENTO  
EN LA PRODUCCIÓN DE AZÚCAR DE INGENIO LA UNIÓN, S.A.**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**LUIS ENRIQUE GONZÁLEZ PIVARAL**

ASESORADO POR EL ING. JOSÉ LUIS ALFARO DONIS

AL CONFERIRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO ELECTRÓNICO**

GUATEMALA, AGOSTO DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Byron Odilio Arrivillaga Méndez
EXAMINADOR	Ing. Marvin Marino Hernández Fernández
EXAMINADOR	Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**PROPUESTA DE UN SISTEMA DE MONITOREO INALÁMBRICO PARA  
LA OPTIMIZACIÓN DEL CIRCUITO DE AGUA DE ENFRIAMIENTO  
EN LA PRODUCCIÓN DE AZÚCAR DE INGENIO LA UNIÓN, S.A.**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 11 de mayo de 2011.



**Luis Enrique González Pivaral**

Guatemala 21 de junio de 2013

Ingeniero  
Carlos Eduardo Guzmán Salazar  
Coordinador del Área de Electrónica  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería, USAC

Estimado Ingeniero Guzmán.

Me permito dar aprobación al trabajo de graduación titulado: **"PROPUESTA DE UN SISTEMA DE MONITOREO INALÁMBRICO PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL CIRCUITO DE AGUA DE ENFRIAMIENTO EN LA PRODUCCIÓN DE AZÚCAR DE INGENIO LA UNIÓN, S.A."**, del señor Luis Enrique González Pivaral, por considerar que cumple con los requisitos establecidos.

Por tanto, el autor de este trabajo de graduación y, yo, como su asesor, nos hacemos responsables por el contenido y conclusiones del mismo.

Sin otro particular, me es grato saludarle.

Atentamente,



Ing. José Luis Alfaro Donis  
Colegiado 3,695  
Asesor

**JOSE LUIS ALFARO DONIS**  
INGENIERO ELECTRONICO  
COLEGIADO No. 3 695



Ref. EIME 50.2013  
Guatemala, 2 de JULIO 2013.

Señor Director  
Ing. Guillermo Antonio Puente Romero  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

**Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:  
“PROPUESTA DE UN SISTEMA DE MONITOREO  
INALÁMBRICO PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL CIRCUITO DE  
AGUA DE ENFRIAMIENTO EN LA PRODUCCIÓN DE AZÚCAR  
DE INGENIO LA UNIÓN, S.A”, del estudiante Luis Enrique  
González Pivaral que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.**

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,  
**ID Y ENSEÑAD A TODOS**

  
Ing. Carlos Eduardo Guzmán Salazar  
Coordinador Área Electrónica



STO



ACULTAD DE INGENIERIA

REF. EIME 50. 2013.

**El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; LUIS ENRIQUE GONZÁLEZ PIVARAL titulado: “PROPUESTA DE UN SISTEMA DE MONITOREO INALÁMBRICO PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL CIRCUITO DE AGUA DE ENFRIAMIENTO EN LA PRODUCCIÓN DE AZÚCAR DE INGENIO LA UNIÓN, S.A.”, procede a la autorización del mismo.**

  
**Ing. Guillermo Antonio Puente Romero**



**GUATEMALA, 19 DE JULIO 2013.**

Universidad de San Carlos  
de Guatemala



Facultad de Ingeniería  
Decanato

DTG. 571 .2013

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **PROPUESTA DE UN SISTEMA DE MONITOREO INALÁMBRICO PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL CIRCUITO DE AGUA DE ENFRIAMIENTO EN LA PRODUCCIÓN DE AZÚCAR DE INGENIO LA UNIÓN, S.A.**, presentado por el estudiante universitario **Luis Enrique González Pivaral**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos  
Decano

Guatemala, 19 de agosto de 2013

/gdech



## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por las bendiciones derramadas y por su misericordia. Porque si estoy aquí es gracias a él.
- Mi abuela** María de Jesús Pivaral. Por ser mi segunda madre y por estar siempre apoyándome.
- Mis padres** Orlando González y Verónica Pivaral. Porque este logro no es mío, es de ellos. Gracias por su apoyo.
- Mis hermanas** Mandini y Carolina González. Por su cariño, apoyo y sacrificio.
- Mi familia** Abuela Paula Hernández. Tíos y tías en especial a Aroldo González y Marbin González. Primos y primas en especial a Juan Pablo González. Misael Batz. Con mucho cariño.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por esos años de gloria, experiencias y conocimientos adquiridos.
<b>Ingenio La Unión, S.A.</b>	Por el apoyo a la educación y desarrollo de su personal, pero principalmente por lo que recibí.
<b>Ing. José Luis Alfaro Donis</b>	Por su apoyo y asesoría en este trabajo.
<b>Personal de Ingenio La Unión, S.A.</b>	Por el apoyo y amistad.
<b>Señora Agueda de Pérez</b>	Por su apoyo y consejos.
<b>Señorita Rosario del Valle</b>	Por siempre haber estado ahí.
<b>Amigos y compañeros</b>	De la residencia, por la amistad brindada para toda la vida y el apoyo. De la facultad, por hacer de esos días de estudios una aventura diferente. Y de Santa Lucia, por estar ahí apoyándome

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
GLOSARIO .....	IX
RESUMEN.....	XVII
OBJETIVOS.....	XIX
INTRODUCCIÓN .....	XXI
1. NODOS SENSORES, MEDIDORES.....	1
1.1. Definición de medidores .....	1
1.2. Subsistema de sensor .....	2
1.3. Tipos de medidores o sensores.....	4
1.3.1. Medidores de nivel.....	4
1.3.1.1. Tipos de medidores de nivel.....	5
1.4. Caudal.....	18
1.4.1. Métodos para medición de caudal en canal abierto.....	18
1.4.1.1. Método del flotador .....	19
1.4.1.2. Método volumétrico .....	20
1.4.1.3. Canal Parshall .....	21
1.4.1.4. Vertederos .....	28
1.4.2. Medidores de caudal electrónicos en canal abierto.....	34
1.5. Medidores de nivel según fabricantes .....	35
1.6. Subsistema de procesado .....	41
1.6.1. Señales de procesos industriales .....	42

2.	TRANSMISIÓN INALÁMBRICA.....	47
2.1.	Subsistema de transmisión, radio enlace.....	47
2.1.1.	Consideraciones de un radio enlace .....	53
2.2.	Red de sensores inalámbricos (WSN) .....	65
2.2.1.	Características de una WSN .....	67
2.2.2.	Aplicaciones .....	68
2.3.	Topología WSN.....	69
2.4.	Protocolos .....	70
2.5.	Estándares inalámbricos industriales .....	75
2.5.1.	IEEE 802.15.4 .....	75
2.5.2.	ZIGBEE .....	77
2.5.3.	ISA 100.11a.....	80
2.5.4.	WISA .....	82
2.5.5.	OneWireless.....	83
2.5.6.	WirelessHART.....	85
2.6.	Tecnologías inalámbricas según fabricantes .....	88
3.	DCS, ANÁLISIS DE VARIABLES .....	95
3.1.	Control de procesos .....	95
3.1.1.	Estrategias de control.....	96
3.1.2.	Lazos de control .....	97
3.1.2.1.	Lazo de control abierto .....	97
3.1.2.2.	Lazo de control cerrado.....	98
3.2.	Controladores.....	101
3.2.1.	Controlador por computadora.....	102
3.2.2.	Sistema de control distribuido DCS.....	103
3.2.2.1.	Características de un DCS .....	105
3.2.2.2.	Arquitectura de un DCS.....	107
3.2.3.	Sistema SCADA .....	109

3.2.3.1.	Elementos de un sistema SCADA .....	111
3.2.3.2.	Características de los sistemas SCADA .....	113
3.2.4.	Diferencias entre los sistemas SCADA y DCS .....	114
3.3.	Actuales sistemas de control .....	115
3.3.1.	DCS SIMATIC PCS 7 Siemens .....	115
3.3.2.	DCS DELTA V Emerson Process Management ...	117
3.3.3.	DCS FREELANCE 800F ABB .....	118
3.3.4.	DCS SERIES I/A Foxboro/Invensys .....	119
4.	SOLUCIÓN PROPUESTA.....	121
4.1.	Circuito de agua de enfriamiento de Ingenio La Unión.....	121
4.2.	Descripción del problema. ....	126
4.2.1.	Puntos críticos y de recepción .....	127
4.2.2.	Estructuras existentes en los puntos a monitorear.....	129
4.3.	Instrumentación propuesta .....	133
4.3.1.	Selección de tecnología inalámbrica .....	134
4.3.2.	Cálculos para los radio enlaces .....	134
4.3.3.	Selección del medidor de nivel .....	140
4.3.4.	Equipo a utilizar para integración al DCS .....	140
4.3.5.	Sistema FOXBORO I/A .....	143
4.4.	Presupuesto de equipo a utilizar .....	147
	CONCLUSIONES .....	149
	RECOMENDACIONES.....	151
	BIBLIOGRAFÍA.....	153
	ANEXOS.....	157



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Medidor inalámbrico de nivel.....	1
2.	Medidor de nivel de cristal.....	6
3.	Flotador con regla graduada .....	7
4.	Medición de nivel por conducción .....	8
5.	Medición de nivel por capacitancia .....	9
6.	Medición de nivel por presión diferencial .....	12
7.	Medición de nivel por radioactividad .....	14
8.	Medición de nivel por ultrasonido.....	15
9.	Medición de nivel por microondas.....	17
10.	Medición del área del canal.....	20
11.	Método volumétrico.....	21
12.	Canal Parshall.....	22
13.	Partes del medidor Parshall (planta) .....	23
14.	Partes del medidor Parshall (perfil) .....	24
15.	Dimensiones del medidor Parshall.....	25
16.	Partes de un vertedero.....	29
17.	Perfil de vertedero.....	30
18.	Medidas de un vertedero.....	30
19.	Vertedero rectangular.....	31
20.	Vertedero triangular de 90° .....	32
21.	Vertedero trapezoidal.....	34
22.	Medidor de caudal electrónico .....	35
23.	Diagrama de bloques de un sistema de comunicación .....	41

24.	Modulación AM y FM .....	42
25.	Relación temperatura, corriente DC.....	43
26.	Protocolo HART, digital sobre análogo .....	44
27.	Radio enlace .....	47
28.	Polarización de una onda electromagnética .....	50
29.	Patrón de radiación tridimensional.....	51
30.	Curvatura del haz causada por la refracción .....	55
31.	Línea vista óptica contra el radio de la línea de vista.....	56
32.	Construcción matemática .....	57
33.	Geometría de las zonas de Fresnel .....	58
34.	Radio enlace .....	61
35.	Ganancias y pérdidas de un sistema de radio enlace.....	63
36.	Red industrial de sensores inalámbricos .....	66
37.	Diagrama de la topología tipo malla.....	70
38.	Pila de protocolos de red de sensores.....	72
39.	Lazo de control abierto .....	98
40.	Lazo de control cerrado .....	98
41.	Esquema de un DCS .....	104
42.	Esquema de un sistema SCADA .....	110
43.	Elementos de un sistema SCADA .....	111
44.	Diagrama del circuito de agua de Ingenio La Unión .....	121
45.	Canal principal .....	122
46.	Vertedero de entrada.....	123
47.	Vertedero de salida.....	125
48.	Vista de planta del circuito de agua .....	126
49.	Puntos críticos y distancias.....	129
50.	Dimensiones del canal principal.....	130
51.	Dimensiones del vertedero de entrada .....	131
52.	Dimensiones del vertedero de salida .....	132

53.	Diagrama de solución.....	133
54.	Representación de la instrumentación propuesta .....	142
55.	Algoritmo del cálculo del caudal.....	145
56.	Representación del nivel del canal principal en pantalla.....	146
57.	Representación del caudal de los vertederos en pantalla.....	146

## TABLAS

I.	Dimensiones típicas del medidor Parshall.....	26
II.	Valores de "n" y coeficiente "k" .....	27
III.	Medidor de nivel tipo radar Honeywell .....	36
IV.	Medidor de nivel ultrasónico Endress+Hausser .....	37
V.	Medidor de nivel tipo radar Endress+Hausser .....	37
VI.	Medidor de nivel ultrasónico Emerson .....	38
VII.	Medidor de nivel tipo radar Emerson.....	38
VIII.	Medidor de nivel ultrasónico Siemens.....	39
IX.	Medidor de nivel tipo radar Siemens .....	39
X.	Medidor de nivel ultrasónico Vega .....	40
XI.	Medidor de nivel tipo radar Vega .....	40
XII.	Comparación del factor K contra el gradiente de refractividad.....	55
XIII.	Tecnología inalámbrica Endress+Hausser.....	90
XIV.	Tecnología inalámbrica Emerson.....	90
XV.	Tecnología inalámbrica Siemens .....	91
XVI.	Tecnología inalámbrica Vega.....	91
XVII.	Interfaz para PLICSRADIO R62.....	92
XVIII.	Tecnología inalámbrica Honeywell.....	92
XIX.	Tecnología inalámbrica Honeywell.....	93
XX.	Equipo por adquirir.....	147



## GLOSARIO

<b>Antena Yagi</b>	Antena direccional de muy alto rendimiento, formada por un radiador (antena), reflector y directores.
<b>Bombas de rechazo</b>	Sistema de bombas que recirculan agua proveniente de fábrica hacia el enfriadero para su reutilización.
<b><i>Broadcast</i></b>	Transmisión de información que envía un nodo emisor a una multitud de nodos receptores de manera simultánea sin necesidad de reproducir la misma transmisión nodo por nodo.
<b>Campo eléctrico</b>	Es una región del espacio en la que cualquier carga situada en un punto de dicha región experimenta una acción o fuerza eléctrica.
<b>Campo magnético</b>	Es una región del espacio en la cual una carga eléctrica puntual que se desplaza a una velocidad, sufre los efectos de una fuerza que es perpendicular y proporcional tanto a la velocidad como a la intensidad del campo.
<b>Clarificador</b>	Estructura que permite la clarificación del agua proveniente del río, para su uso posterior en la torre de enfriamiento.

<b>Cociente de refracción</b>	Es una representación del índice de refracción, que es mucho mayor que la unidad. Pero para una onda de radio que viaja por el aire solo es una pequeña fracción mayor que la unidad (1.000315), lo que provoca inconvenientes al momento de utilizarlo.
<b>dB</b>	Unidad relativa empleada en telecomunicaciones y otras especialidades para expresar la relación entre dos magnitudes: la magnitud que se estudia y una magnitud de referencia.
<b>Difracción</b>	Es un fenómeno característico de las ondas, que se basa en el curvado y esparcido de las ondas cuando encuentran un obstáculo o cuando atraviesan una rendija.
<b>Enfriadero</b>	Estructura que permite reducir la temperatura del agua proveniente de las bombas de rechazo. Se puede alimentar con agua del río.
<b>Gateway</b>	Es una pasarela o puerta de enlace que permite interconectar redes con protocolos y arquitecturas diferentes a todos los niveles de comunicación. Su propósito es traducir la información del protocolo utilizado en una red al protocolo usado en la red de destino.

<b>Gradiente de índice de refracción</b>	Es una representación de los cambios de los valores del índice de refracción sobre el frente de onda de la señal.
<b>Índice de refracción</b>	Se define como el cociente entre la velocidad de la luz “c” en el vacío y la velocidad “v” de la luz en un medio. Dado que “c” va ser siempre mayor que “v” el resultado será mayor o igual a la unidad. De modo que mientras mayor sea el índice de refracción del medio, menor será la velocidad de propagación de la luz en su interior.
<b>Latencia</b>	Suma de retardos temporales dentro de una red al momento de la transmisión de datos. Un retardo es producido por la demora en la propagación y transmisión de paquetes dentro de la red.
<b>MODBUS</b>	Protocolo de comunicación basado en cliente/servidor, situado en el nivel 2 del modelo OSI. Permite una mayor disponibilidad para la conexión de dispositivos electrónicos industriales.
<b>Modulación</b>	Proceso que varía una característica de una señal portadora de acuerdo con una señal que transporta información. El propósito de la modulación es sobreponer señales en las ondas portadoras.
<b>Modulación FSK</b>	Modulación por desplazamiento de frecuencia, es una técnica de transmisión digital de información

binaria. La frecuencia de la señal portadora varía dependiendo de la señal del mensaje, la cual es una señal digital. Si el nivel de la señal del mensaje es 1, aumenta la frecuencia de la portadora y si es 0 disminuye la frecuencia.

**Multiplicadores de frecuencia**

Es un dispositivo que cambia la frecuencia de una señal, obteniendo a su salida una frecuencia más alta, siendo su relación con la frecuencia de entrada un número entero.

**Piconet**

Es una red de dispositivos que se conectan utilizando Bluetooth. Una piconet puede constar de dos a siete dispositivos, donde siempre habrá un maestro y los demás serán esclavos.

**PLC**

Controlador lógico programable, es una computadora industrial diseñada para varias señales de entrada y salida, rangos de temperatura, inmunidad al ruido, entre otros. Utilizado en la automatización de procesos.

**Portadora**

Es una onda, generalmente senoidal, modificada en alguno de sus parámetros (amplitud, frecuencia o fase) por una señal de entrada denominada moduladora.

**Rack**

Soporte metálico utilizado para alojar equipos electrónicos, informáticos y de comunicaciones. Sus

medidas están normalizadas para que sean compatibles con equipos de cualquier fabricante.

**Red *ad hoc***

Una red *ad hoc* es una red inalámbrica descentralizada, en la que cada nodo está preparado para reenviar datos a los demás. Difiere de las redes inalámbricas convencionales en las que un nodo especial, llamado punto de acceso, gestiona las comunicaciones con el resto de nodos.

**Red *MANETS***

Se trata de una red de dispositivos conectados inalámbricamente y que poseen propiedades de auto-configuración, además de poseer cierta movilidad, es decir se encuentran montados en plataformas móviles.

**Red *MESH***

Red tipo malla o enmallada, por su estructura permite la comunicación no se pierda a pesar que uno de sus nodos esté en falla.

**Refracción**

Flexión que sufre una onda cuando entra en un medio con velocidad de propagación diferente. El rayo de luz se dobla en dirección a la normal de la superficie de contacto entre ambos medios. La cantidad de la flexión depende del índice de refracción de los medios y se describe cuantitativamente por la ley de Snell.

<b>Reflexión</b>	Es el cambio de dirección de un rayo o una onda que ocurre en la superficie de separación entre dos medios, de tal forma que la onda regresa a la fuente que la emitió.
<b>RS 232</b>	Estándar de comunicación serial, punto a punto con una distancia limitada de 30 m a 60 m.
<b>RS 485</b>	Estándar de comunicación multipunto, con mayor inmunidad al ruido. Con una distancia máxima de comunicación de 1200 m.
<b>Señal de mensaje</b>	Señal que contiene la información a transmitir y que modifica a la portadora.
<b>Señal modulada</b>	Señal resultante del cambio de algún parámetro de una señal portadora en función de una señal de información.
<b>TCP/IP</b>	Protocolo de red que describe un conjunto de guías generales de diseño e implementación de protocolos de red específicos para permitir que un equipo pueda comunicarse en una red.
<b>Torre de enfriamiento</b>	Torre que permite el enfriamiento de una corriente de agua por medio de la vaporización parcial de la misma. El intercambio de calor lo realiza con una corriente de aire frío y seco que circula a través de la torre.

**Transceptor**

Dispositivo dos en uno que combina dentro de sus circuitos la función tanto de transmitir información como la de recepción de la misma.

**Zafra**

Temporada de producción de azúcar que dura aproximadamente 6 meses de noviembre – abril.



## RESUMEN

El monitoreo de variables es empleado para conocer el comportamiento de un proceso, controlarlo, mejorarlo y tomar decisiones en tiempo real del mismo. El uso de tecnologías inalámbricas dentro de un sistema de procesos permite la obtención de información en lugares inaccesibles por medio de cables, además permite desarrollar sistemas de monitoreo en tiempo real de casi cualquier variable que se desee, como la obtención del caudal en canales abiertos. La existencia de diversos fabricantes de esta tecnología favorece a la compatibilidad con equipos de 4-20 mA, 0-10 V, entre otros.

El monitoreo de las variables puede ser complementado al integrarse a un sistema de control distribuido que permite la visualización de los valores medidos en una interfaz máquina-humano en tiempo real, ofreciendo disponibilidad a los usuarios para analizar y controlar a distancia el proceso.

Considerando esta tecnología se pueden reducir los accidentes causados por desbordes, optimizar el uso del agua del río y reducir el bombeo en exceso.



## **OBJETIVOS**

### **General**

Proponer un sistema para monitorear en tiempo real los canales de entrada y salida del circuito de agua de enfriamiento en Ingenio La Unión, por medio de una red industrial de sensores inalámbricos que contribuya a la correcta utilización del agua.

### **Específicos**

1. Conocer la teoría de los nodos sensores y de las redes de sensores inalámbricos.
2. Listar tecnología inalámbrica por fabricante para la red de sensores inalámbricos.
3. Seleccionar la tecnología inalámbrica que mejor se adapte al entorno.
4. Proponer el equipo necesario para la integración del sistema de monitoreo, al sistema de control distribuido de Ingenio La Unión.



## INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo de graduación se propone un sistema de monitoreo inalámbrico para el agua de enfriamiento de Ingenio La Unión, que mejora el uso del agua de las fuentes naturales. En el capítulo 1, se describe los sensores remotos, los diferentes tipos de medidores de caudal y nivel que existen, señales industriales y medidores de nivel según fabricantes. En el capítulo 2, se presenta la literatura para el desarrollo de un radio enlace, se describen las redes de sensores inalámbricos, protocolos, características y topologías. Así también, las tecnologías y equipos que actualmente están disponibles en el mercado y que ofrecen una solución inalámbrica a problemas de cableado, distancias y lugares peligroso.

La automatización se utiliza principalmente porque mantiene la estabilidad de un proceso, se obtienen mejores resultados, reduce el costo de operación y se justifica la inversión en el equipo de control, en el capítulo 3, se presenta la literatura de los sistemas de control distribuidos y de los sistemas SCADA que permiten automatizar distintos procesos.

En el capítulo 4, se describe el funcionamiento del circuito de agua de enfriamiento del ingenio y se establecen los puntos críticos de medición, se propone la solución optando por el medidor de nivel y la tecnología inalámbrica que mejor se adapte al entorno. Así también, se desarrollan los cálculos necesarios para establecer el radio enlace y los equipos necesarios para poder integrar las señales al sistema de control distribuido. De esta manera se podrá optimizar el uso del agua dentro del circuito de agua de enfriamiento de Ingenio La Unión.



# 1. NODOS SENSORES, MEDIDORES

## 1.1. Definición de medidores

Un medidor o nodo sensor es un dispositivo autónomo que posee funcionalidades muy básicas en cuanto a sus componentes e interfaces, la comunicación puede ser por medio de cables o de forma inalámbrica. Los medidores inalámbricos son generalmente operados con baterías y permiten medir distintas magnitudes del ambiente que le rodea, como por ejemplo: luz, temperatura, humedad, movimiento, así como realizar acciones bajo ciertas condiciones. Fueron desarrollados originalmente por Intel Research en colaboración con la Universidad de California en Berkeley en el Centro para la Investigación en Tecnologías de la Información.

Figura 1. **Medidor inalámbrico de nivel**



Fuente: [http://www.vega.com/es/Comunicacion-inalambrica\\_PLICSRADIO-PLICSMOBILE.html](http://www.vega.com/es/Comunicacion-inalambrica_PLICSRADIO-PLICSMOBILE.html).

Consulta: octubre 2012.

Un nodo sensor está compuesto generalmente por una unidad de procesamiento sencilla, una pequeña memoria, sensores, una fuente de

alimentación eléctrica y un dispositivo de comunicación inalámbrico, que le permite comunicarse e intercambiar datos con otros nodos y/o estación base.

Cada nodo sensor se divide en tres subsistemas:

- Subsistema del sensor: censa o mide un parámetro del medio ambiente.
- Subsistema de procesado: lleva a cabo el cómputo de la información recabada por el censado.
- Subsistema de comunicación inalámbrica: responsable de transmitir la información.

Al ser remoto cada lectura que el nodo realiza y cada bit de datos que transmite consume su energía por lo cual estos nodos deben de seguir una dieta en cuanto al consumo de potencia, funcionando en ciclos de bajo consumo. Pueden funcionar también con una fuente eléctrica continua.

Estos nodos pueden enviar alarmas, si las condiciones que se están monitorizando cambian de acuerdo a los parámetros programados.

## **1.2. Subsistema de sensor**

Un sensor no es más que un dispositivo que detecta magnitudes físicas o químicas, a las que se les pueden llamar variables de instrumentación y que permiten transformarlas en señales eléctricas.

Las áreas de aplicación de los sensores pueden ser: industria automotriz, industria aeroespacial, medicina, industria de manufactura, robótica, entre otras. Sus principales características son:

- Rango de medida: dominio en la magnitud medida en el que puede aplicarse el sensor.
- Precisión: es el error de medida máximo esperado.
- Offset: desviación de cero. Valor de la variable de salida cuando la variable de entrada es nula. Si el rango de medida no llega a valores nulos de la variable de entrada, habitualmente se establece otro punto de referencia para definir el *offset*.
- Linealidad: es el grado en el que la gráfica de una medición de entrada, comparado con la gráfica de la respuesta a esta medición vista en la salida, se aproxima a una línea recta.
- Sensibilidad de un sensor: relación entre la variación de la magnitud de salida y la variación de la magnitud de entrada.
- Resolución: mínima variación de la magnitud de entrada que puede apreciarse a la salida.
- Rapidez de respuesta: puede ser un tiempo fijo o depender de cuánto varíe la magnitud a medir. Depende de la capacidad del sistema para seguir las variaciones de la magnitud de entrada.
- Repetitividad: error esperado al repetir varias veces la misma medida.

El sensor puede o no estar en contacto directo con la variable a medir. Este subsistema proveerá una señal eléctrica que será enviada al subsistema del procesado.

### **1.3. Tipos de medidores o sensores**

En el medio ambiente existen muchos parámetros que se pueden medir o cuantificar según el instrumento que se utilice, entre estas variables se pueden mencionar: temperatura, intensidad lumínica, distancia, nivel, caudal, aceleración, inclinación, desplazamiento, presión, fuerza, torsión, humedad, pH, etc.

Estas variables son las que limitan las características de los medidores. Además, existen variables cuyas magnitudes pueden calcularse mediante la medición y cálculo de otras, como por ejemplo: la velocidad de un móvil puede calcularse a partir de la integración numérica de su aceleración.

#### **1.3.1. Medidores de nivel**

En la industria, la medición de nivel es muy importante, tanto desde el punto de vista del funcionamiento del proceso como de la consideración del balance adecuado de materias primas o de productos finales.

Medir el nivel permite conocer la cantidad de material dentro de un recipiente, tanque, presa, etc. Permitiendo tomar decisiones para evitar desbordamientos que puedan causar accidentes o el vacío completo de un tanque.

En la selección del tipo de medidor tienen preferencia, técnicamente, los medidores estáticos frente a los que tienen partes móviles y los que no necesitan contacto con el fluido o incluso, que sean exteriores al recipiente, así como los que requieren menor modificación en la estructura del recipiente y sus soportes, especialmente cuando estos ya están construidos.

Existen varios tipos de medidores, desde los más simples que constan de una regla graduada y un flotador hasta los más sofisticados que constan de circuitos electrónicos complejos.

Un medidor de nivel electrónico es capaz de dar una señal equivalente al nivel o altura de algún material, no importando si este es líquido o sólido. Esta señal puede ser análoga o digital, dependiendo de las características que el fabricante le haya asignado al dispositivo.

#### **1.3.1.1. Tipos de medidores de nivel**

- **Sondas, tubos y flotadores**

Los dispositivos más simples usados para indicar nivel, consisten en tubos de vidrio de modo tal que el operador vea el fluido de proceso. Así también, se utilizan métodos donde la lectura se toma directamente de una regla graduada o de la longitud de una varilla mojada por el líquido.

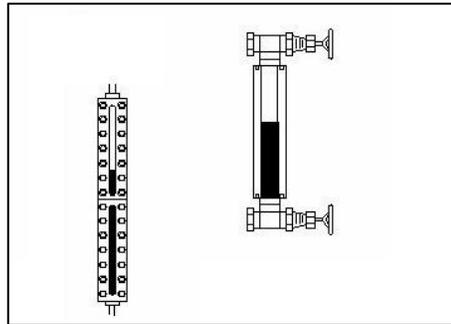
Ventajas:

- Relativamente sencillo.
- De bajo costo.

Desventajas:

- Poco apropiado para procesos industriales.
- No permite retransmisión de la información.

Figura 2. **Medidor de nivel de cristal**



Fuente: <http://www.mediciondenivelesantech.blogspot.com>. Consulta: diciembre de 2012.

También pueden emplearse flotadores, utilizados generalmente para acciones de control (interruptores de nivel), consiste en un flotador ubicado dentro del tanque y conectado al exterior indicando directamente el nivel sobre una escala graduada.

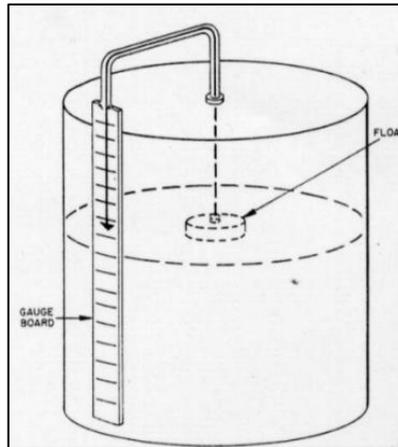
Ventajas:

- Relativamente sencillo.
- Adecuado para muchos productos y de bajo costo

Desventajas:

- Requiere un cierto montaje
- Punto de conmutación no reproducible
- Mal funcionamiento en caso de adherencias y no es a prueba de fallos.

Figura 3. **Flotador con regla graduada**



Fuente: VELÁZQUEZ, Iván. Instrumentación y control: control de nivel.  
[www.inele.ufro.cl/apuntes](http://www.inele.ufro.cl/apuntes). Consulta: diciembre de 2012.

- **Método por conductividad y capacitancia**

El método se limita a la detección de nivel de líquidos conductivos. Se basa en el principio de que la presencia de un producto causa un cambio en la resistencia entre dos conductores.

Se puede obtener fácilmente una indicación de nivel de productos conductores de electricidad en un tanque metálico o en otro contenedor mediante una sonda aislada del recipiente y un amplificador conductivo. Si el producto no está en contacto con la sonda la resistencia eléctrica entre la sonda y la pared del tanque es muy elevada. Cuando el nivel del producto se eleva cierra el circuito entre la sonda y la pared del tanque de modo que la resistencia disminuye a valores relativamente bajos.

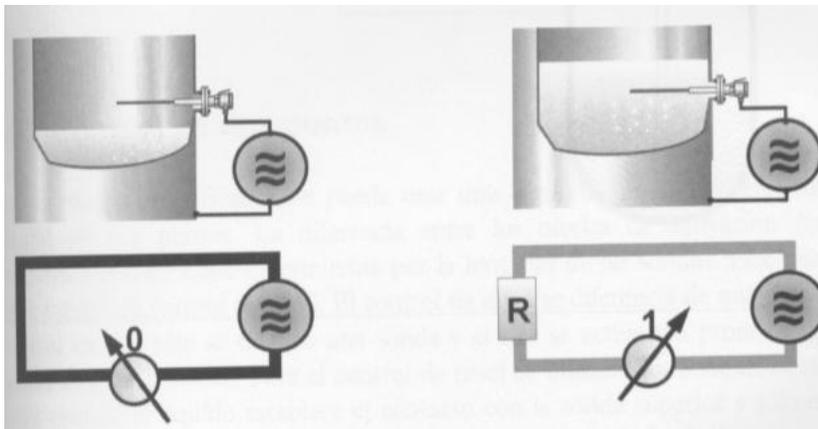
Ventajas:

- Sencillo
- Bajo costo
- Adecuado para control en dos puntos

Desventajas:

- Necesita una limpieza constante ya que la sonda se puede ensuciar de grasa u otros materiales.
- Está restringido a productos de conductividad variable.

Figura 4. **Medición de nivel por conducción**



Fuente: VELÁZQUEZ, Iván. Instrumentación y control: control de nivel.  
[www.inele.ufro.cl/apuntes](http://www.inele.ufro.cl/apuntes). Consulta: diciembre de 2012.

El método capacitivo utiliza una sonda como una de las placas de un condensador, siendo la otra placa el contenedor mismo. El material entre ellos, viene a ser el dieléctrico. El cambio de nivel origina un cambio en la salida del

circuito electrónico, proporcional al cambio de la capacidad por lo que este método es de indicación continua del nivel.

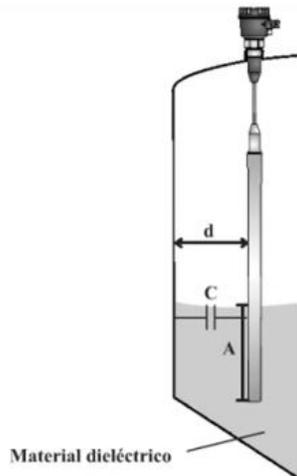
Ventajas:

- Aplicable para medición de líquidos y sólidos
- No tiene partes móviles
- Adecuado para medios altamente corrosivos

Desventajas:

- Su aplicación está limitada a productos con propiedades eléctricas variables.

Figura 5. **Medición de nivel por capacitancia**



Fuente: VELÁZQUEZ, Iván. Instrumentación y control: control de nivel.  
[www.inele.ufro.cl/apuntes](http://www.inele.ufro.cl/apuntes). Consulta: diciembre de 2012.

$$C = k_e \frac{\epsilon_0 A}{d} \quad \text{Ec. 1.1}$$

Dónde:

C = capacitancia

d = distancia entre sonda y tanque

A = área cubierta por el material dieléctrico

$K_e$  = constante dieléctrica

$\epsilon_0$  = constante de permisividad

- **Método por presión**

Este método se basa en la medición de la presión hidrostática correspondiente a una columna de líquido de una altura determinada. La presión se calcula mediante la expresión:

$$P = h \times \rho \times g \quad \text{Ec. 1.2}$$

Dónde:

P = presión

h = altura de la columna de agua

g = aceleración de gravedad

$\rho$  = densidad relativa

Con base en la fórmula se observa que si la densidad del medio es constante, la única variable es h y que la presión es directamente proporcional a la altura h, es decir nivel de líquido del tanque.

La medición de nivel con transmisor de presión se utiliza preferentemente en tanques abiertos expuestos a la atmósfera. En estos casos un transmisor de presión manométrico está ubicado en el nivel cero de un contenedor de líquido. De modo que cualquier incremento de nivel causa un aumento de la presión hidrostática.

Cuando la presión de la superficie del líquido es mayor que la presión atmosférica (tanque cerrado-presurizado), se puede emplear un sensor de presión diferencial, el cual mide por un lado la presión total ejercida al fondo del tanque y por otro lado la presión en la superficie. La presión de la superficie se resta de la presión total y se obtiene la presión correspondiente a la columna del líquido. Esta medición requiere de dos sensores.

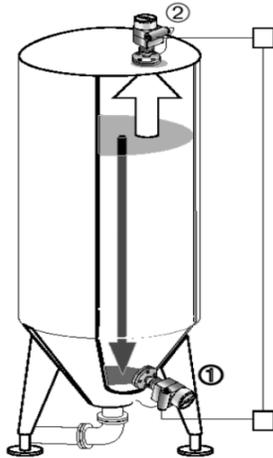
Ventajas:

- Montaje sencillo
- Fácil de ajustar
- Precisión razonable
- Amplio uso en aplicaciones de la industria alimentaria, donde se manejan productos con viscosidad cambiantes.

Desventajas:

- Dependiente de la densidad relativa
- Relativamente costoso para mediciones de presión diferencial

Figura 6. **Medición de nivel por presión diferencial**



Fuente: VELÁZQUEZ, Iván. Instrumentación y control: control de nivel.  
[www.inele.ufro.cl/apuntes](http://www.inele.ufro.cl/apuntes). Consulta: diciembre de 2012.

- **Radiactivos**

El principio del funcionamiento de este instrumento es que cuando hay producto en el tanque o silo, un haz de rayos gamma que lo atraviese se atenúa.

Este método es totalmente no invasivo y se emplea como indicador de nivel o *switch* de nivel y solo se usa si las situaciones son muy extremas. Esto es principalmente porque la radiación gamma no requiere equipo dentro del tanque o reactor, puesto que penetra fácilmente las paredes del tanque.

Para la medición de nivel, la fuente de rayos gamma emite un haz con un ángulo de salida de aproximadamente  $20^\circ$  o  $40^\circ$ . En el extremo opuesto de la fuente, se dispone un detector de rayos gamma conectado eléctricamente con un transmisor de nivel que proporciona una señal de salida.

La intensidad de la fuente de radiación está calculada de modo que cuando el tanque esté vacío, el detector transmite justamente los pulsos necesarios para que el amplificador interruptor de nivel o el indicador de nivel procesen una señal. A medida que el nivel del producto aumenta, la radiación se atenúa, el detector deja de transmitir suficientes pulsos y el instrumento indica nivel alto.

**Ventajas:**

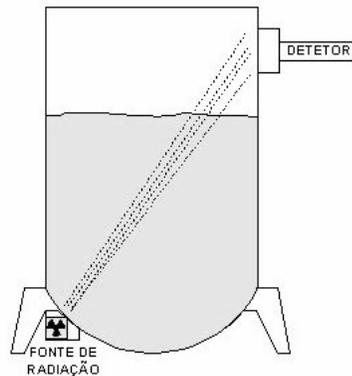
- Adecuado para todos los productos.
- No requiere contacto con el mismo.
- Los sistemas de medición de nivel por rayos gamma ni siquiera requieren modificaciones en el tanque.
- Adecuado para altas presiones y altas temperaturas.

**Desventajas:**

- Se requieren medidas especiales de seguridad
- Alto costo

En la página siguiente se presenta la ilustración de este medidor.

Figura 7. **Medición de nivel por radioactividad**



Fuente: <http://www.mediciondenivelesantech.blogspot.com>. Consulta: diciembre de 2012.

- **Ultrasonido**

El método de reflexión del sonido, se basa en el tiempo de retorno de un pulso de sonido emitido por un sensor. El pulso ultrasónico emitido se refleja en la superficie del producto y el mismo sensor vuelve a detectarlo. El tiempo de retorno de la señal es una medida de la altura de la sección vacía del tanque. Si a esta distancia se le resta la altura total del tanque, se obtiene el nivel del producto y el tiempo de retorno se convierte en una señal de salida analógica.

Los sensores trabajan a una frecuencia cercana a los 20 KHz. Estas ondas atraviesan con cierto amortiguamiento o reflexión el medio ambiente de gases o vapores y se reflejan en la superficie del sólido o del líquido. El error de medición es de  $\pm 6$  mm o  $< 0.2$  %.

Son adecuados para todos los tipos de tanques y de líquidos o fangos pudiendo construirse a prueba de explosión. Aunque presentan el inconveniente de ser sensibles a la densidad de los fluidos y de dar señales erróneas cuando

la superficie del nivel del líquido no es nítida, como es el caso de un líquido que forme espuma, ya que se producen falsos ecos de los ultrasonidos.

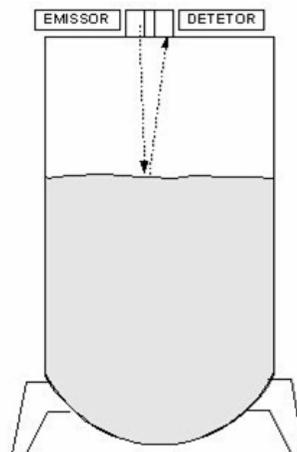
Ventajas:

- No hay contacto con el producto
- Adecuado para diversos líquidos y materiales granulados

Desventajas:

- El producto no debe producir demasiada espuma en la superficie.
- El método no es adecuado para altas presiones ni altas temperaturas.
- No es aplicable en condiciones de vacío.

Figura 8. **Medición de nivel por ultrasonido**



Fuente: <http://www.mediciondenivelesantech.blogspot.com>. Consulta: diciembre de 2012.

- **Microondas**

Estos transmisores de nivel funcionan según el principio del eco. Una antena de varilla o una antena de trompeta dirige impulsos cortos de microondas de 0.8 ns de duración (aproximadamente) hacia el producto, estos se reflejan en la superficie y la misma antena los detecta a su regreso actuando como un receptor. Las microondas se reflejan por la diferencia de impedancias entre el aire y el producto. La distancia a la superficie es proporcional al tiempo de retorno del impulso.

El nivel del producto se puede medir hasta justo por debajo de la antena de varilla, de modo que no hay restricciones de distancia. Este instrumento opera en un rango de frecuencias aproximadamente de 6 GHz a 26 GHz.

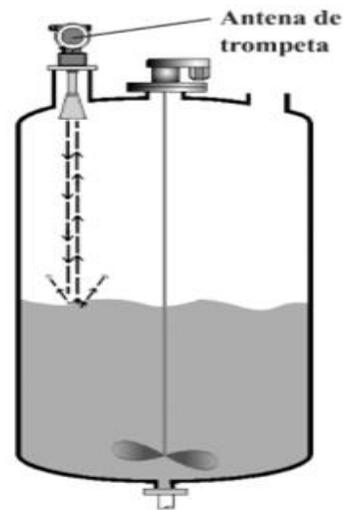
Ventajas:

- Su baja potencia de radiación permite una instalación segura en recipientes metálicos y no metálicos, sin riesgos a los seres humanos o el entorno.
- Independiente de la temperatura, de condiciones de altas presiones o vacío y de la presencia de polvo o vapor.

Desventajas:

- El producto debe tener una constante dieléctrica mínima determinada.

Figura 9. **Medición de nivel por microondas**



Fuente: VELÁZQUEZ, Iván. Instrumentación y control: control de nivel.  
[www.inele.ufro.cl/apuntes](http://www.inele.ufro.cl/apuntes). Consulta: diciembre de 2012.

Existen también transmisores de nivel por microondas en sólidos, que utilizan las ondas guiadas o TDR (Time Domain Reflectometry). Este método es utilizado para la medición de niveles en presencia de grandes cantidades de polvo, ya que la medición por ultrasonido puede fallar por el elevado contenido de polvo y los de microondas libre tampoco se pueden usar, debido a que los sólidos secos no reflejan la energía emitida.

La tecnología TDR difiere de la de radar convencional en que los impulsos de microondas se emiten en una amplia banda de frecuencias (200 kHz hasta 1.2 GHz). La tecnología TDR emplea micro pulsos electromagnéticos que viajan por el cable (ondas guiadas) y se reflejan debido a un cambio súbito en la constante dieléctrica.

## 1.4. Caudal

Caudal, se refiere a la cantidad o volumen de agua que pasa por un lugar (canal, tubería, etc.) por unidad de tiempo (minutos, segundos, etc.). Normalmente se identifica con el volumen que pasa por un área dada en un determinado tiempo.

$$Q = Av \left( \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) \quad \text{Ec. 1.3}$$

Dónde:

Q = caudal

A = área

V = velocidad promedio

Existen dos tipos de canales por donde puede circular el agua, canal abierto y canal cerrado. El segundo se refiere a una tubería en sí. Ahora el canal abierto es cualquier área por donde circula un fluido, tomándose como canal abierto un río.

### 1.4.1. Métodos para medición de caudal en canal abierto

Entre los métodos utilizados para la medición del caudal en canal abierto están:

- Método del flotador
- Método volumétrico
- Canal Parshall

- Vertederos

#### 1.4.1.1. Método del flotador

Método que se utiliza en canales, acequias y que permite obtener solo una medida aproximada del caudal. Su uso es limitado debido a que los valores que se obtiene son estimativos del caudal, siendo necesario el uso de otros métodos cuando se requiere más precisión.

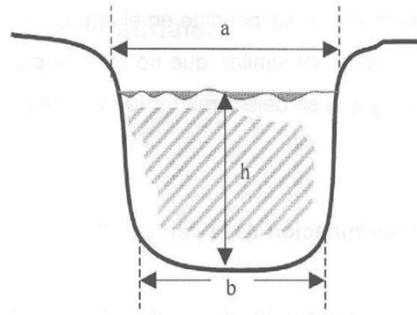
Para ejecutarlo, se elige un tramo del canal que sea recto y de sección transversal uniforme, de alrededor 30 metros de largo, donde el agua escurra libremente.

Se marca en el terreno la longitud elegida y se toma el tiempo que demora un flotador (por ejemplo un trozo de madera) en recorrerla, con el fin de conocer la velocidad que lleva el agua en la sección.

$$V = \frac{\text{largo de sección(m)}}{\text{tiempo en recórrela (s)}} = \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right) \quad \text{Ec. 1.4}$$

El siguiente paso es determinar el área del canal, para esto se multiplica el ancho promedio del canal por su profundidad, como se presenta en la figura de la siguiente página:

Figura 10. **Medición del área del canal**



Fuente: BELLO, Marco Antonio; PINO, María Teresa. Medición de presión y caudal. p. 12.

$$A = \frac{a+b}{2} * h \quad (\text{m}^2) \quad \text{Ec. 1.5}$$

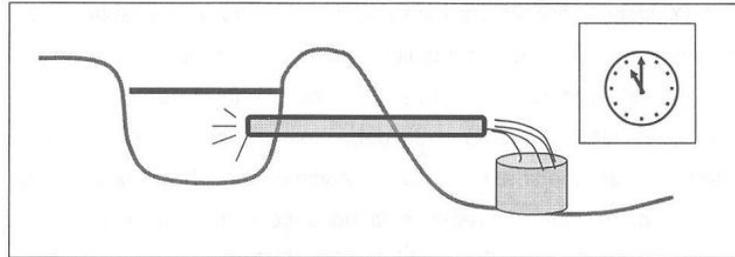
Una vez se tenga el área del canal y la velocidad del agua se proceda a encontrar el caudal a través de la ecuación 1.3.

#### **1.4.1.2. Método volumétrico**

Este método permite medir pequeños caudales de agua, como son los que escurren en surcos de riego o pequeñas acequias. Para ello es necesario contar con un depósito (balde) de volumen conocido en el cual se colecta el agua, anotando el tiempo que demoró en llenarse. Esta operación puede repetirse 2 o 3 veces y se promedia, con el fin de asegurar una mayor exactitud.

En la página siguiente se presenta la ilustración de este método.

Figura 11. **Método volumétrico**



Fuente: BELLO, Marco Antonio; PINO, María Teresa. Medición de presión y caudal. p. 13.

#### **1.4.1.3. Canal Parshall**

El canal Parshall o también llamado medidor Parshall, es una estructura hidráulica que permite medir la cantidad de agua que pasa por una sección de un canal determinado. Es un medidor de régimen crítico, siendo idealizado por Ralph L. Parshall, ingeniero del servicio de irrigación del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos.

Para su fabricación, en los medidores Parshall se han utilizado muy diversos materiales, pudiéndose fabricar de láminas de metal o madera y recientemente de fibra de vidrio. También se pueden construir directamente sobre el terreno con el uso de elementos de mampostería como ladrillos y bloques de concreto y en algunos casos fundido con concreto reforzado para mayor durabilidad.

En la página siguiente se presenta la estructura de un canal Parshall.

Figura 12. **Canal Parshall**



Fuente: LUX MONROY, Manuel Agustín. Medidores de flujo en canales abiertos. p. 22.

El canal Parshall consta de cuatro partes principales:

- Transición de entrada
- Sección convergente
- Garganta
- Sección divergente

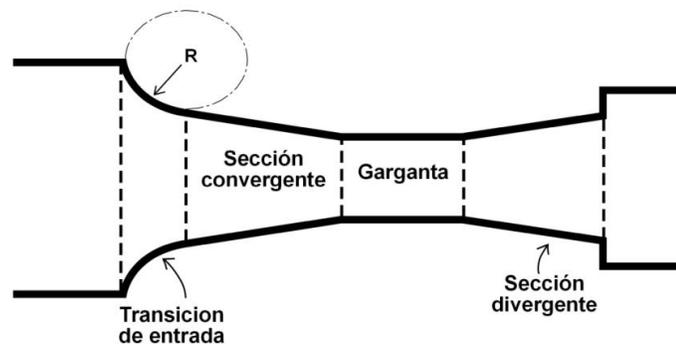
En la etapa de transición de entrada el piso se eleva sobre el fondo original del canal, con una pendiente ascendente de 1:4 (1 vertical y 4 horizontal), hasta comenzar la sección convergente, con paredes que se van cerrando en línea recta o circular de radio (R). Debido a que el aforador Parshall

es una reducción de la sección del canal, que obliga al agua a elevarse o a remansarse para luego volver a descender hasta el nivel inicial sin el aforador.

En este proceso se presenta una aceleración del flujo que permite establecer una relación matemática entre la altura de carga o elevación que alcanza el agua y el caudal que circula a través del dispositivo.

- Para medidores menores a 0.3 m o 30 cm (ancho de garganta)  $R = 0.41$  m
- Para medidores de 0.3 a 0.91 m  $R = 0.51$  m
- Para medidores de 1.2 a 2.44 m  $R = 0.61$  m

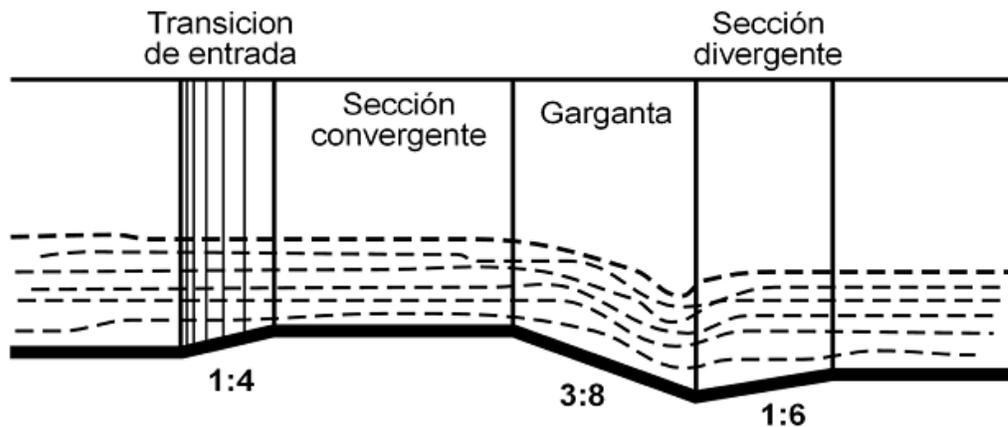
Figura 13. Partes del medidor Parshall (planta)



Fuente: DE AZEVEDO, J. M.; ACOSTA, Guillermo. Manual de hidráulica. p. 477.

Continuación de las partes del canal Parshall en la página siguiente.

Figura 14. Partes del medidor Parshall (perfil)



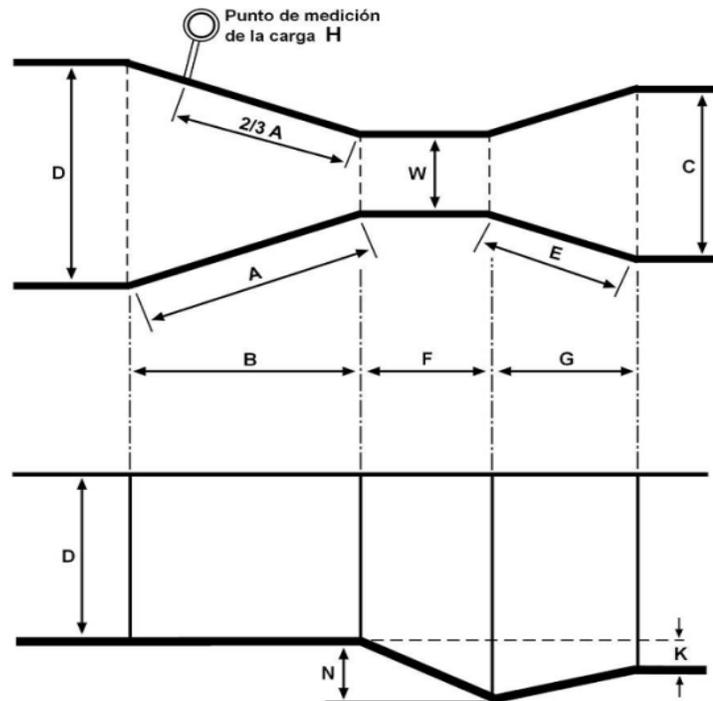
Fuente: DE AZEVEDO, J. M.; ACOSTA, Guillermo. Manual de hidráulica. p. 477.

En la sección convergente, el fondo es horizontal y el ancho va disminuyendo. En la garganta el piso vuelve a bajar con una pendiente de 3:8 (3 vertical y 8 horizontal). En la sección divergente el piso sube nuevamente con pendiente de 1:6 (1 vertical y 6 horizontal).

Los medidores menos empleados son los de 1 pulg (2.54 cm) de ancho de garganta y el mayor construido hasta hoy mide 50 ft (15.24 m) y tiene una capacidad para 85,000 l/s.

En la página siguiente se presentan las dimensiones de un medidor Parshall.

Figura 15. Dimensiones del medidor Parshall



Fuente: DE AZEVEDO, J. M.; ACOSTA, Guillermo. Manual de hidráulica. p. 471.

La única medida de carga  $H$  necesaria para conocer el caudal, se hace en la sección convergente, en un punto que se localiza  $2/3$  de la dimensión  $B$  o a  $2/3$  de  $A$ .

En la siguiente página se presenta la tabla I que incluye las dimensiones típicas para los medidores Parshall de hasta 10 pies (3.05 m).

Tabla I. **Dimensiones típicas del medidor Parshall**

<b>W</b>		<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>G</b>	<b>K</b>	<b>N</b>
<b>1"</b>	<b>2.5</b>	36.3	35.6	9.3	16.8	22.9	7.6	20.3	1.9	2.9
<b>3"</b>	<b>7.6</b>	46.6	45.7	17.8	25.9	38.1	15.2	30.5	2.5	5.7
<b>6"</b>	<b>15.2</b>	62.1	61.0	39.4	40.3	45.7	30.5	61.0	7.6	11.4
<b>9"</b>	<b>22.9</b>	88.0	86.4	38.0	57.5	61.0	30.5	45.7	7.6	11.4
<b>1'</b>	<b>30.5</b>	137.2	134.4	61.0	84.5	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9
<b>1½'</b>	<b>45.7</b>	144.9	142.0	76.2	102.6	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9
<b>2'</b>	<b>61.0</b>	152.5	149.6	91.5	120.7	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9
<b>3'</b>	<b>91.5</b>	167.7	164.5	122.0	157.2	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9
<b>4'</b>	<b>122.0</b>	183.0	179.5	152.5	193.8	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9
<b>5'</b>	<b>152.5</b>	198.3	194.1	183.0	230.3	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9
<b>6'</b>	<b>183.0</b>	213.5	209.0	213.5	266.7	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9
<b>7'</b>	<b>213.5</b>	228.8	224.0	244.0	303.0	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9
<b>8'</b>	<b>244.0</b>	244.0	239.2	274.5	340.0	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9
<b>10'</b>	<b>305.0</b>	274.5	427.0	366.0	475.9	122.0	91.5	183.0	15.3	34.3

Fuente: DE AZEVEDO, J. M.; ACOSTA, Guillermo. Manual de hidráulica. p. 472.

Según experimentos y ensayos realizados utilizando canales Parshall se han obtenido ecuaciones para calcular el caudal de tipo potencial:

$$Q = KH^n \quad \text{Ec. 1.6}$$

Donde el valor de "n" según ensayos, es muy cercano a 3/2. En la tabla II se presentan los valores del coeficiente "K" para los sistemas métrico e inglés, así como los del exponente "n".

Por ejemplo para un canal Parshall con una garganta de ancho igual a 1 pie (0.305 m), la ecuación de caudal para el sistema métrico queda de la siguiente forma:

$$Q = 0.609H^{1.522}$$

Dónde:

$$Q = \text{m}^3/\text{s}$$

$$H = \text{m}$$

Tabla II. Valores de “n” y coeficiente “K”

W		n	K	
S.I.	m.		unidades métricas	unidades inglesas
3"	0.076	1.547	0.176	0.992
6"	0.152	1.580	0.381	2.06
9"	0.229	1.530	0.535	3.07
1'	0.305	1.522	0.690	4.00
1 <sup>1</sup> / <sub>2</sub> '	0.457	1.538	1.054	6.00
2'	0.610	1.550	1.426	8.00
3'	0.915	1.566	2.182	12.00
4'	1.220	1.578	2.935	16.00
5'	1.525	1.587	3.728	20.00
6'	1.830	1.595	4.515	24.00
7'	2.135	1.601	5.306	28.00
8'	2.440	1.606	6.101	32.00

Fuente: DE AZEVEDO, J. M.; ACOSTA, Guillermo. Manual de hidráulica. p. 476.

Ventajas:

- Una sola medida o determinación de carga es suficiente para determinar el caudal.
- La pérdida de carga es mínima.
- El paso del flujo es libre y por lo tanto no presenta problemas de obstrucción con elementos arrastrados por la corriente.
- Al ser la velocidad de la garganta mayor que la velocidad de aproximación, no existe la posibilidad que ocurran sedimentaciones que afecten las mediciones.

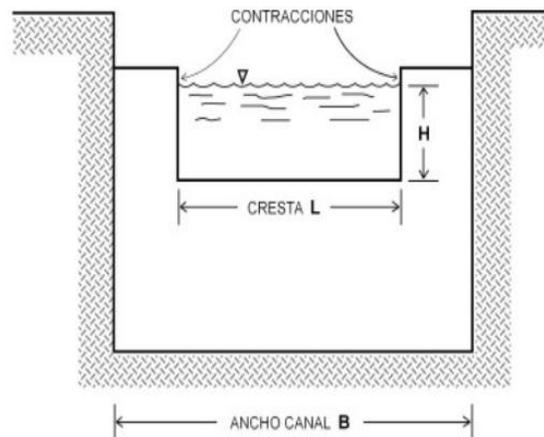
#### **1.4.1.4. Vertederos**

La medición del caudal de las corrientes naturales nunca puede ser exacta debido a que el canal suele ser irregular y por lo tanto la relación entre nivel y caudal también es irregular. Se pueden obtener cálculos más confiables cuando el caudal pasa a través de una sección donde esos problemas se han limitado.

Los vertederos pueden ser definidos como simples aberturas, sobre los cuales un líquido fluye. Estas estructuras se instalan en el interior del canal, perpendicularmente al flujo de agua.

En la página siguiente se presentan las partes de un vertedero.

Figura 16. Partes de un vertedero

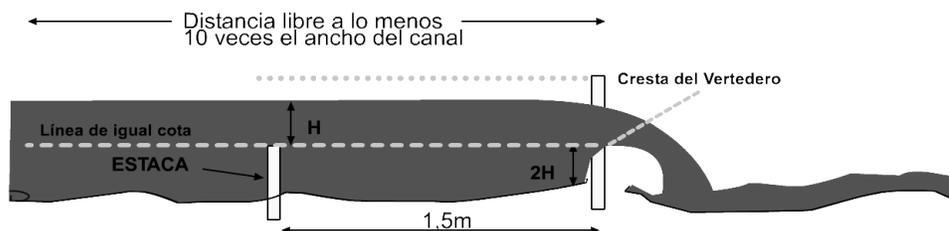


Fuente: LUX MONROY, Manuel Agustín. Medidores de flujo en canales abiertos. p. 7.

- Cresta (L): se denomina cresta al borde horizontal, también llamado umbral.
- Contracción: lo constituyen los bordes o caras verticales.
- Ancho (B): ancho del canal de acceso al vertedero.
- Carga (H): es la altura alcanzada por el agua a partir de la cresta del vertedero. Debido a la depresión de la lámina vertiente junto al vertedero, la carga H debe ser medida aguas arriba, a una distancia aproximadamente igual o superior a 1.5m.

Para la instalación se necesita seleccionar y despejar un tramo recto del canal de por lo menos diez veces el ancho de la cresta del vertedero. Instalar una estaca a 1.5 m aguas arriba del vertedero, dejando su extremo superior al nivel de la cresta del vertedero para medir H.

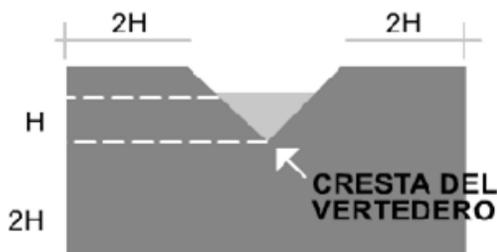
Figura 17. Perfil de vertedero



Fuente: [http://www.platina.inia.cl/paltoinnova/herramientas/riego/programa/cd\\_1.swf](http://www.platina.inia.cl/paltoinnova/herramientas/riego/programa/cd_1.swf). Consulta: enero de 2013.

La distancia entre la cresta y el fondo del canal, debe ser superior a 2 veces la carga de agua ( $H$ ) que se desea leer. La distancia desde la pared del canal a la abertura del flujo del vertedero debe ser también superior a 2 veces la carga.

Figura 18. Medidas de un vertedero



Fuente: [http://www.platina.inia.cl/paltoinnova/herramientas/riego/programa/cd\\_1.swf](http://www.platina.inia.cl/paltoinnova/herramientas/riego/programa/cd_1.swf). Consulta: enero de 2013.

Para medir el vertedero, se necesita conocer la altura " $H$ ", esto se logra colocando una regla graduada en la parte superior de la estaca instalada para

este efecto. Teniendo el valor de “H”, se introduce en la fórmula del vertedero con que se trabaja y se obtiene el caudal en (l/s).

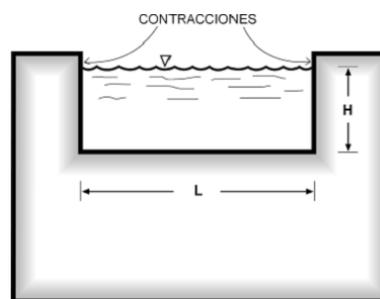
Según su forma los vertederos pueden ser:

- **Vertedero rectangular**

Es el más fácil de construir razón por la cual es muy utilizado, a diferencia del vertedero triangular, éste se utiliza para caudales mayores. La precisión de la lectura que ofrece está determinada por su nivel de error que oscila entre un 3 y 5 %.

En la página siguiente se muestra la estructura de un vertedero rectangular.

Figura 19. **Vertedero rectangular**



Fuente: LUX MONROY, Manuel Agustín. Medidores de flujo en canales abiertos. p. 16.

Fórmula general:

$$Q = 1.84 (L - 0.1 \cdot n \cdot H) \cdot H^{3/2} \cdot 1000 \left( \frac{L}{s} \right) \quad \text{Ec. 1.7}$$

Dónde:

Q = caudal que fluye por el vertedero, en L/s

L = ancho de cresta, en m.

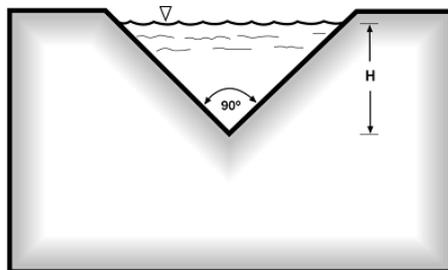
H = carga del vertedero, en m.

n = número de contracciones (0, 1 ó 2).

- **Vertedero triangular**

Esta estructura es más precisa para medir caudales pequeños. La sección del vertedero será triangular pudiéndose formar ángulos de 90° o 60° entre sus paredes.

Figura 20. **Vertedero triangular de 90°**



Fuente: LUX MONROY, Manuel Agustín. Medidores de flujo en canales abiertos. p. 17.

Fórmula general:

$$Q = F \cdot H^X \cdot 1000 \left( \frac{L}{s} \right) \quad \text{Ec. 1.8}$$

Vertedero de 90°: F=1.4 y X=2.5

Vertedero de 60°: F=0.775 y X=2.47

- **Vertedero trapezoidal**

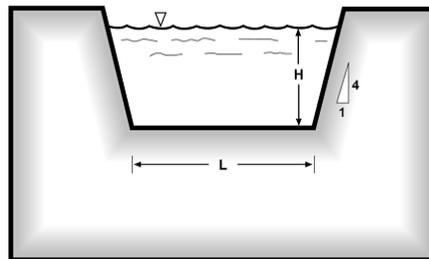
Es un vertedero que como su nombre lo indica tiene forma trapezoidal en su abertura, también conocido como vertedero Cipolletti en honor a su inventor, el Ingeniero italiano Cesare Cipolletti.

Cipolletti procuró determinar un vertedero que compensara el decrecimiento del caudal debido a las contracciones laterales por medio de las partes triangulares del vertedero, con la ventaja de evitar la corrección en los cálculos.

Para estas condiciones, el talud será 1:4 (1 horizontal para 4 vertical). Este vertedero es de construcción más dificultosa que los dos anteriores, razón por la cual es menos utilizado.

En la página siguiente se presenta la ilustración de un vertedero trapezoidal.

Figura 21. **Vertedero trapezoidal**



Fuente: LUX MONROY, Manuel Agustín. Medidores de flujo en canales abiertos. p. 7.

Fórmula general:

$$Q = 1.859 * L * H^{3/2} * 1000 \left( \frac{L}{s} \right) \quad \text{Ec. 1.9}$$

#### 1.4.2. **Medidores de caudal electrónicos en canal abierto**

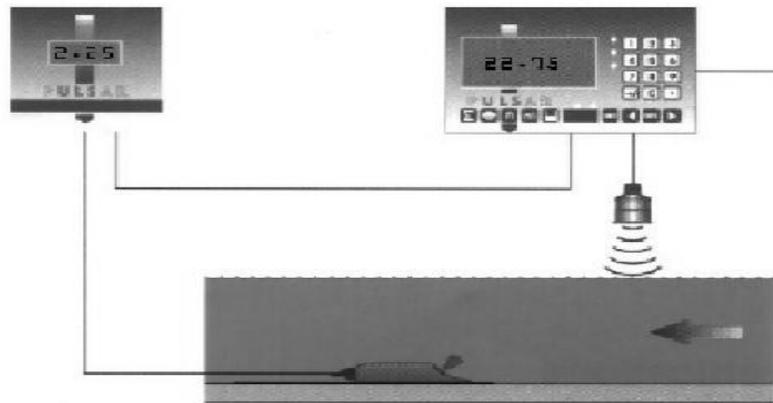
Estos medidores de caudal realizan todos los cálculos necesarios dentro de su unidad de procesamiento para poder desplegar la información en un *display*, almacenarla o enviarla a través de un canal de comunicación.

Existen diferentes marcas para estos medidores pero todos funcionan con base en el nivel y características del canal o vertedero, así también, puede utilizarse un sensor de velocidad cuando se desconoce las características de la estructura.

El tipo de sensor de nivel que más se utiliza es de no contacto, ya que de esta forma se evita el mantenimiento tanto para el sensor como para el transmisor.

Entre sus adicionales poseen entradas para medir temperatura, relés de accionamiento, comunicación RS232. Sus señales de salida pueden ser análogas o digitales.

Figura 22. **Medidor de caudal electrónico**



Fuente: Medidor de caudal en canales abiertos por ultrasonido. PULSAR ULTRA – ORACLE  
160. p. 3.

### 1.5. **Medidores de nivel según fabricantes**

En la medición de canales abiertos todo instrumento requerido se encuentra a la intemperie y en un área aislada de difícil acceso. Esto impide un mantenimiento constante a los instrumentos que deben soportar las diferentes condiciones atmosféricas.

Los medidores de nivel más utilizados para canales abiertos son los industriales ultrasónicos y radar, ya que estos son robustos y al no estar en contacto con el líquido no necesitan de un mantenimiento continuo.

A continuación se presentan medidores de nivel tipo ultrasónicos y radar de 5 de los fabricantes más utilizados por la empresa:

- Honeywell
- Endress+Hausser
- Emerson
- Siemens
- Vega

Tabla III. **Medidor de nivel tipo radar Honeywell**

<b>HONEYWELL</b>	
<b>Tipo</b>	<b>Radar</b>
<b>Modelo</b>	SMARTLINE RM70
<b>Alimentación</b>	36 Vdc max
<b>Frecuencia</b>	24 - 26 GHz
<b>Alcance</b>	260 ft
<b>Salida</b>	4-20 mA/HART, Profibus PA, Foundation Fieldbus
<b>Potencia</b>	0.8 W
<b>Corriente</b>	22 mA
<b>Aplicación</b>	Utilizado para medición de nivel, volumen, entre otros. Se puede instalar en tanques reactores y canales abiertos

Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. **Medidor de nivel ultrasónico Endress+Hausser**

<b>ENDRESS+HAUSSER</b>		
<b>Tipo</b>	<b>Ultrasónico 1 1/2" y 2"</b>	<b>Ultrasónico</b>
<b>Modelo</b>	Prosonic T FMU30	Prosonic M FMU 241
<b>Alimentación</b>	35 V	12-36 Vdc
<b>Frecuencia</b>	70/50 KHz	50 KHz
<b>Alcance</b>	16 ft/26 ft en fluidos	8 mt en fluidos
<b>Salida</b>	4 a 20 mA	4 a 20 mA HART, PROFIBUS PA, FF
<b>Potencia</b>	51 mW a 800 mW	2 hilos 51 mW - 800 mW/ 4 hilos 330 mW - 830 mW
<b>Corriente</b>	3.6 A 22 mA	3.6-22 mA
<b>Aplicación</b>	Mediciones de nivel continuo de no contacto en fluidos, pastas y materiales a granel	Mediciones de nivel continuo de no contacto en fluidos, pastas y materiales a granel. Utilizado también en mediciones de flujo en canales abiertos

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Medidor de nivel tipo radar Endress+Hausser**

<b>ENDRESS+HAUSSER</b>		
<b>Tipo</b>	<b>Radar</b>	<b>Radar</b>
<b>Modelo</b>	Micropilot M FMR 231	Micropilot M FMR 240
<b>Alimentación</b>	12-36 Vdc	12-36 Vdc
<b>Frecuencia</b>	3.7 - 4.2 y 5.9 - 6.4 GHZ	20 - 40 GHz
<b>Alcance</b>	65 ft	65 ft
<b>Salida</b>	4 a 20 mA HART, PROFIBUS PA, FF	4 a 20 mA HART, PROFIBUS PA, FF
<b>Potencia</b>	60 mW a 900 mW	60 mW a 900 mW
<b>Corriente</b>	3.6-22 mA	3.6-22 mA
<b>Aplicación</b>	Utilizado en lugares con altas compatibilidades químicas	Mediciones de nivel continuo de no contacto de fluidos en tanques.

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Medidor de nivel ultrasónico Emerson**

<b>EMERSON</b>		
<b>Tipo</b>	<b>Ultrasónico</b>	<b>Ultrasónico</b>
<b>Modelo</b>	Rousmont 3102	Rousmont 3105
<b>Alimentación</b>	12 - 40 Vcc	12 - 30 Vcc
<b>Frecuencia</b>	49 - 58 KHz	49 - 58 KHz
<b>Alcance</b>	36 ft	36 ft
<b>Salida</b>	4 a 20 mA, HART	4 a 20 mA, HART
<b>Potencia</b>	0.82 W	0.82 W
<b>Corriente</b>	120 mA	120 mA
<b>Aplicación</b>	Mediciones de nivel de tanques, flujo de canal abierto, pozos, nivel de embalse, entre otros	Mediciones de nivel de tanques de áreas peligrosas

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Medidor de nivel tipo radar Emerson**

<b>EMERSON</b>	
<b>Tipo</b>	<b>Radar</b>
<b>Modelo</b>	TankRadar Pro
<b>Alimentación</b>	24 - 220 Vcc o Vac
<b>Frecuencia</b>	10 GHz
<b>Alcance</b>	165 ft
<b>Salida</b>	4-20 mA/HART, Profibus PA Foundation Fieldbus, Modbus
<b>Potencia</b>	5 W
<b>Corriente</b>	500 mA
<b>Aplicación</b>	Tanques de almacenamiento, utilizado en industrias químicas y petroquímicas. Cemento, sustancias en polvo, virutas de madera y otras aplicaciones de materiales sólidos

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Medidor de nivel ultrasónico Siemens**

<b>SIEMENS</b>	
<b>Tipo</b>	<b>Ultrasónico</b>
<b>Modelo</b>	SITRANS Probe LU
<b>Alimentación</b>	30 Vdc max
<b>Frecuencia</b>	54 KHz
<b>Alcance</b>	0.8 - 20 ft
<b>Salida</b>	4 - 20 mA/HART Profibus PA
<b>Potencia</b>	0.66 W
<b>Corriente</b>	22 mA
<b>Aplicación</b>	Utilizado para la medición de nivel de líquidos en tanque de almacenamiento o de procesos sencillo y canales abiertos

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Medidor de nivel tipo radar Siemens**

<b>SIEMENS</b>		
<b>Tipo</b>	<b>Radar</b>	<b>Radar</b>
<b>Modelo</b>	SITRANS Probe LR	SITRANS LR250
<b>Alimentación</b>	30 Vdc max	30 Vdc max
<b>Frecuencia</b>	6 GHz	25 GHz
<b>Alcance</b>	66 ft	66 ft
<b>Salida</b>	4-20 mA/HART	4-20 mA/HART dos hilos, Profibus PA
<b>Potencia</b>	0.66 W	0.66 W
<b>Corriente</b>	22 mA	22 mA
<b>Aplicación</b>	Utilizado para la medición continua de nivel de líquidos y lodos en tanques de almacenamiento	Utilizado para la medición continua de niveles de líquidos y lodos en tanques de almacenamiento ideal para espacios limitados y con productos con bajo dieléctrico

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Medidor de nivel ultrasónico Vega**

<b>VEGA</b>		
<b>Tipo</b>	<b>Ultrasónico</b>	<b>Ultrasónico</b>
<b>Modelo</b>	VEGASON 61	VEGASON 63
<b>Alimentación</b>	20 -72 Vdc, 20 - 253 Vac	20 -72 Vdc, 20 - 253 Vac
<b>Frecuencia</b>	70 KHz	35 KHZ
<b>Alcance</b>	16.4 ft en fluidos	49.21 ft líquidos
<b>Salida</b>	4-20 mA/HART dos hilos y cuatro hilos, Profibus PA Foundation Fieldbus	4-20 mA/HART dos hilos y cuatro hilos, Profibus PA Foundation Fieldbus
<b>Potencia</b>	2.1 W	2.1 W
<b>Corriente</b>	600 mA	600 mA
<b>Aplicación</b>	Líquidos en depósitos abiertos así como mediciones de flujo en canales abiertos	Medición de líquidos en depósitos o estanques abiertos

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Medidor de nivel tipo radar Vega**

<b>VEGA</b>		
<b>Tipo</b>	<b>Radar</b>	<b>Radar</b>
<b>Modelo</b>	VEGAPULS 62	VEGAPULS 65
<b>Alimentación</b>	20 -72 Vdc, 20 - 253 Vac	20 -72 Vdc, 20 - 253 Vac
<b>Frecuencia</b>	26 GHz	69 GHz
<b>Alcance</b>	114.8 ft	114.83 ft
<b>Salida</b>	4-20 mA/HART dos hilos y cuatro hilos, Profibus PA Foundation Fieldbus, Modbus	4-20 mA/HART dos hilos y cuatro hilos, Profibus PA Foundation Fieldbus, Modbus
<b>Potencia</b>	2.1 W	2.1 W
<b>Corriente</b>	600 mA	600 mA
<b>Aplicación</b>	Tanques de almacenaje y depósitos de proceso en condiciones difíciles	Líquidos agresivos bajo condiciones de proceso simples

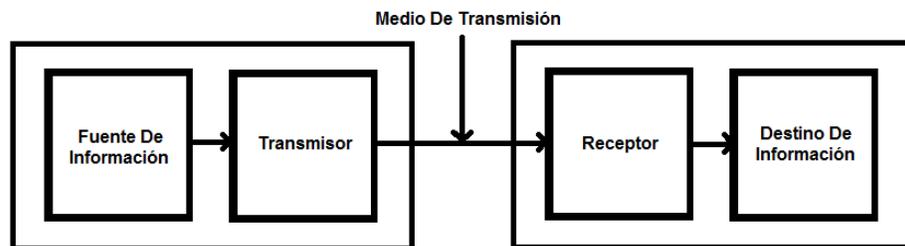
Fuente: elaboración propia.

## 1.6. Subsistema de procesado

En esta etapa del nodo, el procesador recibe la señal del sensor, ya sea digital o analógica y la procesa de modo que pueda ser desplegada en un *display*, incluso pueden utilizarse operaciones para obtener el valor de la variable que se desee. También se lleva a cabo la modulación de la señal para su respectiva transmisión ya sea a través de cables o de forma inalámbrica.

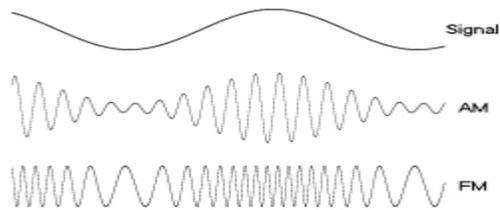
Debido a que el transmisor puede tanto enviar datos como recibir, esta etapa debe de trabajar en ambas direcciones. Esto se debe porque al momento de la transmisión, la señal de información modula una señal portadora cambiándole sus características con base en multiplicadores de frecuencia. Por lo tanto en la recepción, el objetivo de esta etapa será invertir el proceso para recuperar la señal de información de la señal portadora.

Figura 23. Diagrama de bloques de un sistema de comunicación



Fuente: elaboración propia.

Figura 24. **Modulación AM y FM**



Fuente: Modulación (telecomunicaciones). [www.es.wikipedia.org](http://www.es.wikipedia.org). Consulta: enero de 2013.

### **1.6.1. Señales de procesos industriales**

En la industria el tipo de señales utilizada para el control de procesos dependen del nivel que se necesite. Así, a nivel alto se utilizan señales de comunicación entre PCs o buses de campo, mientras que a nivel más bajo las señales son tensión o corriente procedentes de lecturas de variables o de actuaciones sobre válvulas, relés, etc. De estas últimas, a continuación se definen las tres más utilizadas.

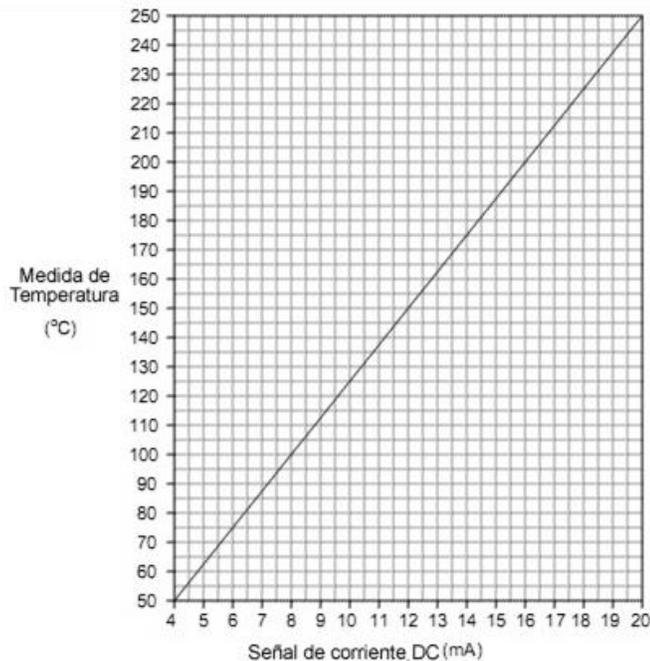
- **Señales Analógicas**

En instrumentación industrial las señales más utilizadas son las analógicas y el estándar más utilizado es 4 a 20 mA DC. Esta señal de corriente tiene una magnitud que varía proporcionalmente dentro de un rango determinado, para representar el valor de la variable medida.

Típicamente, un valor de 4 miliamperios de corriente representa 0% de medida, y un valor de 20 miliamperios representa un 100% de la medida y cualquier otro valor entre 4 y 20 miliamperios representa un porcentaje entre 0% y 100%.

Por ejemplo, si se calibra un transmisor de temperatura a 4-20 mA para medir un rango de 50 a 250 °C, los valores de corriente y temperatura pueden representarse de la siguiente forma:

Figura 25. **Relación temperatura, corriente DC**



Fuente: elaboración propia con programa Matlab.

Otros valores de este estándar, son los valores o señales de error, por ejemplo si la medición está fuera de rango por defecto, (un valor mucho menor de 50°C, por ejemplo 30°C), algunos equipos generan una señal de 3.6 mA (-10%) y por el contrario si el valor medido excede el rango, por ejemplo 300°C, algunos equipos generan una señal de 20.5 mA, otros 21 mA y otros 22 mA, en cualquiera de estos tres casos, son valores que cualquier sistema de medición de proceso interpreta como una señal de error, por estar fuera de rango.

Los sistemas de control usan dos diferentes señales de 4-20mA: una para representar variables de proceso (PV) y una para representar comandos hacia un elemento final de control (la variable manipulada o MV). Otras estándares analógicos pueden ser 0-10 V y 3-15 psi.

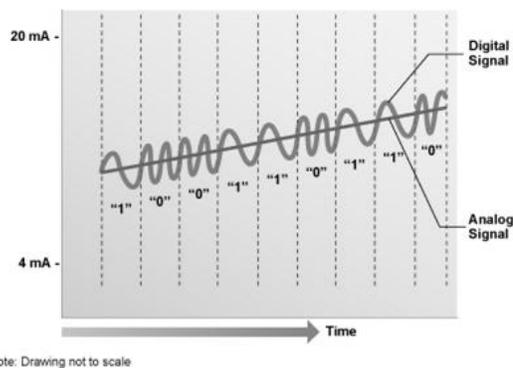
- **Señales Digitales**

Existen señales que se utilizan como estados, refiriéndose a que si está o no funcionando el equipo y se les denominan digitales. Estas señales presentan dos estados, por ejemplo, presencia o ausencia de tensión. El valor de tensión suele ser de 24 Vcc o ca y 12 Vcc o 5 Vcc.

- **Hart**

El protocolo HART Highway Addressable Remote Transducer por sus siglas en inglés, utiliza modulación por desplazamiento de fase FSK para sobreponer una señal digital de bajo nivel en un señal analógica de 4 – 20 mA.

Figura 26. **Protocolo Hart, digital sobre análogo**



Fuente: [http://www.hartcomm.org/protocol/about/aboutprotocol\\_what.html](http://www.hartcomm.org/protocol/about/aboutprotocol_what.html).

Consulta: enero de 2013.

Esto permite una comunicación bidireccional de campo y hace posible la información adicional más allá de la variable de proceso normal. El protocolo HART se comunica a 1200 bps, sin interrumpir la señal de 4-20 mA y permite una aplicación *host* (maestro) para obtener dos o más actualizaciones digitales por segundo de un dispositivo de campo inteligente. Como la señal digital de FSK es de fase continua, no hay interferencia con la señal de 4-20 mA.

La tecnología HART es un protocolo maestro/esclavo, lo que significa que el esclavo inteligente solo habla cuando el maestro se lo solicita. Este protocolo puede ser usado en varios modos como punto a punto o multipunto para la comunicación de información hacia/desde los dispositivos de campo inteligente y el control central.

El protocolo permite dos canales simultáneos de comunicación: señal análoga de 4-20 mA y señal digital. La señal 4-20 mA comunica el valor de medida del instrumento de campo y la información adicional del dispositivo es comunicada utilizando la señal digital que está sobre puesta en la señal análoga.

Esta señal digital contiene información del dispositivo incluyendo estado del dispositivo, diagnósticos, medidas adicionales o valores calculados, etc. Ambos canales proveen una muy robusta y completa solución para la comunicación de campo de bajo costo que es fácil de usar y configurar.



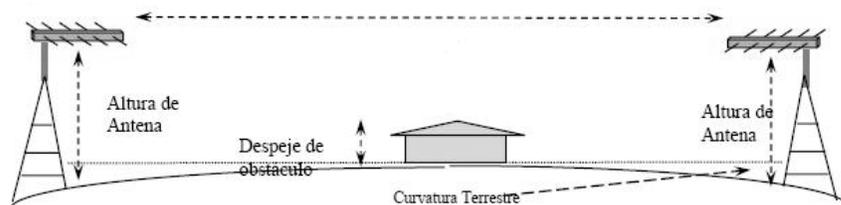
## 2. TRANSMISIÓN INALÁMBRICA

### 2.1. Subsistema de transmisión, radio enlace

Se le denomina radio enlace a cualquier interconexión entre dos antenas por medio de ondas electromagnéticas, que permiten establecer comunicación en un determinado rango de frecuencias. Al rango de frecuencias asignadas para transmisión y recepción se le denomina radio canal.

Básicamente los enlaces se hacen entre puntos visibles para obtener una línea vista entre las antenas. Es decir, el enlace se realiza entre los puntos más altos de la topografía para poder evitar toda clase de interferencia causada por obstáculos o cambios climáticos.

Figura 27. Radio enlace



Fuente: <http://www.eslared.org.ve/om/wilac/resources/83.html>. Consulta: enero de 2013.

Todo radio enlace inicia con una base o terminal donde se procesan las señales electromagnéticas, estas bases pueden ser fijas o móviles. Generalmente un sistema fijo se explota en las bandas de 800MHz y 42GHz.

Al utilizar terminales fijas o móviles hay ocasiones en que el enlace se ve interrumpido por diversos obstáculos. Resultado de lo anterior es la implementación de repetidoras, que permiten sortear los obstáculos y formar dos o más radio enlaces para comunicar las terminales. Se pueden tener dos tipos de repetidores:

- Repetidores Activos: reciben la señal de la antena transmisora a cierta frecuencia de portadora y bajan esta señal a una frecuencia intermedia para poder ser amplificada y retransmitirla nuevamente en la frecuencia original.
- Repetidores Pasivos: se comportan como espejos y se dividen en pasivos convencionales que son una pantalla reflectora y pasivos *back-back* que son dos antenas espalda a espalda. Estos se usan básicamente para salvar obstáculos aislados y de corta distancia.

Otro componente importante en un radio enlace es la antena, según el Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) define una antena como aquella parte de un sistema transmisor o receptor, diseñada específicamente para radiar o recibir ondas electromagnéticas. Estas estructuras convierten señales eléctricas en ondas electromagnéticas y viceversa. Si bien sus formas son muy variadas sus parámetros son los mismos: ganancia, densidad de potencia transmitida, patrón de radiación, impedancia, directividad, y polarización.

Toda antena como cualquier circuito, representa una impedancia a la señal de entrada. Esta impedancia, es la relación entre la tensión y la corriente en las terminales de la entrada de la antena. Dicha impedancia es en general

compleja. La parte real se denomina resistencia de antena y la parte imaginaria, reactancia de la antena.

$$Z_i = \frac{V_i}{I_i} = R_a + j X_a \quad \text{Ec. 2.1}$$

La densidad de potencia transmitida en una antena, hace referencia a la potencia transmitida por unidad de superficie en una determinada dirección, las unidades son vatios por metro cuadrado.

$$\vec{P}(\theta, \varphi) = \text{Re} \left( \vec{E} \times \vec{H}^* \right) \quad \text{Ec. 2.2}$$

Dónde:

E = Intensidad de campo eléctrico

H = Densidad de campo magnético

La directividad es un parámetro más de la antena que relaciona la densidad de potencia radiada en una dirección, a una distancia y la densidad de potencia que radiaría a la misma distancia, una antena isotrópica que radiase la misma potencia que la antena.

$$D(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{\frac{W_t}{4\pi r^2}} \quad \text{Ec. 2.3}$$

Con base en la directividad, se puede definir la ganancia de la antena como: la mayor cantidad de potencia concentrada en una determinada dirección con la máxima radiación.

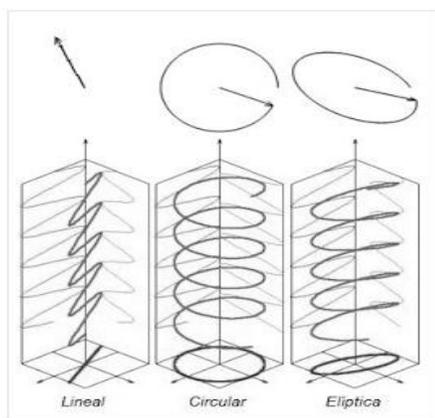
$$G(\theta, \varphi) = \epsilon D(\theta, \varphi)_{\max} \quad \text{Ec. 2.4}$$

$$\epsilon = \frac{P_{\text{rad}}}{P_{\text{in}}} = \text{eficiencia} \quad \text{Ec. 2.5}$$

Al momento de la radiación la onda viaja formando una figura geométrica (onda polarizada), que es determinada por el extremo del vector que representa el campo eléctrico en función del tiempo.

Para ondas con variaciones sinusoidal dicha figura es en general una elipse. Si la figura es una recta, la onda se denomina linealmente polarizada y si es un círculo circularmente polarizada.

Figura 28. **Polarización de una onda electromagnética**



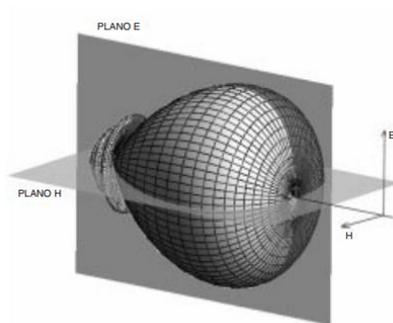
Fuente: <http://www.antenasparatodos.blogspot.com/2008/05/polarizacin.html>.

Consulta: enero de 2013.

Así también, la radiación de la antena forma una figura en el espacio a la cual se le denomina patrón de radiación. Este parámetro es una representación

de las propiedades de radiación de la antena en función de distintas direcciones del espacio.

Figura 29. **Patrón de radiación tridimensional**



Fuente: AZNAR, Ángel, et al. Antenas. p. 20.

La misión de una antena es radiar la potencia que se le suministra con las características de direccionalidad adecuadas a la aplicación. Asimismo, para poder extraer información la antena ha de ser capaz de captar en algún punto del espacio la onda radiada, absorber energía de esa onda y entregarla al receptor.

Para que la señal pueda ser captada por la antena la onda debe tener una potencia mínima, a esta potencia se le denomina sensibilidad del receptor. Este parámetro se refiere a la mínima potencia que una señal requiere para poder ser captada por la antena. Ejemplo con una sensibilidad de -110 dBm se desea calcular la potencia mínima requerida:

$$-110 \text{ dBm} = 10 \times \log \frac{P(W)}{1 \text{ mW}}$$

$$P(W) = 0.000000000000001 W$$

Según sea la necesidad, las antenas pueden variar en forma y de este modo alterar sus parámetros. Debido a esta variación existe un gran número de antenas, que se pueden agrupar en los bloques siguientes:

- Antenas alámbricas: se distinguen por estar construidas con hilos conductores que soportan las corrientes que dan origen a los campos radiados. Pueden estar formadas por hilos rectos (dipolo, V, rómbica), espiras (circular, cuadrada o de cualquier forma arbitraria) y hélices. Este tipo de antenas se caracterizan por corrientes y cargas que varían de forma armónica con el tiempo y con amplitudes que también varían a lo largo de los hilos.
- Antenas de apertura y reflectores: en ellas la generación de la onda radiada se consigue a partir de una distribución de campos soportada por la antena y se suelen excitar con guías de ondas. Son antenas de apertura las bocinas (piramidales y cónicas), las aperturas y las ranuras sobre planos conductores, y las bocas de guía. Este tipo de antenas se caracterizan por los campos eléctricos y magnéticos de la apertura, variables armónicamente con el tiempo. El empleo de reflectores, asociados a un alimentador primario, permite disponer de antenas con las prestaciones necesarias para servicios de comunicaciones a grandes distancias, tanto terrestres como espaciales. El reflector más común es el parabólico.
- Agrupaciones de antenas: en ciertas aplicaciones se requieren características de radiación que no pueden lograrse con un solo elemento; sin embargo, con la combinación de varios de ellos se

consigue una gran flexibilidad que permite obtenerlas. Estas agrupaciones pueden realizarse combinando, en principio, cualquier tipo de antena.

### **2.1.1. Consideraciones de un radio enlace**

En toda comunicación por medio de antenas sin importar cual tipo se utilice, si hay o no repetidores, se puede decir que los radio enlaces son sistemas de comunicación en serie, de modo que si uno falla se corta toda la comunicación.

Con base en lo anterior, para diseñar un radio enlace se debe de tomar en cuenta varios aspectos que no conciernen solo a las torres o tipos de antenas a utilizar. Esto quiere decir que se debe de considerar todo lo relacionado con el ambiente en el cual se establecerá el enlace.

Un aspecto a considerar en la propagación de la onda electromagnética es la refracción de la misma, esto provoca una curva en la trayectoria de la onda dependiendo de las variaciones de la constante dieléctrica en la atmósfera o bien del índice de refracción  $n$  con respecto a la altura sobre la tierra.

La curvatura del rayo depende de un factor  $K$  que está relacionado con el gradiente del índice de refracción y el cociente de refracción:

$$N = (n-1) \times 10^6 \quad \text{Ec. 2.6}$$

$$G = \frac{dN}{dh} \quad \text{Ec. 2.7}$$

Como la curvatura del haz es dependiente de la dirección del gradiente de refractividad que experimenta en cada punto a lo largo de su trayectoria, el promedio del gradiente en cada punto se puede decir que es el radio que describe una trayectoria curva. De esta manera se puede considerar que el rayo viaja sobre un arco de radio  $r$ , el cual es inversamente proporcional al gradiente del índice de refracción.

$$K = \frac{1}{1 + R_o \times \frac{dn}{dh}}$$

Donde  $R_o$  es el radio real de la tierra (6370Km). Despejando el índice de refracción del cociente de refractividad:

$$n = N \times 10^{-6} + 1$$

Diferenciando la ecuación anterior con respecto a la altura:

$$\frac{dn}{dh} = 10^{-6} \times \frac{dN}{dh} = 10^{-6} G$$

Sustituyendo

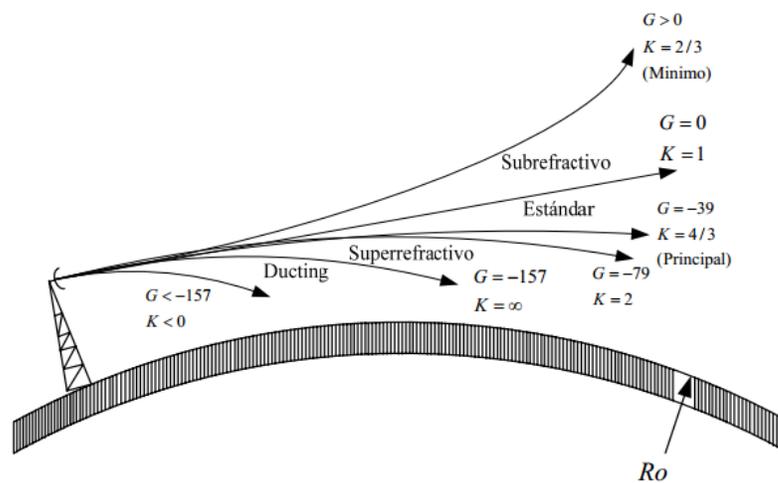
$$K = \frac{1}{1 + 0.006371G} = \frac{157}{157 + G} \quad \text{Ec 2.8}$$

Tabla XII. **Comparación del factor K contra el gradiente de refractividad**

Factor K	Gradiente de Refractividad G
$K = 1$	$G = 0$
$K = 4/3$	$G = -39$
$K = \infty$	$G = -157$
$K < 1$	$G > 0$

Fuente: elaboración propia.

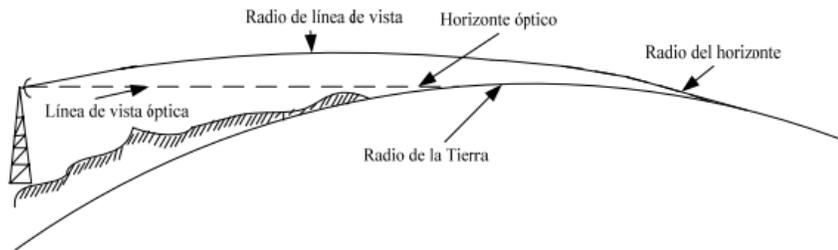
Figura 30. **Curvatura del haz causada por la refracción**



Fuente: HERNANDEZ, Julio; PARRAO, Elizabeth. Diseño de enlace terrestre por línea vista. p. 34.

Como se mencionó anteriormente, el sitio donde se establecerá el radio enlace de preferencia debe tener una línea vista entre el transmisor y receptor. Aunque en realidad, se pueden lograr comunicaciones más allá del horizonte óptico ( $K=1.33$ ) como lo ilustra la siguiente figura.

Figura 31. **Línea vista óptica contra el radio de la línea de vista**

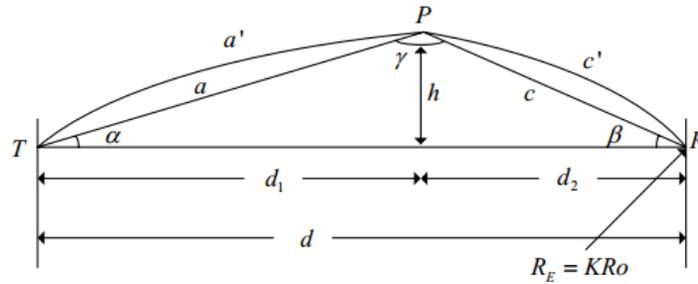


Fuente: HERNANDEZ, Julio; PARRAO, Elizabeth. Diseño de enlace terrestre por línea vista. p. 35.

Al establecer un radio enlace se trata que los obstáculos sean lo más pequeños posibles, así también, hay que considerar que para distancias relativamente grandes las alturas de los obstáculos dependen del factor  $K$  y del radio efectivo de la tierra  $R_0$ , es decir, los diferentes obstáculos que aparecen sobre la superficie de la tierra verán incrementado su altitud debido a la redondez de la misma.

Por lo tanto, cualquier variación en  $K$  corresponde a una corrección del perfil. Tomando en cuenta lo anterior, es posible obtener una fórmula para calcular la curvatura efectiva de la tierra para cualquier valor de  $K$ , como se muestra a continuación en la página siguiente:

Figura 32. Construcción matemática



Fuente: HERNANDEZ, Julio; PARRAO, Elizabeth. Diseño de enlace terrestre por línea vista. p. 39.

Tomando  $d_1$  y  $d_2$  como las distancias a cualquier punto donde se desea conocer la altura  $h$  del arco de radio  $KR_0$ , se puede aplicar al triángulo TPR la ley de senos:

$$\frac{c}{\text{sen}\alpha} = \frac{a}{\text{sen}\beta} = \frac{b}{\text{sen}\gamma} = 2R_E \quad \text{Ec. 2.9}$$

Además:

$$\text{sen}\alpha = \frac{h}{a}$$

Combinando las ecuaciones anteriores:

$$\text{sen}\alpha = \frac{h}{a} = \frac{c}{2R_E}$$

$$h = \frac{ac}{2R_E}$$

Generalmente se considera que:

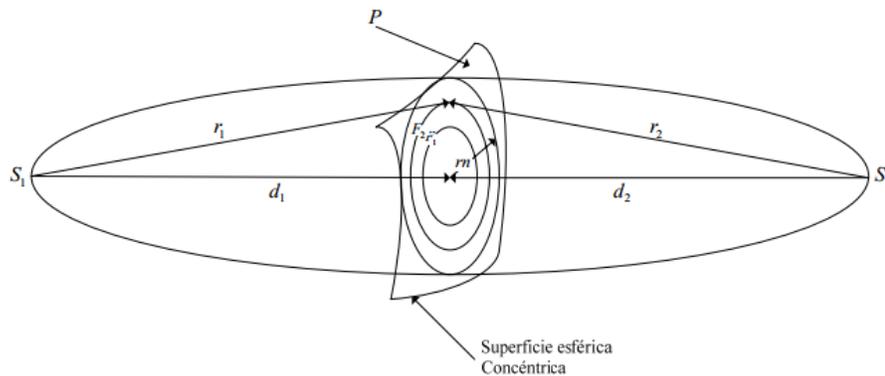
$$a \approx a' \approx d_1 \text{ y } c \approx c' \approx d_2$$

Entonces:

$$h = \frac{d_1 d_2}{2R_E} \quad \text{Ec 2.10}$$

Considerando que los obstáculos no son lo suficientemente grandes, se garantiza un volumen de espacio libre que se le denomina zona de Fresnel. En este volumen de espacio que se encuentra entre el emisor y el receptor, la onda no supera los  $180^\circ$  de desfase.

Figura 33. **Geometría de las zonas de Fresnel**



Fuente: HERNANDEZ, Julio; PARRAO, Elizabeth. Diseño de enlace terrestre por línea vista. p. 41.

De la figura anterior se plantea que el campo electromagnético en el punto  $S_2$  es debido a la suma de los campos causados por la radiación de pequeñas

áreas que se incrementan sobre una superficie cercana al punto  $S_1$ , que hace que  $S_1$  sea la única fuente de radiación. A una distancia  $r_1$  de  $S_1$  (el cual es una superficie esférica) se tiene la misma fase en toda la superficie.

Esto quiere decir, que las distancias  $r_2$  de varios puntos sobre el frente de onda a  $S_2$  son consideradas, las contribuciones al campo de  $S_2$  que se suman vectorialmente de acuerdo con la diferencia de sus fases relativas. Cuando varios de los valores de  $r_2$  difieren por media longitud de onda ( $\lambda / 2$ ) o hay desfase, es cuando hay una cancelación más fuerte.

Por lo tanto se puede definir un grupo de elipsoides concéntricas tal que la suma de las distancias de  $r_1$  y  $r_2$  difiera por múltiplos de media longitud de onda ( $\lambda / 2$ ). De esta manera las elipsoides definen las zonas de Fresnel, donde la primera zona  $F_1$  está definida como el contorno de la intersección de la suma de los segmentos rectos  $r_1$  y  $r_2$  igual a la distancia  $d$  más la suma de media longitud de onda ( $\lambda / 2$ ).

De la misma forma la segunda zona  $F_2$  se define como la región donde la suma de  $r_1 + r_2$  es más grande que  $d + \lambda / 2$  y menor que  $d + 2(\lambda / 2)$ . De manera general se define  $F_n$  como la región donde la suma de  $r_1 + r_2$  es más grande que  $d + (n-1) \lambda / 2$  pero menor que  $d + (n) \lambda / 2$ .

Para calcular el radio de la Zona  $n$  de Fresnel, es decir  $r_n$  en una superficie perpendicular al camino de propagación, se utiliza la siguiente ecuación:

$$r_n = \sqrt{n\lambda \frac{d_1 d_2}{d_t}} \quad \text{Ec 2.11}$$

Dónde:

$n$  = número entero de la Zona de Fresnel que se desea calcular

$\lambda$  = longitud de onda (m)

$d_1$  = distancia del punto 0 al Km donde se quiere conocer la zona de Fresnel (m)

$d_2$  = distancia del punto evaluado al final del enlace (m)

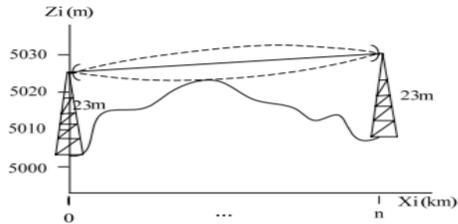
$d_t$  = distancia total del enlace (m)

Tomando su valor de fase como cero, la primera zona de Fresnel abarca hasta que la fase llega a  $180^\circ$  primer elipsoide. La segunda zona abarca hasta un desfase de  $360^\circ$  y es un segundo elipsoide que contiene al primero. Del mismo modo se obtienen las zonas superiores.

La obstrucción máxima permisible para considerar que no hay obstrucción es el 40% de la primera zona de Fresnel. La obstrucción máxima recomendada es el 20%. Para el caso de radiocomunicaciones que depende del factor  $K$  (curvatura de la tierra) considerado para un  $K=4/3$  la primera zona de Fresnel debe estar despejada al 100%. En un estudio realizado con  $K=2/3$  se sugiere tener despejado el 60% de la primera zona de Fresnel.

Tomando en cuenta, que el éxito de un radio enlace dependerá de que la trayectoria la onda electromagnética no sea obstruida, se determina que el tamaño de las torres de transmisión y recepción del enlace dependerá de la máxima obstrucción, siempre y cuando la altura de obstrucción no rebase los 120 m. Esto quiere decir, que la altura de torres propuesta para el enlace deberá ser directamente proporcional a la altura máxima de obstrucción.

Figura 34. **Radio enlace**



Fuente: HERNANDEZ, Julio; PARRAO, Elizabeth. Diseño de enlace terrestre por línea vista. p. 87.

Después de haber sorteado todos los obstáculos, se determina la confiabilidad del enlace calculando la ganancia del sistema. Esta ganancia es la diferencia entre la potencia nominal de salida de un transmisor y la potencia de entrada mínima requerida por un receptor para que exista comunicación, esta diferencia debe ser mayor o igual a la suma de todas las ganancias y pérdidas incurridas por una señal al propagarse del transmisor al receptor.

$$G_s = P_t - C_{\min} \quad \text{Ec 2.12}$$

Dónde:

$G_s$  = ganancia del sistema (dB)

$P_t$  = potencia de salida del transmisor (dBm)

$C_{\min}$  = potencia mínima de entrada al receptor (dBm)

Y dónde

$$P_t - C_{\min} \geq \text{pérdidas} - \text{ganancias}$$

### Ganancias:

$A_t$  = ganancia de la antena de transmisión (dB) en relación con un radiador isotrópico

$A_r$  = ganancia de la antena de recepción (dB) en relación con un radiador isotrópico

### Pérdidas:

$L_p$  = pérdida en trayectoria por espacio libre entre antenas (dB)

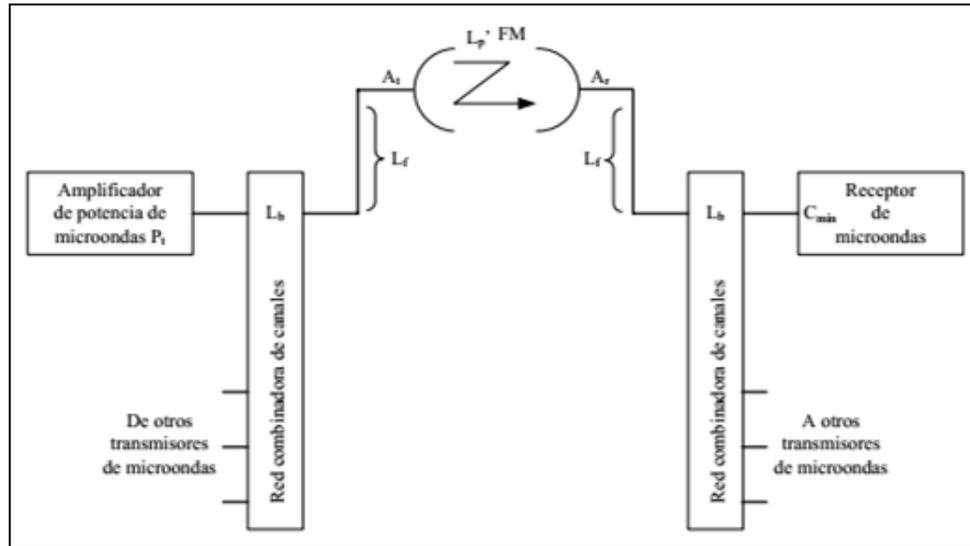
$L_{ft}$  = pérdida en alimentador de guía de onda (dB) entre la red de distribución (la red de combinación de canales o separadora de canales) y su antena respectiva

$L_{bt}$  = pérdida total por acoplamiento o por ramificación (dB) en los circuladores, filtros y red de distribución, entre la salida de un transmisor o la entrada a un receptor y su guía de onda de alimentación respectiva

$F_m$  = margen de desvanecimiento para determinado objetivo de confiabilidad.

En la figura siguiente se muestra un diagrama general de un sistema de microondas, e indica dónde suceden las respectivas pérdidas y ganancias.

Figura 35. Ganancias y pérdidas de un sistema de radio enlace



Fuente: HERNANDEZ, Julio; PARRAO, Elizabeth. Diseño de enlace terrestre por línea vista. p. 90.

Las pérdidas en la trayectoria por el espacio libre, son pérdidas incurridas a la onda electromagnética al propagarse en línea recta a través del vacío. Estas pérdidas dependen de la frecuencia y aumentan con la distancia, la ecuación para determinar estas pérdidas es la siguiente:

$$L_p = \left[ \frac{4\pi D}{\lambda} \right]^2 = \left[ \frac{4\pi f D}{c} \right]^2 \quad \text{Ec. 2.13}$$

Dónde:

L<sub>p</sub> = pérdida en la trayectoria en espacio libre (adimensional)

D = distancia (metros)

f = frecuencia (hertz)

$\lambda$  = longitud de onda (metros)

$c$  = velocidad de la luz en el espacio libre ( $3 \times 10^8$  m/s)

Al pasar a dB se obtiene:

$$L_{p(\text{dB})} = 10 \log \left[ \frac{4\pi f D}{c} \right]^2$$

$$L_{p(\text{dB})} = 20 \log \frac{4\pi}{c} + 20 \log f_{(\text{GHz})} + 20 \log D_{(\text{km})}$$

$$L_{p(\text{dB})} = 92.4 + 20 \log f_{(\text{GHz})} + 20 \log D_{(\text{km})} \quad \text{Ec. 2.14}$$

Margen de desvanecimiento, es un factor ficticio que se incluye en la ecuación de ganancia del sistema, para tener en cuenta las características no ideales y menos predecibles de la propagación de las ondas de radio, por ejemplo, la propagación por múltiples trayectorias y sensibilidad del terreno. Estas características son causa de condiciones atmosféricas temporales y anormales que alteran las pérdidas en la trayectoria en el espacio libre. Matemáticamente el margen de desvanecimiento es igual a:

$$F_m = \underbrace{30 \log D}_{\text{Efecto de trayectoria múltiple}} + \underbrace{10 \log (6ABf)}_{\text{Sensibilidad del terreno}} - \underbrace{10 \log (1-R)}_{\text{Objetivos de confiabilidad}} - \underbrace{70}_{\text{Constante}} \quad \text{Ec. 2.15}$$

Dónde:

$F_m$  = margen de desvanecimiento (dB)

$D$  = distancia total del enlace (Km)

- f = frecuencia (GHz)
- R = factor de confiabilidad en decimales (99.9% = 0.999)
- A = factor aspereza
  - = 4 sobre agua o un terreno muy liso
  - = 1 sobre terreno promedio
  - = 0.25 sobre un terreno áspero y montañoso
- B = factor para convertir la probabilidad del peor de los meses en probabilidad anual
  - = 1 para convertir una disponibilidad anual a la base del peor de los meses
  - = 0.5 para áreas cálidas o húmedas
  - = 0.25 para áreas continentales promedio
  - = 0.125 para áreas secas y montañosas

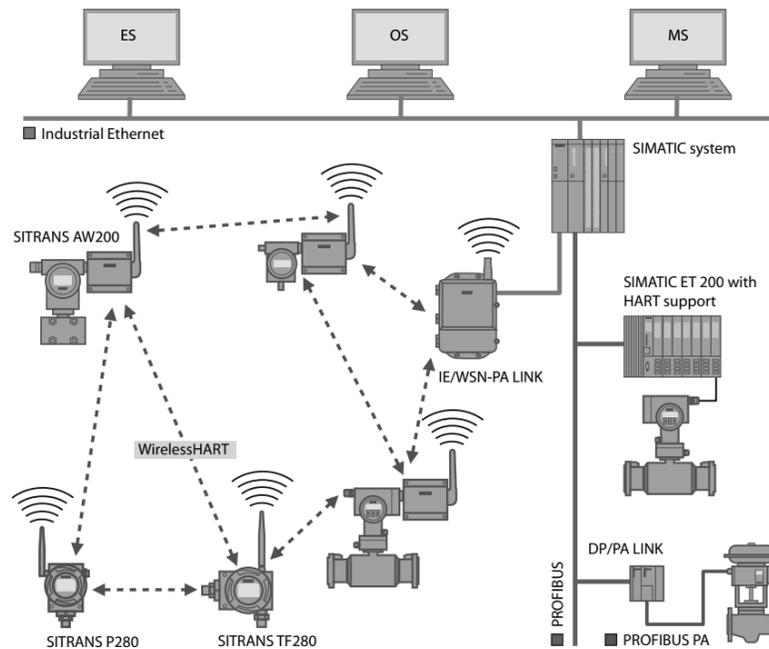
## **2.2. Red de sensores inalámbricos (WSN)**

Wireless Sensor Network por sus siglas en inglés, es una red inalámbrica que consiste en una gran cantidad de pequeños dispositivos, autónomos, distribuidos físicamente, instalados alrededor de un fenómeno para ser monitoreado. Estos dispositivos realizan ciertas mediciones, procesan los datos medidos y los transmiten a sus vecinos, que a su vez retransmiten los mensajes a sus vecinos y así sucesivamente hasta que el dato llega a una estación base.

Una vez que los datos han llegado a su destino pueden ser procesado y/o almacenados por computadoras y aplicaciones mucho más sofisticada, obteniendo de esta forma información de la actividad en el área de interés. Los sistemas WSN tienen la capacidad de auto restauración, es decir, si se avería un nodo, la red encontrará nuevas vías para encaminar los paquetes de datos.

De esta forma, la red sobrevivirá en su conjunto, aunque haya nodos individuales que pierdan potencia o se destruyan.

Figura 36. Red industrial de sensores inalámbricos



Fuente: SIEMENS, SITRANS AW200 instrucciones de operación. p. 19.

A los nodos de las redes se les imponen unas restricciones de consumo severas. El motivo de la imposición de estas restricciones es la necesidad de que los nodos sean capaces de operar, por sí mismos, durante periodos largos de tiempo, en lugares donde las fuentes de alimentación son si no inexistentes, de baja potencia. El tamaño es otra restricción que cada vez se hace más necesaria para la mayoría de las aplicaciones, de manera que las tarjetas o nodos que forman las redes de sensores sean cada vez de menor tamaño.

### 2.2.1. Características de una WSN

Las redes inalámbricas de comunicación tienen características similares no importando su aplicación, sin embargo, existen características que se emplean solo en ambientes industriales. A continuación se listan de una WSN:

- Topología dinámica: en una red de sensores, la topología siempre es cambiante y estos tienen que adaptarse para poder comunicar nuevos datos adquiridos.
- Variabilidad del canal de comunicación: el canal de radio es un canal muy variable en el que existen una serie de fenómenos como pueden ser la atenuación, desvanecimientos rápidos, desvanecimientos lentos e interferencias que puede producir errores en los datos.
- No se utiliza infraestructura de red: una red de sensores no tiene necesidad alguna de infraestructura para poder operar, ya que sus nodos pueden actuar de emisores, receptores o enrutadores de la información.
- Tolerancia a errores: un dispositivo sensor dentro de una red de sensores, tiene que ser capaz de seguir funcionando a pesar de tener errores en el sistema propio.
- Comunicaciones multisalto o *broadcast*: en aplicaciones de redes de sensores siempre es característico el uso de algún protocolo que permita comunicaciones multisalto, aunque también es muy común utilizar mensajería basada en *broadcast*.

- Consumo energético: es uno de los factores más sensibles debido a que se tiene que conjugar autonomía con capacidad de proceso, ya que cuentan con una unidad de energía limitada. Un nodo sensor tiene que contar con un procesador de consumo ultra bajo, así como de un transceptor radio con la misma característica, a esto hay que agregar un software que también conjugue esta característica haciendo el consumo aún más restrictivo.
- Limitaciones hardware: para poder conseguir un consumo ajustado, se hace indispensable que el hardware sea lo más sencillo posible, así como su transceptor radio, esto deja una capacidad de proceso limitada.

### **2.2.2. Aplicaciones**

Las redes de sensores inalámbricos ofrecen una solución alternativa para aplicaciones donde no es posible tender un cableado, siendo las más comunes las que se presentan a continuación:

- Monitoreo y control
- Seguridad
- Seguimiento o rastreo
- Aplicaciones agrícolas
- Redes híbridas (escenarios con categorías antes mencionadas)

Enfocando el presente trabajo principalmente en las aplicaciones de monitoreo y control, se definen las siguientes características para un sistema WSN además de las antes mencionadas:

- Automatizar la obtención de los datos de nodos sensores remotos disminuyendo la intervención de usuarios.
- Configurar y ejecutar distintos sistemas desde un punto central.
- Proveer información detallada para mejorar el mantenimiento preventivo.

A diferencia de las redes móviles *ad hoc*, las redes de sensores no tienen grandes requerimientos de movilidad. También se diferencian de otras redes inalámbricas, como por ejemplo WLAN, que fueron diseñadas para tener un mayor alcance y que por lo tanto requieren una fuente de energía constante. Los criterios de diseño para una red de sensores dependen directamente de la aplicación ya que no es lo mismo el tiempo de entrega de un paquete para una aplicación de monitoreo, que para una aplicación de vigilancia.

De modo que al utilizar el estándar IEEE 802.15.4 el cual solo incluye las capas de nivel físico y de enlace, es necesario que las labores de la capa 3 (capa de red) deban de ser implementadas de acuerdo a la aplicación. Dado que existe una estrecha relación y comunicación entre las capas, deben comprenderse sus estructuras al diseñar y desarrollar aplicaciones para redes de sensores.

### **2.3. Topología WSN**

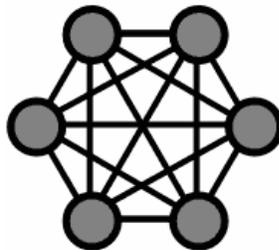
Una topología de red se define como la cadena de comunicación usada por los nodos que conforman una red. Estas cadenas pueden representar a la red como una topología estética o de figuras, o bien pueden representarla como una topología lógica, eso dependerá de lo que se necesite en el momento.

Dado que en un sistema WSN no necesariamente puede establecerse un enlace directo entre un nodo cualquiera de la red y la estación base (una sola

cadena), se requiere una topología de red de múltiples saltos y de un algoritmo para determinar la ruta que seguirá el mensaje.

Por lo tanto una WSN hace uso de todas las topologías existentes tomando como principal la topología tipo malla. Donde la característica principal de esta topología, es que los nodos se pueden conectar a múltiples nodos en el sistema y pasar los datos por el camino disponible de mayor confiabilidad.

Figura 37. **Diagrama de la topología tipo malla**



Fuente: elaboración propia.

A esta topología también se le puede denominar dinámica, ya que existen nodos que pueden dejar de operar por fallos físicos o falta de baterías y aun así, encontrar el camino de comunicación hasta el base (redundancia).

## 2.4. **Protocolos**

Un protocolo es un conjunto de reglas para la comunicación a través de una red. Un protocolo es una convención o estándar que controla o permite la conexión, comunicación y transferencia de datos entre dos puntos finales. En su forma más simple, puede ser definido como las reglas que dominan la sintaxis, semántica y sincronización de la comunicación.

Si bien los protocolos pueden variar mucho en propósito y sofisticación, la mayoría especifica una o más de las siguientes propiedades:

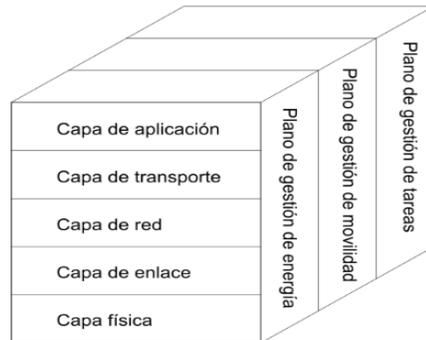
- Detección de la conexión física subyacente (con cable o inalámbrica), o la existencia de otro punto final o nodo.
- *Handshaking*.
- Negociación de varias características de la conexión.
- Cómo iniciar y finalizar un mensaje.
- Procedimientos en el formateo de un mensaje.
- Qué hacer con mensajes corruptos o formateados incorrectamente (corrección de errores).
- Cómo detectar una pérdida inesperada de la conexión y qué hacer entonces.
- Terminación de la sesión y/o conexión.

En el campo de las redes informáticas, los protocolos se pueden dividir en varias categorías, una de las clasificaciones más aplicadas es la del modelo OSI que se divide en siete capas:

- Aplicación
- Presentación
- Sesión
- Transporte
- Red
- Enlace de datos
- Física

Aunque en los sistemas WSN solo se hace énfasis en ciertas capas, los protocolos de cada capa tienen una interfaz bien definida.

Figura 38. **Pila de protocolos de red de sensores**



Fuente: elaboración propia.

Capa física: es la responsable de la selección de frecuencia, generación de frecuencia de portadora, detección de señal, modulación y encriptamiento de los datos. La opción de un esquema de modulación bueno es crítica para la comunicación fiable en una red de sensores.

Aunque la transmisión en las WSN puede ser por infrarrojos, radio o medio óptico, la banda industrial científica y médica (ISM) es la más utilizada en las redes de sensores. La deficiencia de usar infrarrojos o medios ópticos para la transmisión, es que requieren que los nodos transmisor y receptor mantengan una línea de contacto visible. Sin embargo, algunas especificaciones inalámbricas como Bluetooth, HomeRF, y las redes LAN Wireless especificadas por el IEEE 802.11b operan todas en la frecuencia de los 2.4GHz.

Capa de enlace: la capa de enlace de datos es responsable de la multiplexación del flujo de datos, así como detección de trama de datos, acceso al medio y control de errores. Asegura conexiones fiable punto a punto y punto multipunto en una red de comunicación.

Existen especificaciones como Bluetooth que utilizan la multiplexación por división en el tiempo (TDMA) con saltos de frecuencia, mientras que las redes LAN inalámbricas especificadas por el 802.11b, utilizan un método de acceso al medio con detección de portadora y evitando colisiones (CSMA/CA).

Un protocolo de capa MAC para las WSN es el llamado MAC auto organizado para redes de sensores (SMACS), que configura la capa de enlace. El algoritmo de escucha y registro (EAR) permite a los nodos sensores móviles interconectar nodos estacionarios.

SMACS actúa al crear la red detectando los nodos vecinos usando transferencia de mensajes. En SMACS, un canal se define con un par de intervalos de tiempo. La detección de vecinos y la asignación de canales se combinan en una fase, para que cuando los nodos vayan a escuchar a sus vecinos, ya hayan formado una red conectada. No hay jerarquías asumidas en SMACS y por esto se forma una topología llana. El algoritmo EAR tiene el problema del control de la movilidad cuando se introducen nodos móviles en la red.

Capa de red: el encaminamiento en las WSN es bastante similar al de los protocolos *ad hoc* en las redes *MANETS*. La diferencia es que en los algoritmos de enrutamiento *ad hoc*, el consumo de potencia es secundario. En redes Bluetooth, las comunicaciones de un nodo master con siete esclavos definen un piconet. Cuando los piconets están interconectados para formar redes dispersas, las diferentes topologías limitan a los nodos que las forman. Para una WSN con la posibilidad de una gran cantidad de nodos, estas restricciones no pueden ser.

La capa red de redes de sensores normalmente se diseña según los principios siguientes:

- La eficacia de potencia siempre es una consideración importante.
- Rutas que consuman la mínima energía.
- Rutas con el mínimo número de saltos.
- Rutas en las que la mínima potencia disponible es la máxima entre todos los demás caminos.

Otra función importante de la capa red es proporcionar a las redes externas *internetworking* (interconexión de tecnologías diferentes) con otras redes de sensores.

Capa de transporte: la necesidad de una capa de transporte radica en que las WSN necesitan ser conectadas a una red más grande, como Internet. Las WSN se conectan a Internet por medio de pasarelas. El protocolo de la capa de transporte que conecta el usuario con la pasarela podría ser TCP o UDP, ya existentes.

Sin embargo, el protocolo que conecta la pasarela y los nodos sensores tendría que ser diferente, ya que no hay un esquema de direccionamiento global en una red de sensores.

Capa de aplicación: los nodos sensores tienen muchas aplicaciones distintas. Diseñar una capa de aplicación tiene el mérito de que las WSN pueden ser conectadas a grandes redes como Internet. El direccionamiento de nodos es una cuestión importante aquí ya que poseen un identificador global como en otras redes.

Principalmente se usan dos protocolos para la capa de aplicación que son: Protocolo de Administración de Sensores (SMP) y el Protocolo de Petición de Sensores y Entrega de Datos (SQDDP). El SQDDP introduce una interfaz de peticiones para emitir peticiones, responderlas y recopilar las respuestas de las peticiones.

## **2.5. Estándares inalámbricos industriales**

Existen varios estándares en los que se basan las WSN que a pesar de sus diferencias todos trabajan en la misma banda de frecuencias ISM. Industrial, Scientific and Medical por sus siglas en inglés, son bandas reservadas internacionalmente para uso no comercial de radiofrecuencia electromagnética en áreas industrial, científica y médica.

Existen varias normas que se utilizan para el desarrollo de redes de sensores inalámbricos. El IEEE se centra en las capas físicas y MAC, la Internet Engineering Task Force (IETF) trabaja en las capas 3 y superiores. Además de estos, los organismos como la Sociedad Internacional para la Automatización (ISA) y la Fundación Hart ofrecen soluciones verticales, que abarcan todas las capas de protocolo.

Aunque existen varias soluciones como: ISA100, WirelessHART, y ZigBee. Todas se basan en el estándar de IEEE 802.15.4.

### **2.5.1. IEEE 802.15.4**

IEEE (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos) 802.15.4 es un estándar que define el nivel físico y el control de acceso al medio de redes inalámbricas de área personal con tasas bajas de transmisión de datos (Low-

Rate Wireless Personal Area Network, LR-WPAN). El grupo de trabajo IEEE 802.15 es el responsable de su desarrollo. También es la base sobre la que se define la especificación de ZigBee, cuyo propósito es ofrecer una solución completa para este tipo de redes construyendo los niveles superiores de la pila de protocolos que el estándar no cubre.

El propósito del estándar es definir los niveles de red básicos para dar servicio a un tipo específico de red inalámbrica de área personal (WPAN), centrada en la habilitación de comunicación entre dispositivos distribuidos con bajo coste y velocidad (en contraste con esfuerzos más orientados directamente a los usuarios medios, como WiFi). Se enfatiza el bajo coste de comunicación con nodos cercanos y sin infraestructura o con muy poca, para favorecer aún más el bajo consumo.

Los dispositivos se relacionan entre sí a través de una red inalámbrica sencilla. La definición de los niveles se basa en el modelo OSI.

El nivel físico provee el servicio de transmisión de datos sobre el medio físico propiamente dicho, así como la interfaz con la entidad de gestión del nivel físico, por medio de la cual se puede acceder a todos los servicios de gestión del nivel y mantener una base de datos con información de redes de área personal relacionadas. De esta forma, el nivel físico controla el transceptor de radiofrecuencia y realiza la selección de canales junto con el control de consumo y de la señal. Opera en una de tres posibles bandas de frecuencia de uso no regulado.

- 868-868,8 MHz: Europa, permite un canal de comunicación (versión de 2003), extendido a tres en la revisión de 2006.

- 902-928 MHz: Norte América, hasta diez canales (2003) extendidos a treinta (2006).
- 2400-2483,5 MHz: uso en todo el mundo, hasta dieciséis canales (2003, 2006).

El estándar define dos tipos de nodo en la red. El primero es el dispositivo de funcionalidad completa (Full Function Device, FFD). Puede funcionar como coordinador de una red de área personal (PAN) o como un nodo normal. Implementa un modelo general de comunicación que le permite establecer un intercambio con cualquier otro dispositivo. Puede además, encaminar mensajes, en cuyo caso se le denomina coordinador (coordinador de la PAN si es el responsable de toda la red y no sólo de su entorno).

Contra puestos a estos están los dispositivos de funcionalidad reducida (Reduced Function Device, RFD). Se plantean como dispositivos muy sencillos con recursos y necesidades de comunicación muy limitadas. Por ello, sólo pueden comunicarse con FFD's y nunca pueden ser coordinadores. Las redes de nodos pueden construirse como redes punto a punto o en estrella. En cualquier caso, toda red necesita al menos un FFD que actúe como su coordinador.

### **2.5.2. ZIGBEE**

ZigBee es el nombre de la especificación de un conjunto de protocolos de alto nivel de comunicación inalámbrica para su utilización con radio difusión digital de bajo consumo, basada en el estándar IEEE 802.15.4 de redes inalámbricas de área personal. Su objetivo son las aplicaciones que requieren comunicaciones seguras con baja tasa de envío de datos y maximización de la vida útil de sus baterías.

Sus características son las siguientes:

- Su bajo consumo.
- Su topología de red en malla.
- Su fácil integración (se pueden fabricar nodos con muy poca electrónica).

ZigBee utiliza la banda ISM para usos industriales, científicos y médicos; en concreto, 868 MHz en Europa, 915 en Estados Unidos y 2,4 GHz en todo el mundo. Sin embargo, a la hora de diseñar dispositivos, las empresas optan prácticamente siempre por la banda de 2,4 GHz, por ser libre en todo el mundo.

Los protocolos ZigBee están definidos para su uso en aplicaciones con requerimientos muy bajos de transmisión de datos y consumo energético. Se pretende su uso en aplicaciones de propósito general con características auto organizativas y de bajo costo (redes en malla). Puede utilizarse para realizar control industrial, albergar sensores, recolectar datos médicos, ejercer labores de detección de humo, intrusos o domótica. La red en su conjunto utiliza una cantidad muy pequeña de energía de forma que cada dispositivo individual pueda tener una autonomía de hasta 5 años antes de necesitar un recambio en su sistema de alimentación.

Se definen tres tipos de dispositivo ZigBee según su papel en la red:

- Coordinador ZigBee (ZigBee Coordinator, ZC): dispositivo más completo, debe existir uno por red. Sus funciones son las de encargarse de controlar la red y los caminos que deben seguir los dispositivos para conectarse entre ellos.

- *Router ZigBee* (ZigBee Router, ZR): interconecta dispositivos separados en la topología de la red, además de ofrecer un nivel de aplicación para la ejecución de código de usuario.
- Dispositivo final ZigBee (ZigBee End Device, ZED): posee la funcionalidad necesaria para comunicarse con su nodo padre (el coordinador o un *router*), pero no puede transmitir información destinada a otros dispositivos. De esta forma, este tipo de nodo puede estar dormido la mayor parte del tiempo, aumentando la vida media de sus baterías. Un ZED tiene requerimientos mínimos de memoria y es por tanto significativamente más barato.

Basándose en su funcionalidad, puede plantearse una segunda clasificación:

- Dispositivo de funcionalidad completa (FFD): también conocidos como nodo activo. Es capaz de recibir mensajes en formato 802.15.4. Gracias a la memoria adicional y a la capacidad de computar, puede funcionar como Coordinador o *Router ZigBee*, o puede ser usado en dispositivos de red que actúen de interface con los usuarios.
- Dispositivo de funcionalidad reducida (RFD): también conocido como nodo pasivo. Tiene capacidad y funcionalidad limitadas (especificada en el estándar) con el objetivo de conseguir un bajo coste y una gran simplicidad. Básicamente, son los sensores/actuadores de la red.

Un nodo ZigBee (tanto activo como pasivo) reduce su consumo gracias a que puede permanecer dormido la mayor parte del tiempo (incluso muchos días seguidos). Cuando se requiere su uso, el nodo ZigBee es capaz de despertar

en un tiempo mínimo, para volverse a dormir cuando deje de ser requerido. Un nodo cualquiera despierta en aproximadamente 15 ms.

### **2.5.3. ISA 100.11a**

ISA 100.11a, estándar abierto para sistemas inalámbricos en la automatización industrial. Según ISA, la norma define el conjunto de protocolos, gestión del sistema, *gateway* y las especificaciones de seguridad para conexiones inalámbricas con una baja transmisión de datos en dispositivos fijos o portátiles que consumen poca energía.

ISA100.11a tiene por objetivo proporcionar una operación inalámbrica fiable y segura para un monitoreo no crítico, alertas, supervisión de controles y el control de aplicaciones de lazo abierto y lazo cerrado.

Las aplicaciones se centran en las necesidades de rendimiento, tales como la vigilancia y el control del proceso donde la latencia de 100ms o menos pueda ser tolerada. Para satisfacer las necesidades de los usuarios y operadores industriales inalámbricos, el ISA 100.11a proporciona robustez en presencia de interferencia que se encuentran en los entornos industriales.

La norma aborda la coexistencia con otros dispositivos inalámbricos previstos en el espacio de trabajo industrial, como los teléfonos celulares y dispositivos basados en el estándar IEEE802.11x, IEEE802.15x, IEEE802.16x y otras normas pertinentes.

Los dispositivos que forman parte de la red inalámbrica son:

- Dispositivos de Entrada / Salida: dispositivo que proporciona o utiliza datos de control. El único propósito en las aplicaciones de control es recoger y entregar los datos.
- *Router*: dispositivo que puede enrutar los mensajes a la capa de enlace y la capa de red definida por la Norma ISA 100.11a. Una vez el dispositivo se encuentra asociado, se puede comunicar desde la capa de aplicación con el *router* y puede entregar los paquetes que se transmitirá en la capa de enlace o en la capa de red.
- Aprovisionamiento: dispositivo que puede autenticar otros dispositivos y les suministra la información necesaria para empezar con la transmisión de datos. El dispositivo de aprovisionamiento utiliza el servicio de administrador de seguridad para autenticar otros dispositivos.
- *Backbone router*: dispositivo que puede enrutar paquetes ISA 100.11a sobre una infraestructura de red tradicional (por ejemplo IPv4/IPv6).
- *Gateway*: dispositivo que tiene acceso al control / detección de dispositivos dentro la red industrial ISA 100.11a y que es capaz de traducir protocolos de aplicación industrial a otros protocolos de aplicación en la red de la planta.
- Administrador de Sistema: dispositivo que se encarga de la administración y configuración de la información de los dispositivos que se encuentran en una red ISA100.11a.

- *Security Manager*: funciona en conjunto con el administrador del sistema y los sistemas de seguridad externa que proporciona una seguridad funcional, como la autenticación de dispositivos.

#### **2.5.4. WISA**

Interface inalámbrica para sensores y actuadores en aplicaciones industriales, se basa en la capa física del estándar IEEE 802.15.1 para la automatización de la industria, en tiempo real en una comunicación a nivel de campo. El objetivo de WISA es llenar los espacios vacíos que dejan otras tecnologías por sus características limitadas como Zigbee y WLAN.

La tecnología es muy fiable y ofrece tiempos de respuesta cortos. Facilita la comunicación entre cientos de dispositivos en un sistema y ofrece una transmisión fiable incluso en zonas donde la transmisión se deteriora debido a obstáculos o interferencias.

El sistema también funciona como un *gateway* con Profibus DP e interfaces CANopen para la comunicación con los módulos inalámbricos I / O. Trabajando dentro de la banda de 2,4 GHz (banda ISM).

Dentro de la red cada estación base, o módulo de E / S, soporta 120 sensores o actuadores en un rango de 5 m. La estación base funciona en modo dúplex completo, usando cinco canales simultáneos de comunicación RF. Hasta tres estaciones base pueden estar localizadas dentro de una zona de 6 x 6 x 3 metros cúbicos. El protocolo le asigna a cada sensor o actuador una ranura de tiempo específica y la frecuencia para su transmisión. Esto, combinado con salto de frecuencia, evita las colisiones.

La característica más inusual del sistema es la forma en que los nodos inalámbricos individuales reciben su energía para funcionar. La energía es suministrada por el acoplamiento electromagnético, como un transformador gigante sin núcleo de hierro. Los nodos están rodeadas por los bucles primarios en una zona (típicamente máxima) 6m x 6m x3m que forma una caja en la que se produce un campo de 120 kHz. Esto induce corriente en pequeñas bobinas secundarias en los sensores y actuadores. La cantidad de energía inducida de esta manera varía de 10 a 100 mW. El nodo consume 1mA de corriente cuando está en reposo y 45mA durante la transmisión/recepción.

### **2.5.5. OneWireless**

OneWireless es una red robusta de tipo industrial, que soporta múltiples protocolos inalámbricos y aplicaciones simultáneas. La red OneWireless está formada con nodos de comunicación mutli-protocolo, llamado multinodes, que crean una gestionada, segura y redundante red tipo malla.

Esta red es simple para gestionar, operar y darle mantenimiento; eficiente gracias a su ancho de banda. Estos atributos claves ofrecen los siguientes beneficios y características:

Beneficios:

- Menor costo inicial
- Menor costo operacional
- El sistema es más seguro
- Una red más fiable
- El sistema más flexible y actualizable

### Características:

- Se basa en los estándares IEEE 802.11 a / b / g, que permite alta velocidad, auto-organización, auto-sanación de la red.
- Los instrumentos de campo ISA100.11a pueden funcionar como *routers*.
- Seguridad industrial con 128-bit de encriptación.
- Actualizaciones de *firmware* y configuración de forma inalámbrica.
- Soporte para varios protocolos.
- Diversidad de antenas para instrumentos inalámbricos, mejorando la fiabilidad y el alcance.
- Certificado para usarse en entornos peligrosos.

La red *MESH* multifuncional simplifica la implementación de múltiples aplicaciones, mantenimiento de la red y gestión de seguridad de la misma. Es una red abierta y global que permite varios protocolos basados en los estándares 802.11 y la integración coexistencia con los protocolos existentes para obtener soluciones rentables.

La red optimiza el rendimiento utilizando eficientemente el ancho de banda de ISM y permite tener una arquitectura robusta con una latencia de control y redundancia para un control inalámbrico seguro. Protege la información de la planta y garantiza la seguridad de las operaciones con un sistema de cifrado avanzado. Además, las señales de interferencia se evitan mediante el empleo del espectro ensanchado por salto de frecuencia (FHSS). Esta técnica modula la señal de datos con una señal portadora que periódicamente da "Saltos" de una frecuencia a otra a través del ancho de banda.

OneWireless comprende los siguientes componentes:

- Multinodo, punto de acceso diseñado para ampliar la red de control de procesos en la planta.
- Dispositivo de campo, punto de acceso para los equipos de campo ISA100.11a.
- OneWireless *firewall*, dispositivo de seguridad diseñado específicamente para ampliar la red de control de procesos.
- Servidor OneWireless, *hosts* de las aplicaciones necesarias para gestionar la red OneWireless.
- Administrador de dispositivos inalámbrico, administra los instrumentos de campo en la red y todos los dispositivos de campo inalámbricos, multinodos y los dispositivos de campo con un adaptador inalámbricos.

### **2.5.6. WirelessHART**

WirelessHART es una tecnología robusta que es simple de implementar. Permite a los usuarios obtener rápida y fácilmente los beneficios de la tecnología inalámbrica mientras mantiene la compatibilidad con los actuales dispositivos HART, herramientas y sistemas. Su fácil instalación y puesta en marcha le permite tener las siguientes características:

- Múltiples opciones de alimentación
- Reducción de instalación y costos de cableado
- Coexistencia con otras redes inalámbricas
- Admite las topologías estrella y malla
- Agrega dispositivos de uno en uno
- Autorganización y autocuración
- Se adapta a los cambios en la infraestructura de la planta.

Asimismo, WirelessHART también incluye varias características para proporcionar una fiabilidad cerca del 100% en todos los ambientes industriales.

- Los radios cumplen con los estándares IEEE 802.15.4-2006.
- Trabaja en la banda 2,4 GHz.
- "Saltos" a través de los canales para evitar interferencias.
- Ofrece alta fiabilidad en entornos de radio desafiantes.
- Pruebas de canal para encontrar los canales disponibles.
- Evita canales de uso frecuente.
- Optimiza el ancho de banda y los tiempos de transmisión.
- Ajusta las vías de comunicación para un rendimiento óptimo.
- Monitorea rutas en busca de degradación para la reparación de sí misma.
- Encuentra rutas alternativas alrededor de obstrucciones.

Además, emplea medidas de seguridad robustas para proteger la red y asegurar los datos en todo momento. Estas medidas incluyen las últimas técnicas de seguridad para proporcionar el máximo nivel de protección disponible.

- Seguridad robusta, de varios niveles.
- Estándar industrial de cifrado 128-bit AES.
- Clave de cifrado única para cada mensaje.
- Integridad de datos y autenticación de dispositivos.
- Potencia de transmisión ajustable.
- Múltiples niveles de claves de seguridad para el acceso.
- Indicación de intentos de acceso fallidos.
- Informes de errores de integridad de los mensajes.

- Informes de errores de autenticación.
- Seguro de ataques por Wi-Fi.

Este protocolo de red de malla inalámbrica de comunicaciones es utilizado para aplicaciones de automatización de procesos. Cada red WirelessHART incluye los siguientes elementos:

- Los dispositivos de campo inalámbricos conectados al proceso o equipos en la planta. Este dispositivo puede ser un dispositivo con WirelessHART de fábrica o un dispositivo HART normal que se puede habilitar por medio de un adaptador WirelessHART.
- *Gateways*, dispositivo que proporciona la conexión de la red principal WirelessHART a las principales interfaces como, *host*, MODBUS, Profibus-DP, Ethernet entre otros.
- Un administrador de red, es responsable de la configuración de la red, la programación de las comunicaciones entre dispositivos, administrar rutas de mensajes y vigilancia de la salud de la red.
- Adaptador, es un dispositivo que se conecta a un instrumento HART para pasar los datos a través de una red WirelessHART al *host*. El adaptador puede ser ubicado a lo largo del cable de 4-20mA, puede ser alimentado por una batería o puede obtener su energía del cable 4-20mA.

La red se basa en el estándar IEEE 802.15.4 que funciona en la banda de 2,4 GHz ISM. Los radios emplean la tecnología de espectro ensanchado por secuencia directa y salto de canal para la seguridad y fiabilidad de la

comunicación, así como TDMA sincronizados, que controlan la latencia de comunicación entre los dispositivos de la red.

Cada dispositivo en la red de malla puede servir como un *router* para los mensajes procedentes de otros dispositivos. En otras palabras, un dispositivo no necesariamente tiene comunicación directa con el *gateway*, sólo transmitirá el mensaje al dispositivo más cercano. Esto amplía el alcance de la red y proporciona rutas de comunicación redundantes para aumentar la fiabilidad. El administrador de red determina las rutas redundantes basándose en latencia, eficiencia y fiabilidad. Para asegurar que las rutas redundantes permanezcan abiertas y despejadas.

La tecnología WirelessHART complementa la instrumentación cableada en lugar de sustituirla, mediante la conexión de un adaptador WirelessHART a un dispositivo existente. Los datos HART se transmiten a un *gateway* WirelessHART y a un sistema de control.

Así también, proporciona una interoperabilidad con los dispositivos. Esto significa que los usuarios pueden seleccionar los mejores dispositivos WirelessHART independientemente del fabricante, con la seguridad de que los dispositivos podrán trabajar juntos y ser sustituido por otro sin perder funcionalidad.

## **2.6. Tecnologías inalámbricas según fabricantes**

En el mercado actual existen varios fabricantes de tecnología inalámbrica, destinada a la medición de variables en diferentes industrias. Esta tecnología puede que ya venga integrada con el sensor o que sea un adaptador que le

proporciona comunicación inalámbrica a un sensor estándar para comunicarse con el sistema de control

A continuación, se presentan los dispositivos para WSN de 5 de los fabricantes más utilizados por la empresa:

- Endress+Hausser
- Emerson
- Siemens
- Vega
- Honeywell

Las tablas con las especificaciones se presentan en la siguiente página.

Tabla XIII. **Tecnología inalámbrica Endress+Hausser**

<b>Endress+Hausser</b>		
<b>Tipo</b>	<b>Adaptador Wireless</b>	<b>Gateway</b>
<b>Modelo</b>	SWA70	SWG70
<b>Alimentación</b>	5 - 7.2 Vdc	20 - 30 Vdc
<b>Frecuencia</b>	2.4 GHz	2.4 GHz
<b>Alcance</b>	250 m exterior, 50 m interior	250 m exterior, 50 m interior
<b>Antena</b>	Dipolo Omnidireccional, posición ajustable en el plano vertical	Dipolo omnidireccional
<b>Potencia antena</b>	10 dBm max	10 dBm max
<b>Entradas</b>	4 -20 mA/HART	WirelessHART
<b>Transmission rate</b>	1200 bits/s	250 kBits/s
<b>Salidas</b>	WirelessHART	Ethernet, configurable para HART IP y MODBUS TCP y RS485
<b>Transmission rate</b>	250 kBits/s	100 Mbits

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Tecnología inalámbrica Emerson**

<b>EMERSON</b>		
<b>Tipo</b>	<b>Adaptador Wireless</b>	<b>Gateway</b>
<b>Modelo</b>	Smart Wireless THUM	Smart Wireless Gateway
<b>Alimentación</b>	24 Vdc, del mismo lazo HART	10.5 - 30 Vdc
<b>Frecuencia</b>	2.4 GHz	2.4 GHz
<b>Alcance</b>	228 m max línea vista	228 m max línea vista
<b>Antena</b>	Omnidireccional	Omnidireccional
<b>Potencia antena</b>	10 dBm	10 dBm
<b>Entradas</b>	HART 2 o 4 hilos	WirelessHART
<b>Transmission rate</b>	1200 bits/s	250 kBits/s
<b>Salidas</b>	WirelessHART	Ethernet, MODBUS y RS485
<b>Transmission rate</b>	250 kBits/s	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Tecnología inalámbrica Siemens**

<b>SIEMENS</b>		
<b>Tipo</b>	Adaptador Wireless	Gateway Wireless
<b>Modelo</b>	SITRANS AW200	IE/WSN-PA Link
<b>Alimentación</b>	Bateria 5 - 7.2 V, alimentado por algun dispositivo de campo o fuente externa 30Vdc	24 Vdc
<b>Frecuencia</b>	2.4 GHz	2.4 GHz
<b>Alcance</b>	250 m	100 m
<b>Antena</b>	Dipolar omnidireccional	Omnidireccional
<b>Potencia antena</b>	10 dBm	10 dBm
<b>Entradas</b>	4 - 20 mA/HART	WirelessHART
<b>Transmission rate</b>	1200 bits/s	250 Kbits/s
<b>Salidas</b>	WirelessHART	Ethernet y MODBUS
<b>Transmission rate</b>	250 Kbits/s	10/100 Mbps, hasta 9600 bps

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Tecnología inalámbrica Vega**

<b>VEGA</b>		
<b>Tipo</b>	Transmisor Wireless	Receptor Wireless
<b>Modelo</b>	PLISCRADIO T62	PLISCRADIO R62
<b>Alimentación</b>	24 Vdc, 115/230 Vac	24 Vdc, 115/230 Vac
<b>Frecuencia</b>	2.4 GHz estándar, 920 MHz max	2.4 GHz estándar, 920 MHz max
<b>Alcance</b>	1 Km estándar, 1.6 Km max en línea vista	1 Km estándar, 1.6 Km max en línea vista
<b>Antena</b>	Omnidireccional	Omnidireccional
<b>Potencia antena</b>	15 dBm/ 19 dBm	15 dBm/ 19 dBm
<b>Entradas</b>	4 - 20 mA/HART, estados digitales	WirelessHART
<b>Transmission rate</b>		250 kBits/s
<b>Salidas</b>	WirelessHART	Salida digital PLISCRADIO C62 protocolo VEGA
<b>Transmission rate</b>	250 kBits/s	

Fuente: elaboración propia

Tabla XVII. **Interfaz para PLICSRADIO R62**

<b>VEGA</b>	
<b>Tipo</b>	Interfaz para R62
<b>Modelo</b>	PLICSRADIO C62
<b>Alimentación</b>	20 - 253 Vac, 20 -253 Vdc
<b>Frecuencia</b>	
<b>Alcance</b>	
<b>Antena</b>	
<b>Potencia antena</b>	
<b>Entradas</b>	Entrada digital protocolo VEGA
<b>Transmission rate</b>	
<b>Salidas</b>	3 salidas de rele, 3 salidas 4 - 20 mA, 1 Ethernet y 1 RS233
<b>Transmission rate</b>	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Tecnología inalámbrica Honeywell**

<b>HONEYWELL</b>		
<b>Tipo</b>	Transmisor Wireless	Receptor Wireless
<b>Modelo</b>	XYR 5000 WI55x	XYR 5000 WBR/H
<b>Alimentación</b>	Batería de litio tamaño C 3.6 V	24 Vdc
<b>Frecuencia</b>	902 - 928 MHz	902 - 928 MHz
<b>Alcance</b>	2000 ft, 5000 ft con Yagi	2000 ft, 5000 ft
<b>Antena</b>	Omnidireccional, 1/4 de onda. Yagi direccional polarización vertical	Omnidireccional, 1/2 longitud de onda. Omnidireccional remota
<b>Potencia antena</b>	17.8 mW - 31 mW	17.8 mW - 31 mW
<b>Entradas</b>	2 entradas 4 - 20 mA	OneWireless
<b>Transmission rate</b>		250 Kbps
<b>Salidas</b>	OneWireless	4 - 20 mA, MODBUS
<b>Transmission rate</b>	250 Kbps	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. Tecnología inalámbrica Honeywell

<b>HONEYWELL</b>			
<b>Tipo</b>	Transmisor Wireless	Transmisor Wireless	Receptor Wireless
<b>Modelo</b>	XYR 6000 STIW600	XYR 6000 OWA 100	XYR 6000 WNMN
<b>Alimentación</b>	Batería 3.6 V LiSOC12 tamaño D, 24 Vdc	Batería 3.6 V LiSOC12 tamaño D	24 Vdc
<b>Frecuencia</b>	2.4 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz
<b>Alcance</b>	1000 ft	1000 ft	2000 ft
<b>Antena</b>	Monopolo omnidireccional, Parabólica direccional antena remota	Monopolo omnidireccional	Monopolo omnidireccional
<b>Potencia antena</b>	20.9 dBm max dependiendo de la locación	20.9 dBm max dependiendo de la locación	19 dBm transmision, -98 dBm sensibilidad
<b>Entradas</b>	0 - 5 V, 1 - 5 V, 0 - 20 mA, 4 - 20 mA	4 - 20 mA HART 2 o 4 hilos	OneWireless
<b>Transmission rate</b>		1200 bits/s	250 Kbps
<b>Salidas</b>	OneWireless	OneWireless	MODBUS, OPC o HART
<b>Transmission rate</b>	250 Kbps	250 Kbps	

Fuente: elaboración propia.



### **3. DCS, ANÁLISIS DE VARIABLES**

#### **3.1. Control de procesos**

Anteriormente, los procesos industriales eran totalmente controlados manualmente por un operador. El operador observaba lo que sucedía con las diferentes variables de proceso tales como presión, temperatura, flujo y nivel, para luego, basado en su propia experiencia hacer los ajustes necesarios. Sin embargo, el operador solo podía ajustar las variables de proceso que quedaban a su alcance, limitando la complejidad de las estrategias de control y la eficacia del proceso.

El desarrollo de los dispositivos de control neumático y los dispositivos de control electrónico análogo, permitieron un notable avance en el control de procesos. Siendo los análogos los que ofrecen mayores beneficios, con más precisión, rapidez y fácil integración.

Actualmente, el control automático es de vital importancia en los procesos industriales. Los beneficios que se obtienen con un buen control son considerables, entre los cuales sobresalen; mayor disponibilidad de la planta, menor variabilidad en los procesos, productos de mejor calidad, menor consumo de energía, minimización de desechos, mayores niveles de seguridad y mejores utilidades para las compañías.

### 3.1.1. Estrategias de control

En general las industrias han desarrollado varios tipos de controles para sus procesos que van desde un simple control de nivel, presión, temperatura, entre otros, hasta controles complejos que requieren equipos y software sofisticados. Estas estrategias deben de ser capaces de responder a los cambios repentinos en el proceso. Siendo un controlador el que tome las decisiones que afectaran las variables del proceso.

Entre los elementos de control podemos encontrar:

- Transmisores: captan la señal del proceso y la transforma a una señal neumática o eléctrica para enviarla al controlador.
- Controlador: dispositivo programable, que detecta desvíos existentes entre la variable de referencia y la variable medida para determinar la existencia de un error. Y que basándose en su algoritmo de control, emite una señal de corrección al actuador para disminuir dicho desvío.
- Actuadores: instrumento de campo que recibe instrucciones del controlador con el fin de alcanzar el valor deseado.
- Variable de referencia: variable deseada o *set-point*. Valor al cual se desea llevar la variable controlada.
- Variable medida: variable que se desea monitorear y registrar pero no necesariamente controlar.

- Variable controlada: parámetro que se busca mantener constante o con el menor cambio.
- Variable manipulada: es el medio por el cual se debe corregir el efecto de las perturbaciones y sobre ella se colocará el actuador.
- Variable de salida: variables que caracterizan el estado de los procesos dentro de la planta, estas variables son guiadas por variables controladas.
- Perturbaciones: acciones que no dependen del sistema de control ni del operario, pero si intervienen ya sea positiva o negativamente en el proceso.

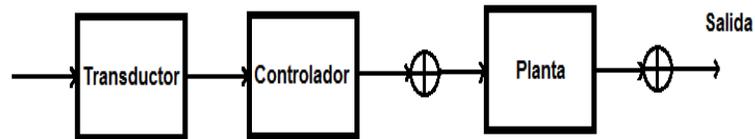
### **3.1.2. Lazos de control**

Los sistemas o estrategias de control desarrolladas en la industria, dependen de si existe o no una relación entre la variable medida y la controlada. A esta relación se le denomina lazo de control. De modo que para calcular la acción de control de un sistema se debe de conocer qué tipo de lazo utiliza, si es lazo abierto o lazo cerrado.

#### **3.1.2.1. Lazo de control abierto**

Sistema que carece de la medición constante de la salida del proceso (sistema no realimentado), de modo que se desconoce la magnitud del error al momento de existir una perturbación y por lo tanto no se puede corregir.

Figura 39. **Lazo de control abierto**

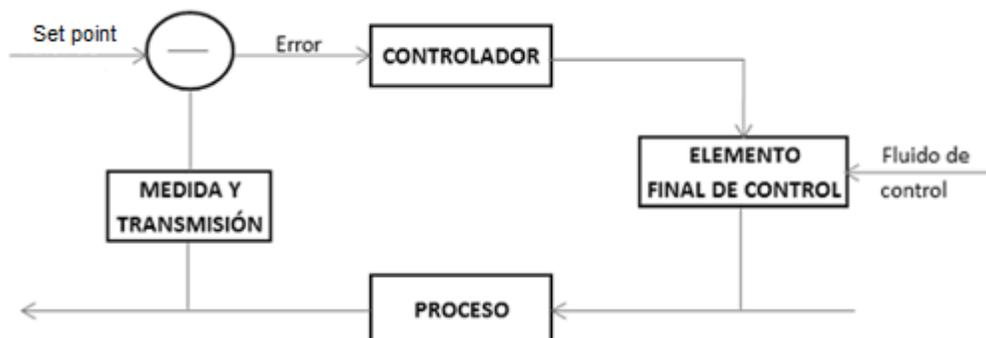


Fuente: elaboración propia.

### 3.1.2.2. **Lazo de control cerrado**

Sistema realimentado en el cual la salida del proceso se monitorea constantemente, para determinar una variación que comparada con el *set-point*, genera una diferencia (error). De modo que conociendo la magnitud del error el controlador toma decisiones, para darle instrucciones al elemento final de control con el objetivo de corregir dicha variación.

Figura 40. **Lazo de control cerrado**



Fuente: RIAÑO, Diana Alejandra. Integración en redes de instrumentación digitales en sistemas de control. p. 16.

En este sistema se puede presentar dos tipos de realimentación, la positiva y la negativa. Sin embargo, la realimentación negativa es la más utilizada en el campo de control de los procesos industriales.

A continuación se listan controles que utilizan combinaciones básicas de controles con retroalimentación:

- De dos posiciones *On-Off* (todo o nada): en este tipo de regulación, la válvula de control adopta únicamente dos posiciones abierta o cerrada, para un valor único de la variable controlada, su ciclo es continuo y funciona satisfactoriamente cuando el proceso tiene una velocidad de reacción lenta y posee un tiempo de retardo mínimo.
- Control proporcional de tiempo variable: la relación del tiempo de conexión al de desconexión final es proporcional al valor de la variable controlada.
- Control proporcional: existe una relación lineal continua entre el valor de la variable controlada y la posición del elemento final de control (dentro de la banda de control proporcional). Es decir, la válvula se mueve al mismo valor por cada unidad de desviación. La banda proporcional es el porcentaje del campo de medida de la variable que la válvula necesita para cerrarse o abrirse.
- Control integral: el control proporcional tiene un inconveniente y es que la variable del proceso frecuentemente se desvía del punto de referencia, es decir, toma en cuenta la magnitud y el signo del error, pero no por cuanto tiempo ha existido o con que velocidad cambia este error. El

control integral calcula el área bajo la curva del error, dependiendo del valor de esa área, el control proporcional es verificado y ajustado las veces que sea necesario hasta que el estado de la variable controlada alcance el *set-point*. Es decir que la acción integral responde a la duración del error.

- Control derivativo: este tipo de control por sí solo no puede ser utilizado y necesita trabajar en conjunto al proporcional e integral, la acción derivativa genera una respuesta proporcional a la derivada del error (velocidad de cambio del error). Añadiendo esta acción de control a las anteriores, se elimina el exceso de oscilaciones.
- Control proporcional, integral y derivativo: la unión en un controlador de las tres acciones PID forma un instrumento controlador que presenta las siguientes características:

Acción proporcional, cambia la posición de la válvula proporcionalmente a la desviación de la variable con respecto al punto de consigna. La señal P mueve la válvula siguiendo fielmente los cambios multiplicados por la ganancia.

Acción integral, mueve la válvula a una velocidad proporcional a la desviación con respecto al punto de ajuste. La señal integral va sumando las áreas de diferencia entre la variable y el punto de consigna.

Acción derivativa, corrige la posición de la válvula proporcionalmente a la velocidad de cambio de la variable controlada. La señal derivativa es la pendiente de la curva descrita por la variable con lo que anticipa la posición de la válvula en el tiempo debido a la acción proporcional.

La señal que llega a la válvula de control es en todo momento la suma de cada una de las señales de las acciones proporcional, integral y derivativa del controlador.

Lo anterior se resume en dos características importantes que tiene que considerarse al momento de implementar una estrategia de control:

- Los cambios en la variable controlada, debido a alteraciones en las condiciones del proceso.
- El tiempo necesario para que la variable de proceso alcance un nuevo valor al ocurrir un cambio de carga. Este tiempo de retardo se debe a una o varias propiedades físicas del proceso.

### **3.2. Controladores**

Las estrategias de control antes mencionadas pueden ser ejecutadas por una persona como se hacía en la antigüedad. Sin embargo, por la complejidad que han tomado los procesos actualmente se utilizan equipos como PLC (controlador lógico programable), SCADA (supervisión, control y adquisición de datos) o DCS (sistema de control distribuido), que ofrecen un alto desempeño en el control de procesos.

Sin embargo, los sistemas de control informáticos como los son SCADA y DCS, permiten desarrollar estrategias de control mucho más complejas que un PLC. Por lo tanto los sistemas de control informático se consideran más completos.

### 3.2.1. Controlador por computadora

Un sistema de control informático depende tanto del software como del hardware para el control de un proceso. Este controlador recibe información de sistemas de medidas, la información se procesa y genera señales de mando a actuadores, de manera que el proceso se desarrolle según las directrices de optimización elegidas. Asimismo, almacena información recibida desde la planta y la presenta en un formato fácilmente comprensible.

El empleo de un sistema informático, en vez de controladores de electrónica analógica, posee la ventaja de poder implementar algoritmos de control más complejos y eficaces.

Los objetivos principales son:

- Proporcionar información en tiempo real sobre el proceso
- Controlar las variables de interés
- Optimizar el rendimiento del proceso

El esquema de control está compuesto por los siguientes elementos:

- Controlador
- Sistemas de medidas
- Actuadores

Controlador: controlador informático (servidor o computadora) donde se ejecuta el algoritmo de programación. Este algoritmo contiene toda la lógica del proceso así como las condiciones con las que tiene que trabajar el sistema y sus consignas (*set-point*).

Sistemas de medidas: proporcionan información en tiempo real sobre el proceso. Esta información está compuesta por variables de proceso, como temperaturas, niveles, caudales, entre otros, que son captadas por los sensores correspondientes y por el estado de la maquinaria (marcha, paro, consumos, etc.)

Actuadores: permiten ajustar los valores de las variables del proceso, según las consignas marcadas por el operario o por el propio sistema de control. Los actuadores habituales son:

- Controladores de marcha/paro de la maquinaria.
- Variadores de frecuencia, que controlan la velocidad de los motores que accionan las bombas de impulsión y tornillos.
- Válvulas motorizadas y neumáticas, que permiten el control de los caudales de agua y su temperatura.

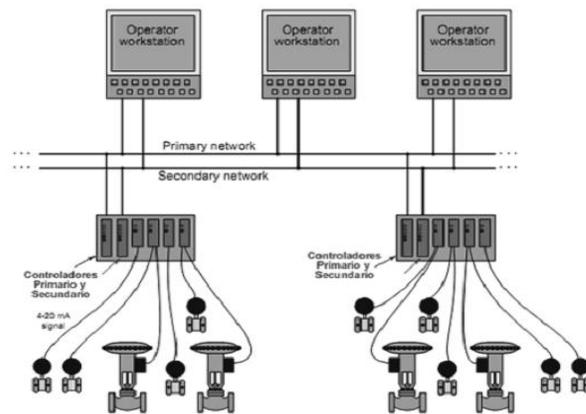
### **3.2.2. Sistema de control distribuido DCS**

Los sistemas de control distribuido son sistemas utilizados para el control de pequeñas o grandes plantas de proceso fundamentalmente de tipo continuo, es decir, que están controlando los procesos constantemente a través de un fuerte componente informático.

Los DCS fueron construidos principalmente como remplazos para la instrumentación electrónica de panel. Su desarrollo ha permitido resolver los problemas sobre la adquisición de grandes volúmenes de información, tratamiento en centros de supervisión y la actuación en tiempo real sobre el proceso a controlar. Del mismo modo ha permitido agregar estaciones de trabajo basadas en video y controladores compartidos, capaces de manejar

complejas estrategias de control regulatorio, conteniendo información de elementos funcionales como controladores PID, totalizadores, entre otros.

Figura 41. Esquema de un DCS



Fuente: <http://www.es.scribd.com/doc/91308467/Introduccion-a-los-DCS>.

Consulta: febrero de 2013.

En este tipo de control, uno o varios controladores se encuentran repartidos en varios puntos de la planta donde están conectados a varias señales de proceso. Estos controladores se distribuyen de tal forma que están conectados entre sí a través de una vía de comunicación, la cual se comunica a la vez con el centro supervisor del control central, desde donde se tiene acceso de modo automático o manual a todas las variables de proceso de la planta.

La distribución de los controladores permite tener un orden en el cableado de las señales, dado que los cables de los instrumentos solo tienen que llegar hasta los nodos distribuidos, y no recorrer todo el camino hasta llegar a la sala de control centralizada.

El control distribuido hace uso del concepto de redundancia en su red de comunicación y en los sistemas de control industrial: donde la adquisición de señales digitales y las unidades de procesamiento están equipadas con un repuesto, para que automáticamente tome el control de todas las funciones críticas en caso de que ocurra una falla.

Por tal motivo, una de sus principales ventajas es la seguridad y economía de funcionamiento, ya que cada controlador tiene un lazo de control de longitud pequeña, lo que lo hace menos vulnerable al ruido o a los daños; por otro lado, ante una pérdida de comunicación (redundante), los controladores continúan operando localmente. Además, ofrece al operador el acceso a todos los datos de los controladores.

#### **3.2.2.1. Características de un DCS**

Un DCS es un sistema abierto, que permite la integración con equipos de otros fabricantes que realizan funciones específicas y hace la función de canalizador de todos los datos recogidos, a través de líneas de comunicación de alta velocidad y la pone a disposición de los usuarios de la planta.

El sistema puede emplear una o varias estaciones de trabajo las cuales pueden ser configuradas a través de una estación de trabajo central o una computadora personal. La comunicación local es manejada por una red de control con cables de transmisión como pueden ser cable trenzado, coaxial o fibra óptica.

Una de las ventajas de utilizar un DCS es el desarrollo de sistemas con base en paquetes o módulos, los cuales ayudan en la fácil manipulación de la información cuando se realizan cambios tanto en hardware como en software,

puesto que con un DCS se puede realizar el aislamiento de ciertos bloques o áreas para no afectar a todo el sistema o a todos los procesos cuando se realiza la localización de averías, aumento de señales o equipos, etc.

El sistema también puede incluir un servidor o procesadores para la recolección de datos, procesamiento y generación de reportes.

Los procesadores de los DCS son usualmente programados, para realizar una rutina de autorevisión en sus componentes redundantes del sistema, para asegurar la disponibilidad de los equipos de repuesto en caso de alguna falla.

De haber una falla total en uno de los *racks* de control, solo los lazos PID de este único *rack* serán afectados. Por otro lado, si los cables de red fallan, solo el flujo de información entre estos dos puntos se dañaría, el resto del sistema continuaría comunicándose. Por lo tanto, sin importar la falla de hardware o software el impacto en el control del proceso es minimizado por el diseño.

Con la aparición del Sistema Operativo de Disco (DOS por sus siglas en inglés) como estándar, se ha dado lugar al desarrollo de paquetes de software cada vez de mayor calidad y menor costo que enriquecen las posibilidades de los DCS, incluyendo:

- Manejo de base de datos
- Paquetes de hoja de cálculo
- Capacidades de control estadístico de procesos
- Simulación de procesos
- Diseño asistido por computadora
- Manejo de pantallas orientado a objetos

Asimismo, también el desarrollo de los sistemas de red ha permitido una mayor cohesión entre el software y las comunicaciones, lográndose sistemas integrados con estándares:

- Modelos de comunicaciones OSI
- Modelo computacional cliente-servidor
- Protocolo de comunicación entre estaciones de trabajo
- Sistema de manejo de base de datos distribuidos
- Programación orientada a objetos
- Ingeniería de software asistida por computadora

Varios de los DCS modernos como el I/A Series de Invensys Foxboro utilizan computadoras de terceros, en vez de sus propias marcas como estaciones de operación. Esto aprovecha las tecnologías existentes en computadoras de trabajo y las pantallas sin sacrificar la fiabilidad del control (ya que el hardware y software de control siguen siendo del tipo industrial).

### **3.2.2.2. Arquitectura de un DCS**

Un sistema de control distribuido ofrece al usuario una comunicación fiable, disponibilidad de datos y control en tiempo real sobre el proceso; siendo sus componentes principales los siguientes:

- Estación de control de proceso o unidades de control local
- Estaciones de operador
- Estaciones de ingeniería
- Bus de planta
- Sensores/Actuadores

Unidades de control local: son una o varias cabinas que alojan fuentes de alimentación, módulos controladores, módulos de entrada/salida y regletas de conexión. Funcionalmente, en las unidades de control local es donde se realiza el control lógico y también, donde se realiza la adquisición de datos.

Estaciones de operador: son equipos autónomos con pantallas y teclados, que permiten el acceso del operador al proceso, para modificar puntos de consigna, señales de salida, arrancar secuencias y poner en marcha o parar motores. La pantalla informa al operador de las alarmas existentes, le muestra las tendencias de las variables y le presenta automáticamente informes que le ayudan a tomar las decisiones más adecuadas en cada caso.

Estaciones de ingeniería: son equipos autónomos, desde los cuales se permite la configuración y carga de la programación de control.

Bus de planta: la conexión de todo el sistema está formada por dos buses redundantes que permiten transmitir datos a alta velocidad entre unidades de control local, estaciones de operador e interfaces.

Estas son redes de comunicación orientadas al control distribuido, que integran un conjunto de protocolos enlazados entre sí y estructurados de acuerdo con el modelo OSI.

Aunque no hay un protocolo de bus de campo común en los DCS, todos convergen y usan Ethernet en la capa física y TCP/IP como mapa de transporte. Generalmente MODBUS TCP es usado como interface entre los diferentes protocolos de DCS.

Sensores/Actuadores: los sistemas DCS están conectados a sensores, actuadores y demás instrumentos de campo los cuales usan un punto de control (*set-point*) para controlar el flujo de materiales a través de la planta, haciendo que los procesos sean estables.

Todos los componentes de un sistema DCS pueden conectarse directamente con el equipo físico tal como interruptores, transmisores, bombas y válvulas o pueden trabajar a través de un sistema intermedio tal como un sistema SCADA.

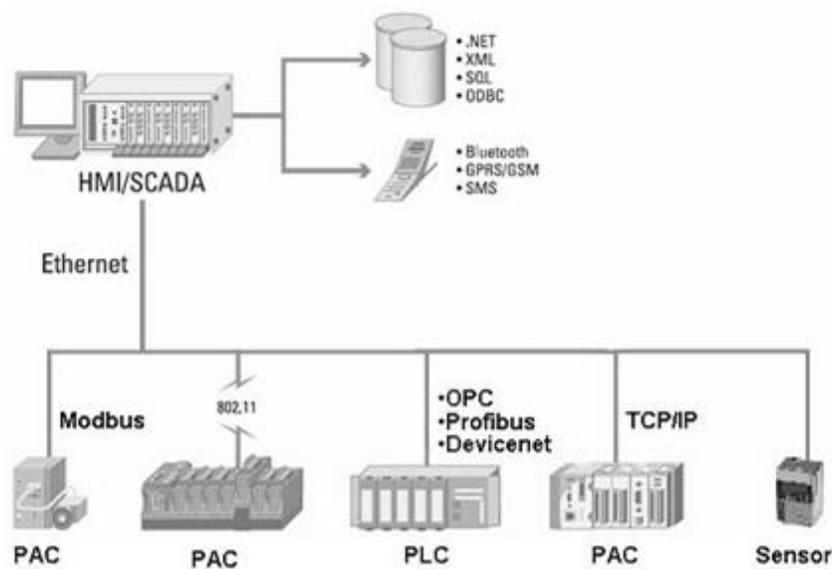
Los DCS tiene una gran variedad de aplicaciones en la industria para el control y monitoreo de la distribución de equipos como:

- Plantas de generación y distribución eléctrica
- Fábricas de procesamiento de alimentos, textiles y madera
- Sistemas de control del medio ambiente
- Fábricas de productos químicos y farmacéuticos
- Redes de sensores

### **3.2.3. Sistema SCADA**

Los sistemas SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), comprenden todas aquellas soluciones de aplicación basado en computadoras (servidores y clientes) con el fin de resolver el problema de la supervisión, captura de información de un proceso y el control a distancia de una instalación de cualquier tipo.

Figura 42. **Esquema de un sistema SCADA**



Fuente: GRANDA, Maricela; AYALA, Paul. Estudio de la factibilidad de migración de los sistemas plant scape process de honeywell en npf y del DCS Foxboro en spf a un sistema rockwell automation en el bolque 16, repsol ypf. p.10.

La información que se recopila a través de un sistema SCADA ofrece la posibilidad de realizar una serie de análisis y estudios con ayuda de técnicas estadísticas, a fin de que haya una retroalimentación sobre un operador o sobre un proceso involucrado.

Las principales funciones de un sistema SCADA son:

- Adquisición de datos: para recopilar, procesar y almacenar la información recibida de un proceso.
- Supervisión: para inspeccionar y conocer el estado de las variables de control desde un monitor.

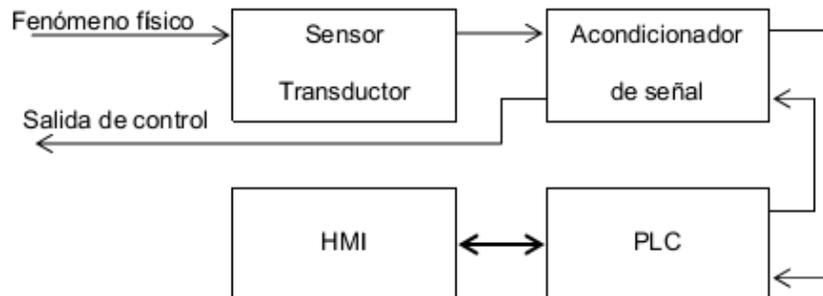
- Control: para registrar y actuar sobre el proceso remotamente mediante las salidas conectadas.

La adquisición de datos generalmente está a cargo de un PLC, el cual recopila las señales y las envía a las diferentes estaciones remotas utilizando un protocolo de comunicación determinado.

### 3.2.3.1. Elementos de un sistema SCADA

Un sistema SCADA ofrece al usuario la supervisión, información y control de un proceso a distancia de cualquier tipo, siendo sus componentes principales los siguientes:

Figura 43. Elementos de un sistema SCADA



Fuente: GRANDA, Maricela; AYALA, Paul. Estudio de la factibilidad de migración de los sistemas plant scape process de honeywell en npf y del DCS Foxboro en spf a un sistema rockwell automation en el bolque 16, repsol ypf. p.12.

Transductores: son los elementos que permiten la conversión de una señal física como puede ser nivel, presión, temperatura, flujo, entre otras, en una señal eléctrica como voltaje, corriente, resistencia o capacitancia (y

viceversa). Las señales eléctricas deben ser procesadas para que puedan ser leídas por el PLC, para ello se utilizan los acondicionadores de señal. La calibración de los transductores es de vital importancia a fin de evitar problemas de confusión con los valores de los datos.

Unidad Remota (RTU): lo constituye todo elemento encargado de leer los datos o el estado de las señales de entrada de campo y este a su vez envía algún tipo de información a la unidad central. Es parte del proceso productivo y necesariamente se encuentra ubicada en la planta.

Unidad Central (MTU): conocido como Unidad Maestra. Ejecuta las acciones de mando (programadas) con base en los valores actuales de las variables medidas. La programación se realiza por medio de bloques de programa en lenguaje de alto nivel (como C, Basic, etc.). También se encarga del almacenamiento y procesado ordenado de los datos, de forma que otra aplicación o dispositivo pueda tener acceso a ellos.

Interfaz Hombre-Máquina (HMI): es el entorno visual que brinda el sistema para que el operador se adapte y pueda monitorear y/o controlar los procesos de una planta. Permite la interacción del ser humano con los medios tecnológicos implementados. Un HMI puede tener también vínculos con una base de datos para proporcionar las tendencias, los datos de diagnóstico y manejo de la información, así como un cronograma de procedimientos de mantenimiento, información logística, esquemas detallados para un sensor o máquina en particular e incluso sistemas expertos con guía de resolución de problemas.

Sistemas de Comunicación: se encarga de la transferencia de información desde el punto mismo donde se realizan las operaciones, hasta el punto donde

se supervisa y controla el proceso. Lo conforman los transmisores, receptores y medios de comunicación.

### **3.2.3.2. Características de los sistemas SCADA**

Los sistemas SCADA ofrecen la posibilidad de crear paneles de alarma, los cuales le indican al operador algún comportamiento inusual en las estaciones remotas a fin de que ejecute o modifique algún programa que cambie el estado actual del proceso. En complemento, un sistema SCADA puede generar históricos de las señales de la planta y almacenar los históricos y/o variables en una entidad de almacenamiento o base de datos.

Facilitan la comunicación entre el operador y los equipos de una planta, puesto que las interfaces que utilizan los usuarios son muy amigables y no demandan de una gran cantidad de equipos o dispositivos.

Debido a las características antes mencionadas, para muchas aplicaciones en cuanto a automatización de proceso se refiere, el utilizar un sistema SCADA representa una ventaja económica, lo que lo convierte en un sistema flexible.

Los sistemas SCADA pueden ser aplicados en procesos en áreas extendidas, tales pueden ser:

- Pequeñas estaciones de generación hidroeléctrica.
- Fábricas de producción de aceite.
- Supervisión de ductos para gas, aceite, petróleo, químicos o agua.
- Vigilancia y control de una planta de energía nuclear.
- Sistema de tránsito masivo.

- Sistemas contra incendios.

#### **3.2.4. Diferencias entre los sistemas SCADA y DCS**

Entre los sistemas antes mencionados existen diferencias marcadas que van desde sus características hasta su aplicaciones, A continuación se detallan las diferencias más importantes entre ellos.

- En cuanto al tipo de arquitectura se refiere, los sistemas SCADA tienen una arquitectura centralizada al igual que su base de datos, lo que representa que todas las señales leídas se concentran en un solo lugar; por lo que se dice que las variables en un sistema SCADA son desacopladas, es decir que las variables no depende la una de la otra, no hay ninguna influencia entre variables; mientras que los DCS tienen una arquitectura distribuida al igual que su base de datos, lo que significa que sus datos son leídos en diferentes áreas de la planta; por lo que las variables son acopladas, es decir que la variación o el cambio de una variable actúa sobre la otra.
- El tipo de control predominante en un sistema SCADA es supervisorio, quiere decir que los lazos de control de los procesos son cerrados por un operador, adicionalmente el control es secuencial y regulatorio. En un DCS el tipo de control es regulatorio, es decir, los lazos de control son cerrados automáticamente por el sistema.
- Los sistemas SCADA son empleados en áreas geográficamente distribuidas, por lo que la adquisición de datos se lo realiza con unidades remotas y el control es a través de un PLC. Los medios de comunicación

empleados pueden ser radio, satélite, líneas telefónicas, conexión directa, LAN o WAN.

- Los DCS son empleados en áreas dentro de una planta, por lo que la adquisición de datos se lo realiza con controladores de lazo y el control es a través de un PLC. Los medios de comunicación utilizados pueden ser redes de área local o conexión directa.

### **3.3. Actuales sistemas de control**

Actualmente existen varios sistemas de control distribuido, que son compatibles con equipos y tecnologías de diferente fabricante, a continuación se presentan DCS de cinco de los proveedores más importantes de Ingeniería La Unión.

#### **3.3.1. DCS SIMATIC PCS 7 Siemens**

SIMATIC PCS 7 es un sistema de control de procesos completamente homogéneo, con una arquitectura escalable y propiedades de sistema que lo convierten en la base para la implementación rentable y la explotación económicamente racional de instalaciones de control e instrumentación.

SIMATIC PCS 7 ofrece una ampliación selectiva con funciones adicionales que se pueden integrar sin problemas; por ejemplo para la automatización de procesos por lotes, control del transporte de materiales, control avanzado de procesos, gestión de activos, aplicaciones de control remoto y de seguridad, evaluación y gestión de datos de proceso o tareas.

Es decir, SIMATIC PCS 7 ofrece mucho más que un sistema de control de procesos convencional, esto se manifiesta claramente en sus ventajas:

- Reducción del coste total de propiedad gracias a la integración.
- Alto rendimiento y calidad, de la mano de ingeniería eficiente y un alto grado de fiabilidad y disponibilidad.
- Flexibilidad y escalabilidad: desde el pequeño sistema de laboratorio hasta un gran complejo de instalaciones.
- Protección de las inversiones gracias a una modernización paulatina de los sistemas propios y de terceros.
- Safety & Security: funciones de seguridad integradas y amplia seguridad para sistemas TI.

Debido a su arquitectura modular, que está construida sobre componentes de software y hardware. Al configurar las instalaciones con SIMATIC PCS 7, estas se puede adaptar con gran flexibilidad a los distintos requerimientos de los clientes y a las diferentes dimensiones de las instalaciones y más adelante, puede además ampliar sin problemas la capacidad o cambiar la configuración para realizar modificaciones tecnológicas. SIMATIC PCS 7 es escalable, desde un pequeño sistema monopuesto con aproximadamente 160 puntos de medición, por ejemplo, la automatización de un laboratorio o una escuela de ingeniería, hasta un sistema multipuesto distribuido con una arquitectura cliente/servidor con aproximadamente 60,000 puntos de medición, para automatizar una gran planta de producción o varias instalaciones de producción de un complejo industrial. SIMATIC PCS 7 es idóneo para instalaciones de todos los tamaños.

SIMATIC PCS 7 usa consecuentemente nuevas y potentes tecnologías y estándares establecidos internacionalmente, entre otros muchos IEC, XML, PROFIBUS, tecnología Ethernet con gigabits, TCP/IP, ISA-88, ISA-95, etc.

Con su concepción orientada al futuro, la arquitectura modular y abierta basada en la tecnología más moderna de SIMATIC, el uso de estándares industriales y el alto rendimiento de las funciones de ingeniería de control integradas, el sistema de control de procesos SIMATIC PCS 7 hace posible el funcionamiento económico y rentable de las instalaciones de control de procesos, teniendo en cuenta todos los aspectos: desde la planificación, la ingeniería, la puesta en servicio, la formación y el entrenamiento, pasando por la operación, el mantenimiento y la reparación, hasta la ampliación y la renovación.

### **3.3.2. DCS DELTA V Emerson Process Management**

Es un sistema de automatización de procesos que permite la mejora de operaciones aprovechando las tecnologías predictivas de la actualidad, a través de una interfaz fácil e interoperable, permitiendo de esta forma la conexión entre personas, procesos y producción.

Este sistema está diseñado con las últimas tecnologías de software, control y comunicaciones que le permite integrar todas las capacidades de una planta inteligente, a través de protocolos abiertos como Foundation Fieldbus y Hart; Dispositivos de control discreto y análogo mediante buses AS-i, Profibus, DeviceNet y MODBUS, soporta el estándar IEC 1804-3, o EDDL (Electronic Device Description Language), que permite que todos los parámetros de un dispositivo electrónico estén accesibles al sistema.

Puede configurarse para unas pocas entradas/salidas hasta más de 30,000, puede tener conectividad con otros sistemas utilizando OPC y XML y posee técnicas avanzadas de control, como son: control difuso (fuzzy), control predictivo, sintonización de lazos PID, detección de mal funcionamiento de lazos, control estadístico multivariables, optimizador de tiempo real, monitoreo de funcionamiento de equipos, simulación y otros.

### **3.3.3. DCS FREELANCE 800F ABB**

Freelance, es un sistema de control de procesos híbrido que combina lo mejor de dos mundos, DCS y PLC. Este sistema ofrece un tamaño y precio de PLC pero con la funcionalidad de un DCS. El ambiente integrado facilita la ingeniería, puesta en marcha y supervisión de los dispositivos de campo. Las interfaces disponibles facilitan la operación y diagnóstico del sistema entero.

Este sistema provee una poderosa herramienta de automatización rentable en términos de software y hardware pero también muy fácil de usar. Útil en industrias de energía procesos o del medio ambiente.

La arquitectura del sistema de control se divide en un nivel de operador y en un nivel de proceso. El nivel de operador contiene las funciones para operación y monitoreo, archivos y registros, tendencias y alarmas, las funciones de control de lazo abierto y lazo cerrado se procesan en los controladores. Y el nivel de proceso, consiste en varias estaciones de proceso que se conectan a unidades de E/S. Se tiene la opción de usar las estaciones de proceso ya sea en forma redundante (redundancia de CPU, redundancia de módulos de bus de campo) o sin redundancia. Además, de tener la capacidad de trabajar con buses de campo abierto, tales como Hart, Profibus, Foundation Fieldbus, entre otros.

### 3.3.4. DCS SERIE I/A Foxboro/Invensys

El sistema Foxboro/Invensys de la Serie I/A, combina las más avanzadas tecnologías de control, adquisición y disponibilidad de información, disponibilidad en el tiempo, debido a su filosofía de diseño basada en estándares internacionales que permiten el crecimiento del sistema. El sistema I/A Series tiene una filosofía que permite que la plataforma del sistema esté siempre dentro de la última tecnología, manteniendo la interoperabilidad con las generaciones anteriores.

Además, el I/A fue uno de los primeros en utilizar Ethernet como red de control y el primero en utilizar una completa y funcional arquitectura orientada a objetos con el administrador de objetos (OM).

La arquitectura de la red de control de la Serie I/A, integra estaciones de trabajo con procesadores de control a una red tipo *MESH* de alta velocidad integrada por *switches*, con protocolo Ethernet de 100 Mb/ 1 Gb.

El sistema I/A permite la integración sin ningún problema de controladores nuevos, módulos de bus de campo (FBM) I/O y estaciones de operador disponibles en Windows y UNIX. Estas estaciones y procesadores de control, en conjunto con las tarjetas que manejan los I/O's y dispositivos para manejo de información; conforman los sistemas escalables para monitoreo, control del proceso y la integración de la información industrial.

I/A Series ofrece un historial que proporciona una alta disponibilidad del sistema para la industria. Así también, el hardware y software está diseñado para no detener la operación. La tolerancia a fallos reside en todos los niveles

del sistema, desde controladores de proceso para redes de campo redundantes y módulos de bus de campo.

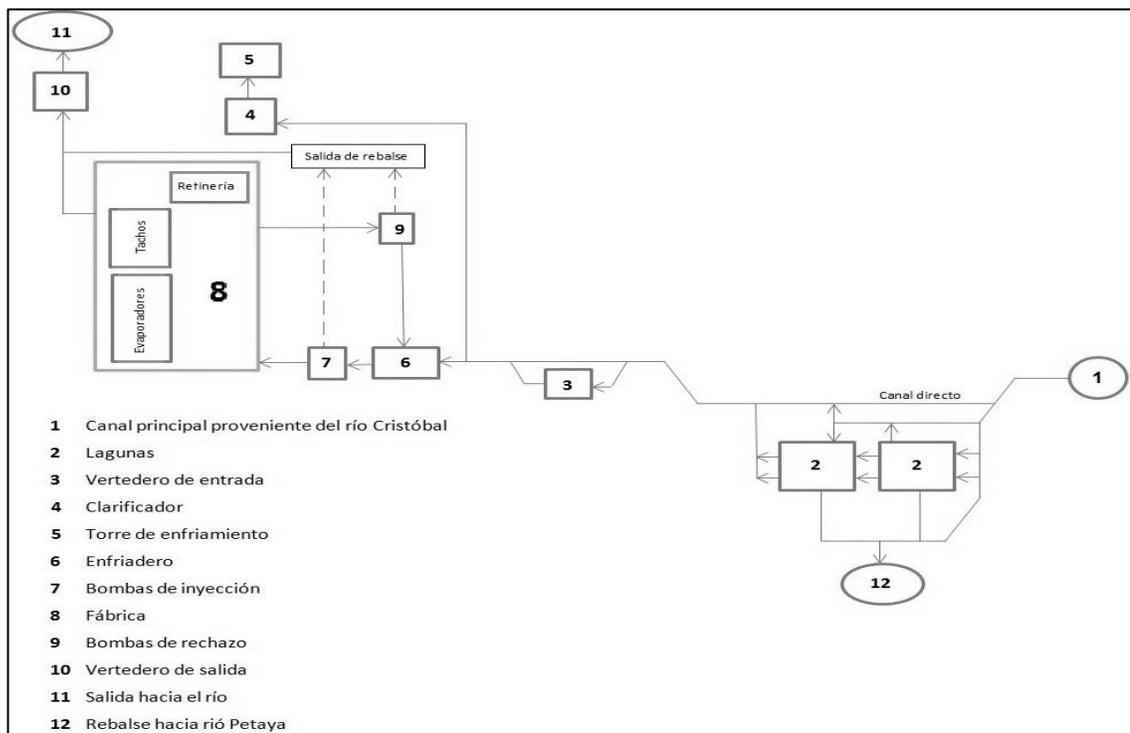
Actualmente, I/A Series es el DCS que se utiliza en Ingenio La Unión para monitoreo en tiempo real y control del proceso completo.

## 4. SOLUCIÓN PROPUESTA

### 4.1. Circuito de agua de enfriamiento de Ingenio La Unión

Actualmente el abastecimiento de agua para el enfriamiento del proceso en la fábrica de Ingenio La Unión, es a través de una toma principal, la cual desvía agua del río Cristóbal para después distribuirla en el circuito de abastecimiento.

Figura 44. Diagrama del circuito de agua de Ingenio La Unión



Fuente: elaboración propia con programa Microsoft Word.

Este circuito inicia con una entrada principal de agua que permite alimentar dos lagunas que se utilizan como tanques de abastecimiento. Cuando las lagunas se llenan y no se precisa de agua, existe un canal que permite enviar el agua desviada del río Cristóbal hacia el río Petaya.

Figura 45. **Canal principal**



Fuente: Ingenio La Unión. Canal de entrada.

Asimismo, si el caudal en la entrada principal es muy bajo y se requiere agua en fábrica, la misma no se envía a las lagunas si no directamente a la entrada del Ingenio. Sin embargo, este procedimiento es muy raro, a lo sumo se realiza una vez en toda la zafra.

En época de lluvia, regularmente el caudal aumenta y el nivel de las lagunas también. Por lo tanto, las lagunas cuentan con un drenaje que permite enviar el agua hacia el río Petaya cuando exceden su capacidad.

Para el llenado de las lagunas existen dos formas:

- Llenar primeramente una laguna y con esta misma alimentar la segunda laguna.
- O llenar cada laguna directamente desde la entrada principal.

El agua proveniente de las lagunas llega a la entrada del Ingenio, donde se ubica un vertedero que mide el caudal que entra. Esta es la única entrada de agua de río al Ingenio.

Figura 46. **Vertedero de entrada**



Fuente: Ingenio La Unión. Vertedero de entrada.

Después de este vertedero, el agua se puede enviar hacia un enfriadero o hacia un clarificador. Dependiendo de la necesidad.

El enfriadero debe de mantener un nivel que permite que un sistema de bombas denominado bombas de inyección pueda enviar el agua a la fábrica. Actualmente este nivel se monitorea por medio de un medidor ultrasónico.

Parte del agua que sale de fábrica se envía hacia el sistema de bombas de rechazo, que recirculan el agua hacia el enfriador nuevamente. De modo que el nivel en el enfriadero se mantiene sin necesidad de agregar agua del río.

Del mismo modo sucede con el clarificador, necesita tener un nivel en el canal de abastecimiento para funcionar. Por lo tanto, si se unen ambos canales y el nivel del enfriadero se mantiene así, también se mantendrá el nivel para el clarificador, sin necesidad de utilizar agua del río.

Por lo tanto el agua proveniente de las lagunas, será requerida solo si el nivel en el enfriadero y el canal que alimenta al clarificador se ve disminuido. Esto puede suceder principalmente por fugas en las tuberías o una demanda alta de agua en fábrica.

Por último, toda el agua que sale como desecho del Ingenio pasa a través de un canal que desemboca en el río nuevamente. En esta salida se encuentra un vertedero que permite medir la cantidad de agua que se retorna al río.

El caudal en este punto es mucho mayor que en la entrada. Esto debido a toda el agua que se suma proveniente del proceso de producción del azúcar y también de los diferentes pozos que se utilizan.

Figura 47. **Vertedero de salida**



Fuente: Ingenio La Unión. Vertedero de salida.

Todo este proceso de abastecimiento de agua lo lleva acabo un grupo de personas, las cuales se guían por medio de órdenes o en base de su experiencia para tomar decisiones. Debido a las largas distancias a las que se encuentran los puntos principales y/o compuertas, estas personas se movilizan en bicicleta y también utilizan radio de largo alcance para comunicarse entre ellos.

En la página siguiente se muestra el mapa del circuito de agua del Ingenio.

Figura 48. Vista de planta del circuito de agua



Fuente: Ingenio La Unión, modificada.

#### 4.2. Descripción del problema

Hoy día el agua es un líquido escaso, debido a la contaminación y mal uso que se le ha dado. El problema encontrado en muchas industrias como en Ingenio La Unión es no contar con un sistema que optimice el uso del agua.

En el Ingenio el circuito de agua de abastecimiento depende de la necesidad que tenga la fábrica, debido a la disminución de nivel en el clarificador y enfriadero. El control del agua que se utiliza es manual y operado por medio de válvulas tipo guillotina.

Sin embargo el control o medición no es constante debido a las distancias y áreas en las que se encuentran las compuertas. Las personas tienen que ir de

un lado a otro para poder cambiar las condiciones del circuito, en los mejores casos utilizan radios para comunicar la acción a realizar.

Por lo tanto un aumento repentino del caudal y nivel en los diferentes canales causan desbordes que afecten al personal o equipos. Además, un ajuste realizado en alguno de los canales se ve reflejado de 8 a 16 horas después. Por esta razón es necesario establecer un monitoreo en tiempo real del agua en los canales de entrada y salida del circuito de enfriamiento de la fábrica, que permita optimizar el buen uso de este líquido, tomando decisiones inmediatas ya sea cuando el agua sea escasa como en verano o abundante como en invierno.

#### **4.2.1. Puntos críticos y de recepción**

Revisando el circuito de abastecimiento de agua de enfriamiento del Ingenio, se destacan tres puntos importantes que se listan a continuación:

- Canal principal de agua: entrada que provee de agua a la fábrica de manera directa o indirectamente manteniendo a las lagunas como tanques de abastecimiento. Este punto carece de una estructura que permita medir el caudal, por lo tanto solo se mide el nivel por cuestiones de información.
- Vertedero de entrada enfriadero/clarificador: entrada de agua de río al Ingenio, para el enfriamiento del proceso. Por esta razón es necesario medir la cantidad de agua que entra a la fábrica. Cabe mencionar que el caudal en este punto no es el mismo que en la entrada principal.

- Vertedero de salida general: única salida del Ingenio hacia el río, por esta pasan aguas que salen de fábrica así como aguas de rebases en el clarificador, bombas de rechazo entre otros. Debido a esto es necesario tener una medición de la cantidad de agua que se retorna al río. Cabe mencionar que el agua que se retorna al río es mayor que la que ingresa por el vertedero de entrada.

A demás de los puntos anteriores, se debe considerar los puntos en los cuales se ubicarán las radios base para la transmisión inalámbrica. Estos puntos deben de ser ubicados a una altura considerable que permita una línea vista con el punto a monitorear y libre de obstáculos.

- Torre de enfriamiento: debido a la distancia y ubicación en que se encuentra el vertedero de salida, la mejor opción para colocar una radio base es en la torre de enfriamiento. Esto debido a que posee la altura necesaria para poder evitar obstáculos y la ubicación facilita el tender un cableado que permita la comunicación con el sistema.

Además es posible incluir más medidores para las salidas individuales del agua de fábrica y del agua de rebalse.

- Fábrica, estación de evaporadores: por la ubicación de los transmisores, este punto permite una línea vista para la recepción de las señales del vertedero de entrada enfriadero/clarificador y la entrada principal.

En la página siguiente se aprecia la ubicación de los puntos críticos y de recepción ubicados sobre un mapa del Ingenio.

Figura 49. **Puntos críticos y distancias**



Fuente: Ingenio La Unión, modificada.

#### 4.2.2. **Estructuras existentes en los puntos a monitorear**

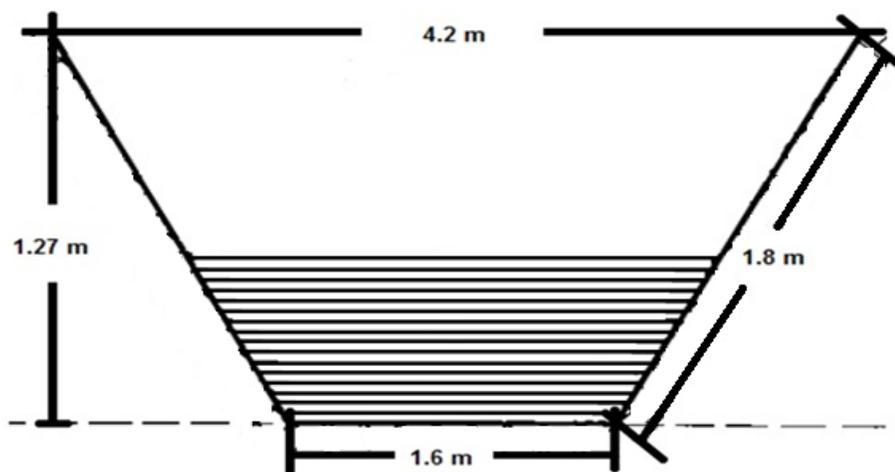
Existen diferentes estructuras que permiten obtener el flujo de agua en canales abiertos, necesitando únicamente para el cálculo, el nivel del agua que circula por el canal.

La estructura más utilizada en Ingenio La Unión es el vertedero rectangular, sin embargo para la entrada principal es un simple canal con forma de trapecio.

A continuación, se describen las estructuras existentes en los puntos críticos con sus respectivas medidas.

- **Entrada principal:** canal de abastecimiento.

Figura 50. **Dimensiones del canal principal**



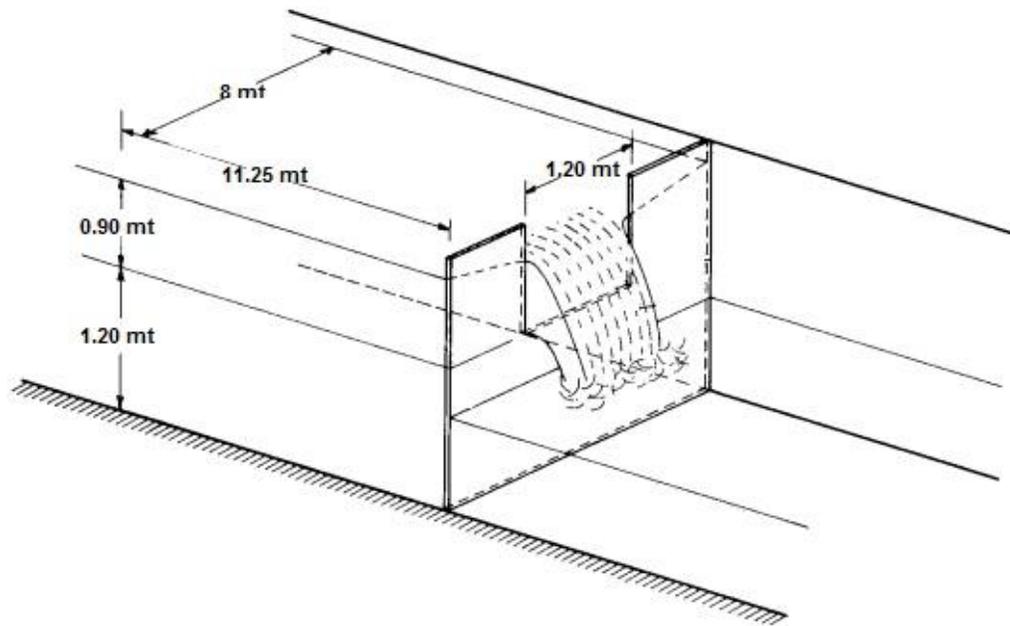
Fuente: elaboración propia.

Actualmente en este punto no existe una estructura que permita medir el caudal disponible para el abastecimiento de la fábrica. En su lugar hay un canal al cual se le mide el nivel de agua disponible.

Por lo tanto, la empresa para un mejor control, puede considerar la construcción de una estructura que permita llevar un registro de la cantidad de agua disponible para el Ingenio.

- **Entrada enfriadero/clarificador:** vertedero rectangular.

Figura 51. **Dimensiones del vertedero de entrada**



Fuente: VEGA, Daniel. Estructuras de medición de caudal vertederos de pared delgada.  
p. 19. Modificada

Retomando la ecuación 1.7, se tiene que:

$L = 1.20 \text{ m}$  (ancho de cresta)

$n = 2$  (número de contracciones)

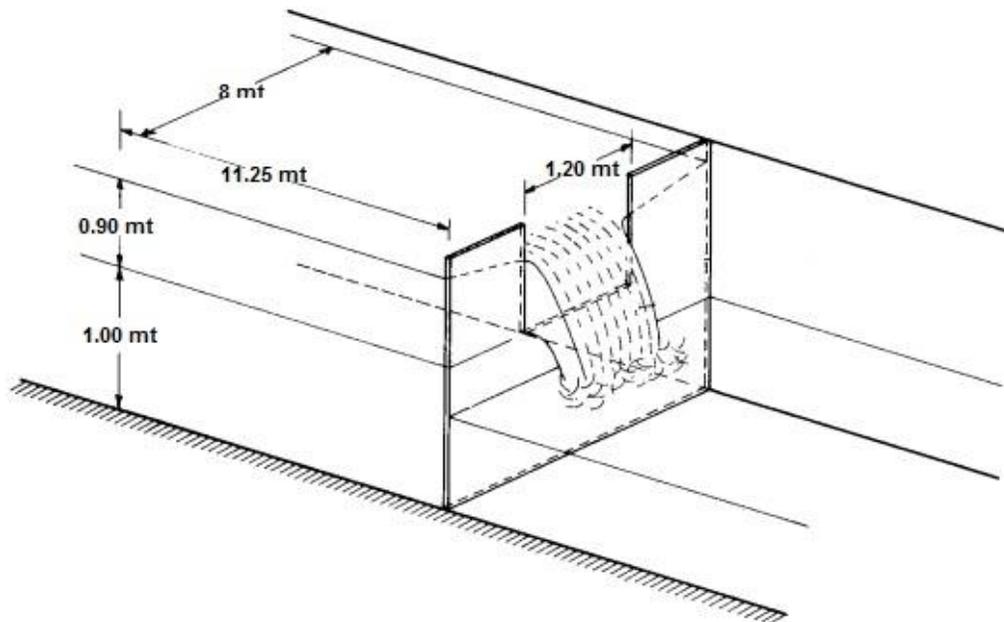
$H = \text{¿?}$  (altura de carga)

$$Q = 1.84 (L - 0.1 \cdot n \cdot H) \cdot H^{3/2} \cdot 1000 \text{ (L/s)}$$

Mayor caudal registrado a la fecha 28/04/13, por semana es de 1200 GPM.

- **Salida general:** vertedero rectangular.

Figura 52. **Dimensiones del vertedero de salida**



Fuente: VEGA, Daniel. Estructuras de medición de caudal vertederos de pared delgada. p. 19. Modificada.

Retomando la ecuación 1.7, se tiene que:

$L = 1.20 \text{ m}$  (ancho de cresta)  
 $n = 2$  (número de contracciones)  
 $H = \text{¿?}$  (altura de carga)

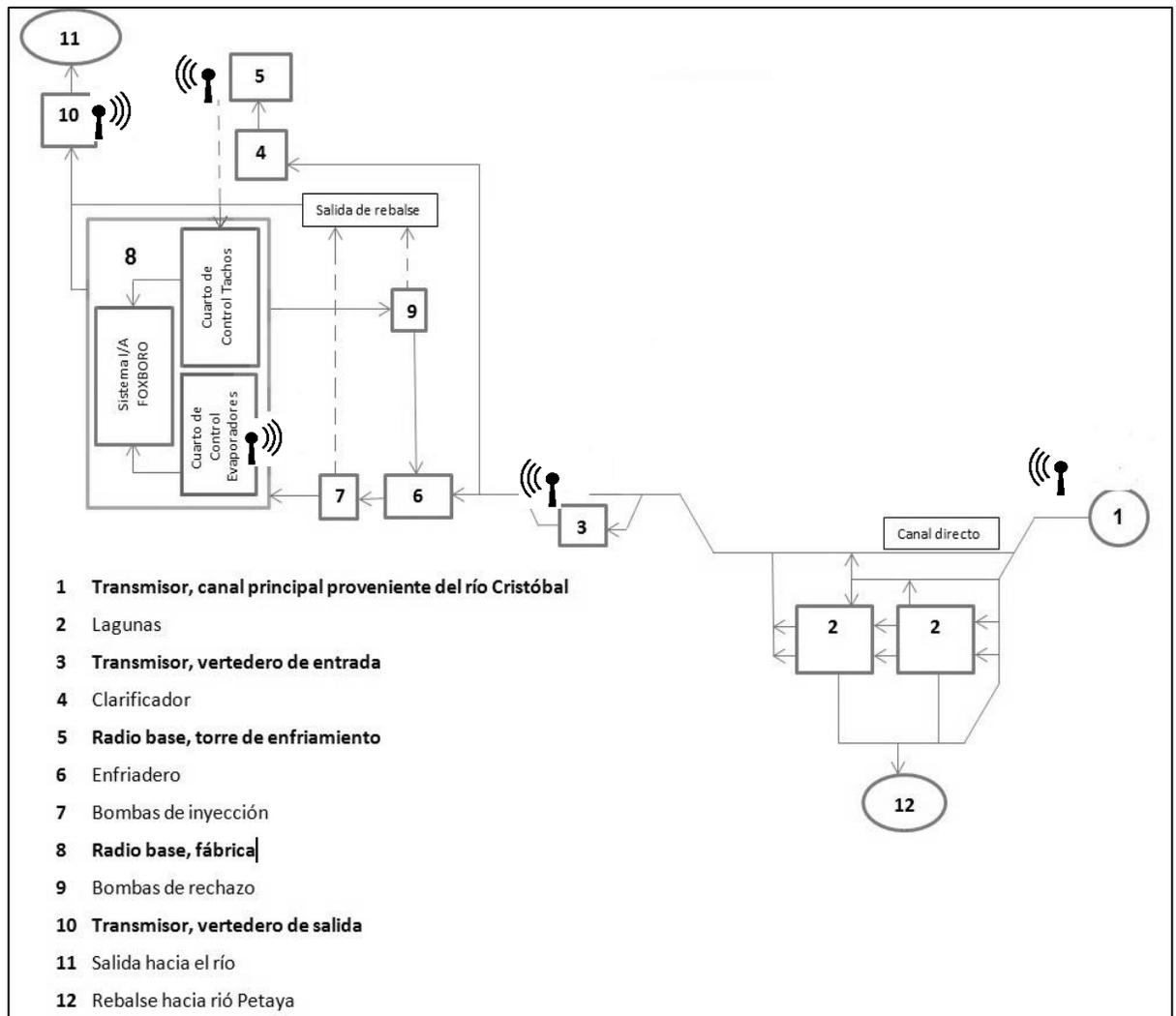
$$Q = 1.84 (L - 0.1 \cdot n \cdot H) \cdot H^{3/2} \cdot 1000 \text{ (L/s)}$$

Mayor caudal registrado a la fecha 28/04/13, por semana es de 1900 GPM.

### 4.3. Instrumentación propuesta

Implementar este sistema de monitoreo requiere de diferentes equipos que permitan la transmisión y recepción de la señal desde el punto ubicado en campo, hasta el procesador del DCS ubicado en el cuarto de control.

Figura 53. Diagrama de solución



Fuente: elaboración propia con programa Microsoft Visio.

#### **4.3.1. Selección de tecnología inalámbrica**

Considerándose las diferentes y a la vez similares características de los adaptadores inalámbricos mencionados en el capítulo dos, se decide por el adaptador de la marca Honeywell modelo XYR 5000 WI551 con entradas analógicas de 4 – 20 mA y con antena yagi para el enlace canal principal - fábrica. Para proponerse como una posible solución al problema de monitoreo del agua de enfriamiento del Ingenio.

La elección de este adaptador fue debido a su rango de alcance, así como a la capacidad de poder integrar varios adaptadores con una sola radio base. Por lo tanto, la radio base a utilizar es Honeywell modelo XYR 5000 WBH con antena remota omnidireccional de alta ganancia.

La tecnología OneWireless ofrecerá un eficiente ancho de banda evitando las interferencias por medio de FHSS. Así también, permitirá tener una red robusta a la cual se le pueden integrar dispositivos electrónicos que trabajen con 4 – 20 mA de diferentes fabricantes.

#### **4.3.2. Cálculos para los radio enlaces**

Después de la elección de la instrumentación inalámbrica, se deben realizar cálculos de la zona de Fresnel número 1 y la ganancia del sistema para conocer las características del enlace al momento de su implementación. Para estos cálculos es necesario tomar en cuenta las elevaciones del terreno (ver anexos), principalmente en los enlaces del canal principal y vertedero de entrada.

- **Cálculos Entrada principal – Fábrica:**

Utilizando la ecuación 2.11:

$$r_n = \sqrt{n\lambda \frac{d_1 d_2}{d_t}}$$

Se tiene que:

$$n = 1$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{902 \times 10^6}$$

$$d_1 = 326 \text{ m}$$

$$d_2 = 995 \text{ m}$$

$$d_t = 1321 \text{ m}$$

$$r = 9.04 \text{ m} \text{ Radio de la primera zona de fresnel.}$$

En el trayecto de este enlace, existe una plantación de caña cuya altura no afecta la comunicación. Sin embargo existen árboles con una altura aproximadamente de 10 m que pueden obstruir el enlace. Para garantizar que la primera zona de Fresnel quede libre de obstáculos se sugiere que el transmisor se coloque a una altura igual o mayor a la altura de los árboles presentes en el trayecto.

Para este enlace el receptor estará ubicado en fábrica sobre el área de evaporadores o puede considerarse también el área de tacho. La altura será aproximadamente de 23 m y funcionará tanto para el enlace del canal principal como para el vertedero de entrada.

Utilizando las ecuaciones 2.12, 2.14 y 2.15:

$$G_s = P_t - C_{\min}$$
$$G_s = L_{p(\text{dB})} + F_m - A_t - A_r$$
$$L_{p(\text{dB})} = 92.4 + 20 \log f_{(\text{GHz})} + 20 \log D_{(\text{km})}$$
$$F_m = 30 \log D + 10 \log (6ABf) - 10 \log (1-R) - 70$$

Se tiene que:

$$A_t = 6$$

$$A_r = 6$$

$$f_{(\text{GHz})} = 0.902$$

$$D_{(\text{km})} = 1.321$$

$$AB = (1)(0.5)$$

$$R = 0.999$$

**$G_s = 49.87 \text{ dB}$**  Ganancia del sistema.

- **Cálculos Vertedero de entrada – Fábrica:**

Utilizando la ecuación 2.11:

$$r_n = \sqrt{n\lambda \frac{d_1 d_2}{d_t}}$$

Se tiene que:

$$n = 1$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{902 \times 10^6}$$

$$d_1 = 225 \text{ m}$$

$$d_2 = 101 \text{ m}$$

$$d_t = 326 \text{ m}$$

**r = 4.81 m** Radio de la primera zona de Fresnel.

Para este enlace existen dos árboles en el trayecto, sin embargo su altura no es significativa para obstruir el enlace. Por lo tanto la altura del transmisor queda libre, pero se sugiere colocarlo por lo menos a 3 m del suelo. El receptor será el mismo utilizado para el enlace del canal principal-fábrica.

Utilizando las ecuaciones 2.12, 2.14 y 2.15:

$$G_s = P_t - C_{\min}$$

$$G_s = L_{p(\text{dB})} + F_m - A_t - A_r$$

$$L_{p(\text{dB})} = 92.4 + 20 \log f_{(\text{GHz})} + 20 \log D_{(\text{km})}$$

$$F_m = 30 \log D + 10 \log (6ABf) - 10 \log (1-R) - 70$$

Se tiene que:

$$A_t = 6$$

$$A_r = 6$$

$$f_{(\text{GHz})} = 0.902$$

$$D_{(\text{km})} = 0.326$$

$$AB = (1)(0.5)$$

$$R = 0.999$$

**$G_s = 19.48$  dB** Ganancia del sistema.

- **Cálculos Vertedero salida – Torre de enfriamiento:**

Utilizando la ecuación 2.11:

$$r_n = \sqrt{n\lambda \frac{d_1 d_2}{d_t}}$$

Se tiene que:

$$n = 1$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{902 \times 10^6}$$

$$d_1 = 150 \text{ m}$$

$$d_2 = 151 \text{ m}$$

$$d_t = 301 \text{ m}$$

**$r = 5$  m** Radio de la primera zona de Fresnel.

La altura de transmisor para este enlace queda libre, ya que no existe vegetación que obstruya la comunicación. Pero de igual forma se sugiere una altura de por lo menos 3 m. El receptor estará ubicado a una altura de 13 m en la estructura de la torre de enfriamiento.

Utilizando las ecuaciones 2.12, 2.14 y 2.15:

$$G_s = P_t - C_{\min}$$

$$G_s = L_{p(\text{dB})} + F_m - A_t - A_r$$

$$L_{p(\text{dB})} = 92.4 + 20 \log f_{(\text{GHz})} + 20 \log D_{(\text{km})}$$

$$F_m = 30 \log D + 10 \log (6ABf) - 10 \log (1-R) - 70$$

Se tiene que:

$$A_t = 6$$

$$A_r = 6$$

$$f_{(\text{GHz})} = 0.902$$

$$D_{(\text{km})} = 0.301$$

$$AB = (1)(0.5)$$

$$R = 0.999$$

$$\mathbf{G_s = 17.75 \text{ dB}}$$
 Ganancia del sistema.

Las distancias encontradas con la fórmula de Fresnel para cada enlace, corresponden al radio de la elipse que conforma la primera zona de Fresnel, en el punto donde se ubica el obstáculo más alto. Esta área concentra la mayoría de la potencia transmitida, de modo que debe de estar libre de cualquier obstáculo.

En los enlaces de los vertederos de salida y entrada, las perdidas por desvanecimiento podrían obviarse debido a que la distancia de separación entre el receptor y emisor es mucho menor comparada con la separación entre el canal de entrada y fábrica.

#### **4.3.3. Selección del medidor de nivel**

El medidor a utilizar es un VEGAPULS 65 (medición de nivel por radar), esto debido a la experiencia que se posee en las diferentes aplicaciones en las que se ha implementado y porque no necesita un mantenimiento constante.

#### **4.3.4. Equipo a utilizar para integración al DCS**

Actualmente existen varios dispositivos electrónicos disponibles e instalados en la fábrica, que permiten la comunicación de señales 4 – 20 mA con el sistema. A continuación, se listan los principales equipos para la adaptación de la señal proveniente del medidor de nivel al sistema:

- Panel solar 24 VDC 40 W (547mm x 674mm x 35mm) y *pack* de baterías recargables 20 Ah (406mm x 356mm x 216mm): debido a que los sensores de nivel, no cuentan con batería que les permita trabajar de forma autónoma, estos utilizan alimentación ya sea 24 VDC o 120 VAC dependiendo de la versión. Este panel permitirá la alimentación al sensor durante el día y por la noche el paquete de baterías recargable alimentará al sensor. Así también, es posible considerar alimentarlo con una fuente constante.
- Medidor de nivel VEGAPULS 65: medidor tipo radar para medir el nivel en los puntos críticos y que provee una señal de 4 – 20 mA/HART.
- Transmisor inalámbrico XYR 5000 WI551: transmisor que permitirá enviar de forma inalámbrica la señal de 4 – 20 mA proporcionada por el medidor de nivel. Alimentado por baterías.

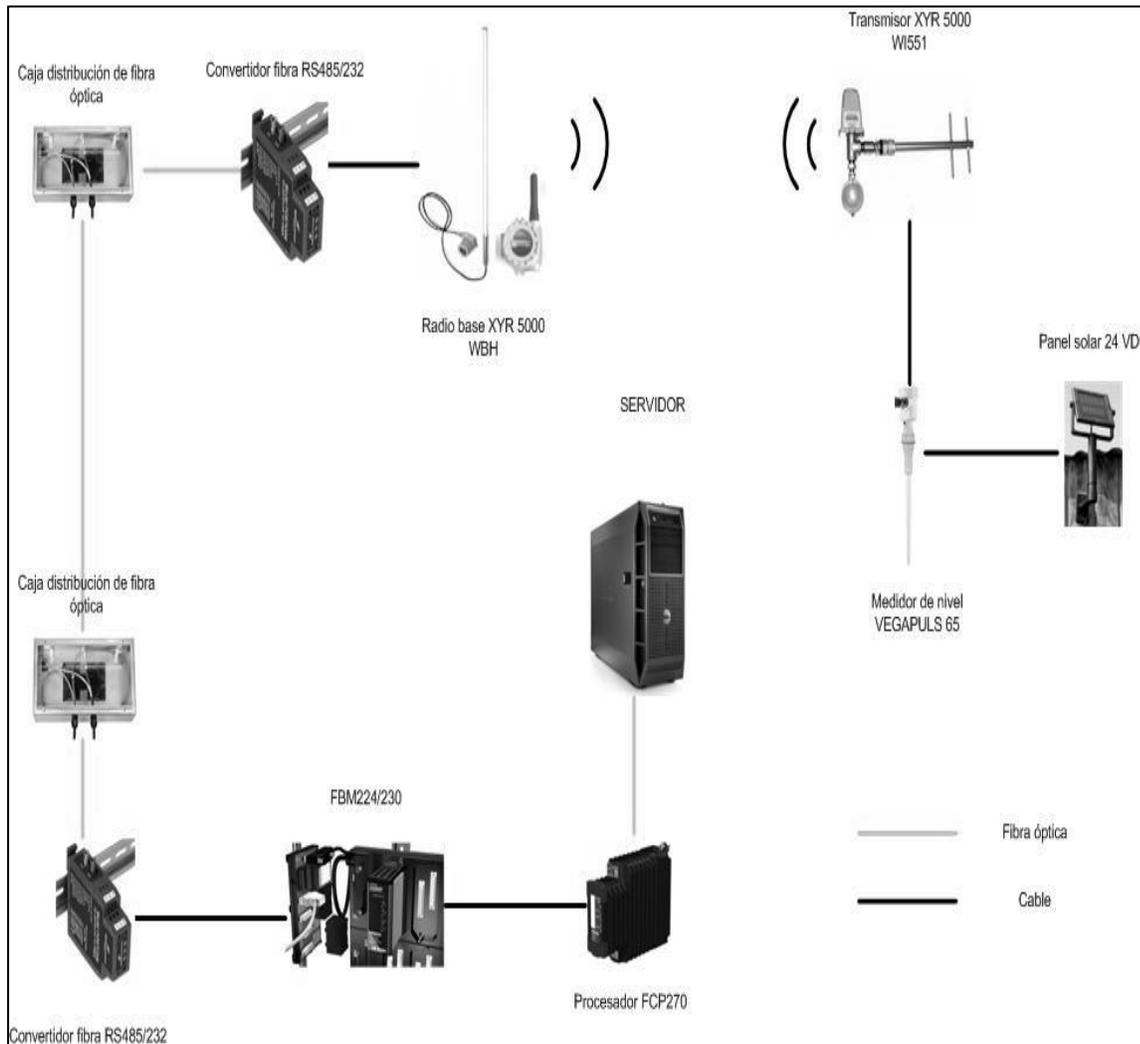
- Radio base XYR 5000 WBH: receptor inalámbrico que convertirá ondas electromagnéticas en señales eléctricas. Utiliza antena remota de alta ganancia.
- Convertidor FOSTCDR RS485/232 a fibra: dispositivo que permitirá la conversión de la señal RS485/232 a fibra óptica para poder recorrer la distancia desde la torre de enfriamiento al cuarto de control de tacho.
- FBM230 comunicación RS485/232: interfaz para la señal RS485/232 proveniente del radio receptor al sistema. Puede también utilizarse la FBM224 para MODBUS.
- FCP270: procesador de control de campo, básicamente el cerebro en una red de automatización foxboro.
- Cable alimentación: cable para alimentación de los medidores y radio base ya sea con voltaje 24 VDC o 120 VDC.

Cable para señal: cable de dos hilos para la comunicación de la señal de 4 – 20 mA, entre el sensor y el adaptador *wireless*.

Cable para comunicación serial RS485 del receptor al convertidor y la FBM. Fibra óptica, para transmisión de la señal del convertidor al cuarto de control.

- Infraestructura: instalación de tuberías para el cableado respectivo en los puntos que se requiera, estructuras para la ubicación de los medidores y adaptadores así como también para las radios base.

Figura 54. Representación de la instrumentación propuesta



Fuente: elaboración propia con Microsoft Visio.

El diagrama anterior forma parte del enlace entre el vertedero de salida y la torre de enfriamiento. En este punto la comunicación se realiza por fibra óptica desde el cuarto de control de tachos, hasta el cuarto eléctrico a un lado de la torre.

Este diagrama se simplifica para la comunicación del vertedero de entrada y el canal principal con la fábrica. Debido a que el cuarto de control de evaporadores no está tan distante de la posible ubicación de la radio base.

#### **4.3.5. Sistema FOXBORO I/A**

El sistema de control distribuido utilizado en el Ingenio, permite realizar una compleja manipulación de la información, según sea la necesidad de la empresa. Permitiendo la visualización de la información, como resultado de un cálculo previo o simplemente como un indicador del valor de la variable medida.

En el caso de la medición de nivel, es necesario configurar la señal proveniente de la FBM230, para después guardar la información y desplegarla en la pantalla haciendo un llamado de la misma. Los pasos básicos a seguir son los siguientes:

- Configurar el medidor de nivel.
- Configurar el transmisor inalámbrico.
- Configurar el receptor, para que esté en sintonía con el transmisor.
- Configurar el convertidor de señal RS485/232 para la transmisión de la misma.
- Configurar la FBM230, para habilitar el canal RS485/232.
- Crear un bloque que representará la variable de nivel.
- Configurar un bloque: máximos, mínimos, dimensionales, entre otros.
- Diseñar figura o forma geométrica para representar el valor de la variable.
- Mandar a llamar a la bloque desde la figura.

Por otro lado, para la obtención del caudal, se necesita la altura de carga de agua del vertedero para incluirla en la ecuación 1.7. Esta medición se obtiene de los medidores de nivel ubicados en los vertederos de entrada y salida.

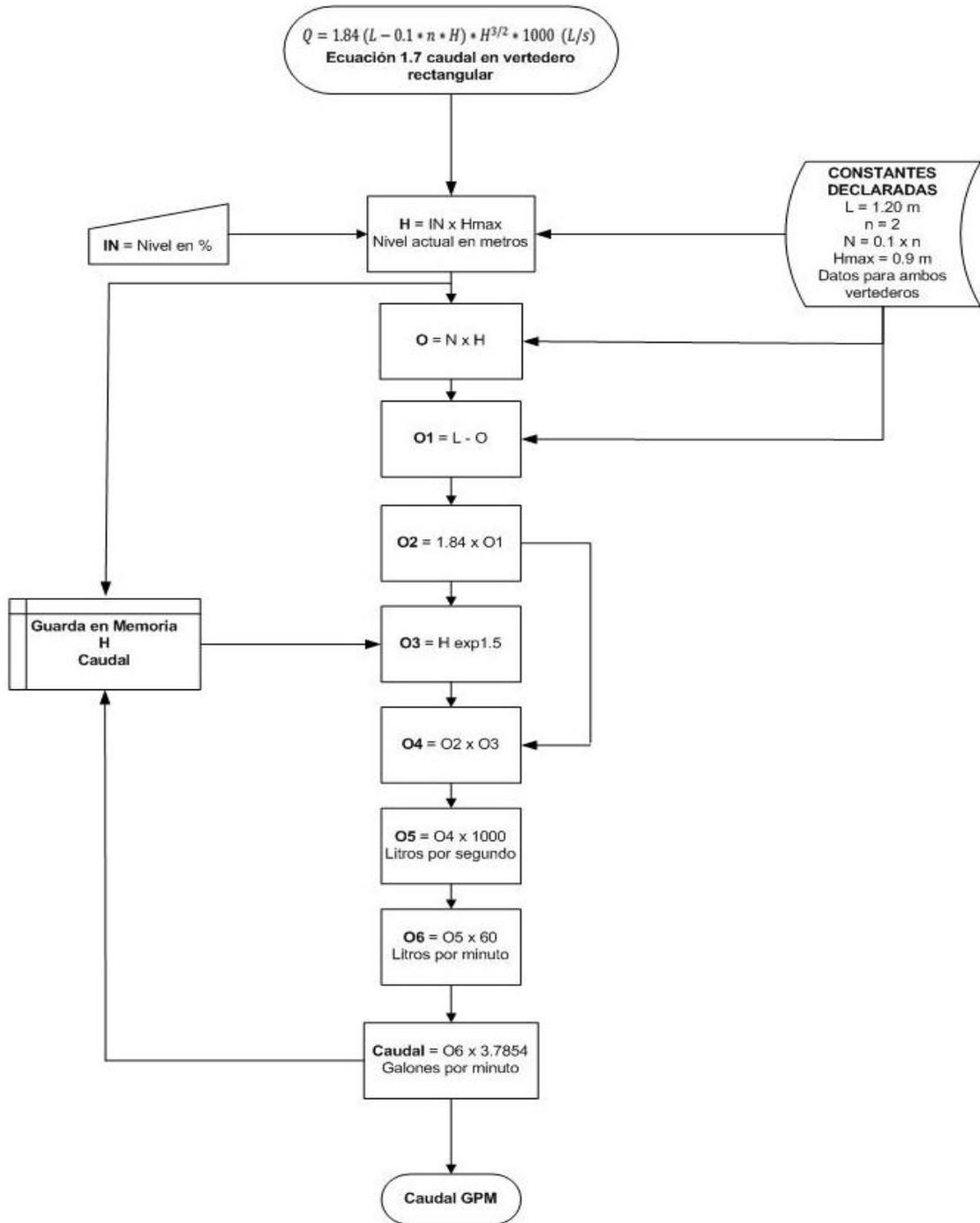
Una vez configurada la variable de nivel, es necesario crear un algoritmo que permita realizar el cálculo requerido por la ecuación 1.7 y de esta forma obtener el caudal en litros por segundo. Posteriormente el valor obtenido ha de manipularse para obtener un resultado en GPM.

$$Q = 1.84 (L-0.1*n*H)*H^{3/2}*1000 \text{ (L/s)}$$

Debido a que la ecuación 1.7 contiene varias constantes, es necesario declararlas en el programa, para después mandarlas a llamar.

En la página siguiente se puede apreciar el diagrama de flujo del algoritmo a utilizar.

Figura 55. Algoritmo del cálculo del caudal

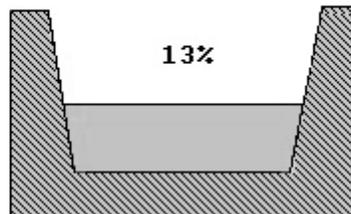


Fuente: elaboración propia con programa Microsoft Visio.

Por último, para completar el monitoreo de las variables caudal y nivel, es necesario la representación en pantalla de los puntos críticos. A continuación, se presente los bosquejos para la representación en pantalla de los puntos a monitorear.

Figura 56. **Representación del nivel del canal principal en pantalla**

**Nivel canal principal = 000.00 pulg**



Fuente: elaboración propia con programa Foxdraw.

Figura 57. **Representación del caudal de los vertederos en pantalla**

**Vertedero de entrada**  
**Flujo Equivalente = 0000.00 GPM**



Fuente: elaboración propia con programa Foxdraw.

La figura anterior se puede utilizar para representar el vertedero de entrada y salida en las pantallas, ya que utilizan la misma estructura.

#### 4.4. Presupuesto del equipo a utilizar

Actualmente en la fábrica ya existen ciertos equipos instalados y en funcionamiento los cuales se puede aprovechar para la implementación del sistema y economizar gastos. Sin embargo, hay otros que aún no existen como lo es el transmisor inalámbrico y el convertidor RS 485/232 a fibra óptica.

A continuación, se presenta una lista con el equipo y material que se considera no disponible en la empresa. Los precios mostrados han sido obtenidos de las páginas del fabricante, así como también, del sistema BIOSALC, que se utiliza para la gestión y aprovisionamiento de equipo y material en la bodega de la empresa.

Tabla XX. **Equipo por adquirir**

<b>Cantidad</b>	<b>Dispositivo</b>	<b>Modelo/codigo</b>	<b>Precio unitario</b>
3	Kit, panel solar y pack de baterias	RLH-SK40-2420-1	Q9,200.00
3	Medidor de nivel	VEGAPULS 65	Q17,111.16
3	Adaptador inalambrico	XYR 5000 WI551	Q15,920.00
2	Radio base	XYR 5000 WBH	Q27,144.00
2	Convertidor RS 485/232 a fibra óptica	FOSTCDR	Q2,152.00
2	Fuente Convertidores	1606-XLP	Q1,174.49
1	Adaptador RS 485/232	FBM230	Q32,253.59
1	Cable comunicaión FBM230	P0926GJ A	Q1,831.94
1	Block terminal 230	P0926GL-0C	Q4,773.84
4	Patch corde		Q441.67

Fuente: elaboración propia.

Presupuesto total por todos los componentes listados:

**Q 228,260.51**

Este presupuesto se considera un estimado, debido al *stock* de los proveedores locales o gastos de importación y transporte. El equipo y material no listado se encuentra disponible en la empresa.

En el vertedero de salida se unen aguas provenientes de fábrica y aguas de rebalse del clarificador y bombas de rechazo. Todo este rebalse representa un bombeo innecesario que se traduce a energía desperdiciada.

Basándose en datos proporcionados por la Oficina de Control de Calidad de Ingenio La Unión. Se obtuvo un promedio del caudal de salida, de las últimas 10 semanas de funcionamiento de la fábrica a la fecha 28 de abril del 2013, que es de: 810.70 GPM. De los cuales 589.70 GPM proviene de las aguas de fábrica y el resto que son 217.40 GPM de las agua de rebalse.

Si se toma una bomba de 300 HP que esté trabajando a razón de 10,000 GPM. Se obtiene que la energía requerida para bombear 217.40 GPM es de 4.476 KW. Trabajando todo el día, durante 180 días que dura la zafra se obtiene que la energía desperdiciada por zafra es de 19,336.32 KWh/zafra.

Finalmente si el KWh se paga a cincuenta centavos de dólar se obtiene que: \$ 9,668.16/zafra equivalente a Q 77,345.28/zafra que se desperdician al bombear agua de más. Implementando esta solución permitirá optimizar el uso de agua de los ríos y la reducción de pérdidas hará que el proyecto se pague por si solo en tres zafras.

## CONCLUSIONES

1. La implementación de un sistema de monitoreo inalámbrico en tiempo real para la medición de nivel y caudal en los canales de entrada y salida de agua al ingenio y su integración al DCS es factible tanto por la parte técnica como por la económica, ya que es posible aprovechar la infraestructura, red y equipos instalados actualmente.
2. El sistema DCS FOXBORO, ofrecen un alto desempeño en el control de procesos, permitiendo la integración y procesamiento de distintas señales provenientes de dispositivos de diferentes fabricantes.
3. El concepto de redundancia en los DCS ofrece una tranquilidad al ocurrir alguna falla aislando únicamente el sector afectado.
4. La utilización de tecnología inalámbrica en campo abierto se ve limitada a las especificaciones del fabricante, elevación del terreno, vegetación y clima.
5. La tecnología inalámbrica ofrece una alternativa a gastos de cableado, monitoreo a largas distancias y en lugares peligrosos, entre otros. No importando si están dentro o fuera de una edificación.
6. La medición del caudal en canales abiertos por lo regular se realiza en lugares alejados de las plantas que los utilizan, requiriendo para una medición constante, tecnología robusta que proporcione la comunicación necesaria y que reduzca gastos de cableado.

7. Llevar un control del caudal en canales abiertos regularmente implica la lectura del nivel del canal y la realización de los cálculos correspondientes de forma manual, imitándose a la toma de datos en ciertos horarios.
  
8. Los vertederos de pared delgada son hasta cierto punto fáciles de construir y son de las estructuras más utilizadas para la medición de caudal en canales abiertos.

## RECOMENDACIONES

1. Considerando la importancia que tiene para Ingenio La Unión minimizar la contaminación del agua de los ríos, es necesario implementar una medición de caudal en el canal principal para tener un control de este líquido.
2. Utilizar un medidor de nivel continuo que no tenga contacto con el líquido o material en cualquiera de los puntos críticos, para evitar un mantenimiento regular del instrumento.
3. Aunque no existan obstáculos o vegetación significativa en el trayecto del enlace de radio, los transmisores y receptores deben de estar siempre a una altura considerable, para evitar obstrucción a la línea vista o primera zona de Fresnel.
4. Considerando que con la tecnología inalámbrica ONEWIRELESS es posible tener varios transmisores enlazados a una sola base, donde la ubicación del receptor aparte de estar a una buena altura, debe tener línea vista con todos los receptores disponibles.
5. Debido a los diferentes equipos, software y red que actualmente están funcionando en fábrica, es conveniente realizar la integración del sistema de monitoreo a la red existente, para reducir gastos tanto de instalación como de compra de equipos.

6. A pesar de la robustez del equipo contra el clima, es necesario cubrirlo adecuadamente para prolongar la vida del mismo.

## BIBLIOGRAFÍA

1. AZNAR, Ángel, et al. *Antenas*. 2a ed. Barcelona: El Tinter, 2002. 468 p. ISBN: 84-8301-625-7.
2. Boletín INIA. *Medición de presión y caudal*. Punta Arenas, Chile, 2000, No. 28. ISSN 0717-4829.
3. CÁRDENAS, Nelson. *Protocolo de encaminamiento para redes inalámbricas de sensores en aplicaciones de monitoreo y control*. España: Universidad Complutense de Madrid, 2009. 117 p.
4. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de la Frontera Colombia. *Medición de nivel*. [en línea]: <[http://www.inele.ufro.cl/apuntes/Instrumentacion\\_y\\_Control/Ivan\\_Velazquez/Catedra/Capitulo%202.3%20Nivel.pdf](http://www.inele.ufro.cl/apuntes/Instrumentacion_y_Control/Ivan_Velazquez/Catedra/Capitulo%202.3%20Nivel.pdf)>. [Consulta: 20 de enero de 2013].
5. GRANADA, Maricela; AYALA, Paul. *Estudio de la factibilidad de migración de los sistemas plant scape process de honeywell en npf y del sistema de control distribuido foxboro en spf a un sistema de rockwell automation en el boque 16, Repsol ypf*. Ecuador: Escuela Politécnica del Ejercito, 2009. 184 p.
6. HART Communication Foundation. *Wirelesshart technology*. [en línea]: <[http://www.hartcomm.org/protocol/wihart/wireless\\_technology.htm](http://www.hartcomm.org/protocol/wihart/wireless_technology.htm)>. [Consulta: 29 de enero de 2013].

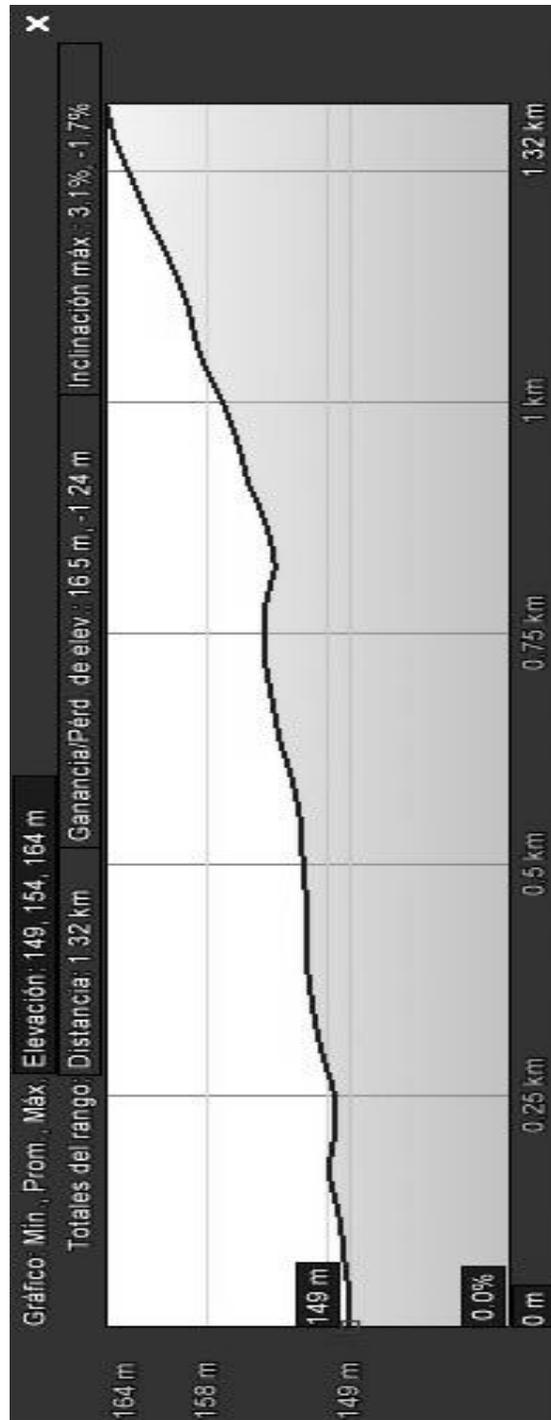
7. HERNANDEZ SEGURA, Julio César; PARRAO ROSALES, Elizabeth. *Diseño de enlace terrestre por línea de vista*. México: Instituto Politécnico Nacional, 2007. 118 p.
8. Honeywell. *Onewireless network*. [en línea]: <<http://www.honeywellprocess.com/en-us/explore/products/wireless/onewirelessnetwork/pages/default.aspx>>. [Consulta: 29 de enero de 2013].
9. LUX MONROY, Manuel Agustín. *Medidores de flujo en canales abiertos*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2010. 109 p.
10. RIAÑO SABOGAL, Diana Alejandra. *Estudios sobre la integración de redes de instrumentación digitales en sistemas de control para el mejoramiento de procesos industriales*. Bogotá: Universidad EAN, 2010. 70 p.
11. RODRIGUEZ, Antonio. *Desarrollo de una herramienta para la generación de interfaces graficas con redes de sensores inalámbricas*. Colombia: Universidad Politécnica de Cartagena, 2008. 104 p.
12. STEIGMANN, Richard; ENDRESEN, Jan. *Introduction to wisa*. [en línea]: <[http://www.millennialnet.com/millennialnet/media/resources\\_media/whitepapers/whitepaper\\_introductiontowisa\\_v2.pdf](http://www.millennialnet.com/millennialnet/media/resources_media/whitepapers/whitepaper_introductiontowisa_v2.pdf)>. [Consulta: 29 de enero de 2013].

13. Universidad de Vigo. *Control de procesos: de la señal de planta hasta el algoritmo de control, muestreo de señales*. [en línea]: <[http://www.eueti.uvigo.es/files/material\\_docente/478/muestreodesenales.pdf](http://www.eueti.uvigo.es/files/material_docente/478/muestreodesenales.pdf)>. [Consulta: 16 de enero de 2013].



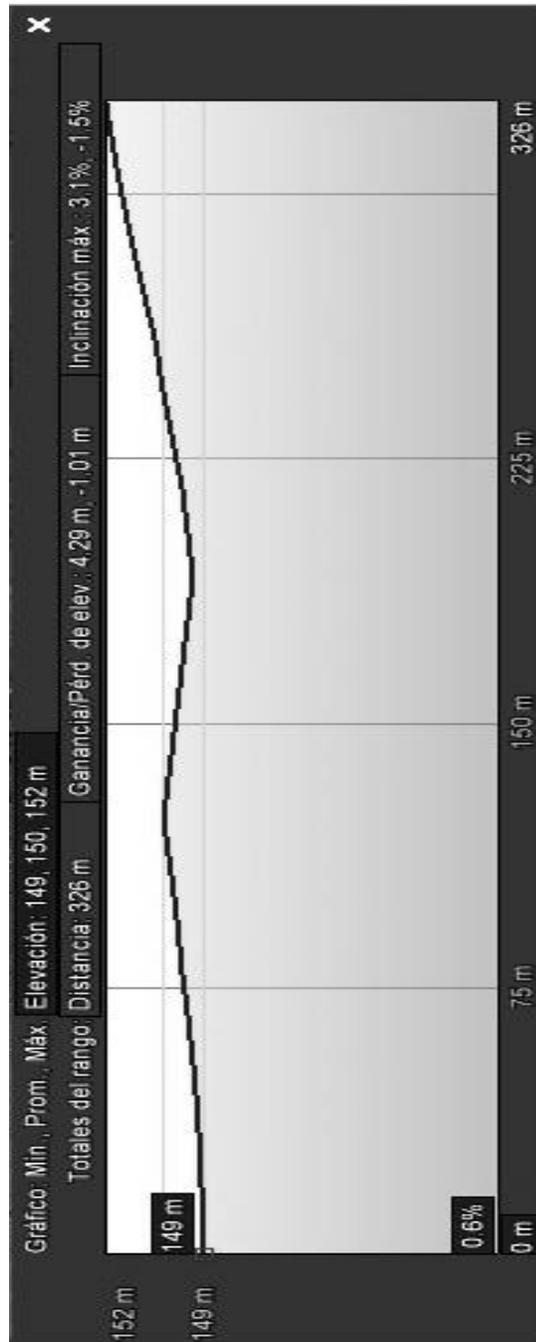
## **ANEXOS**

**ANEXO 1:** elevación de terreno, fábrica – entrada principal.



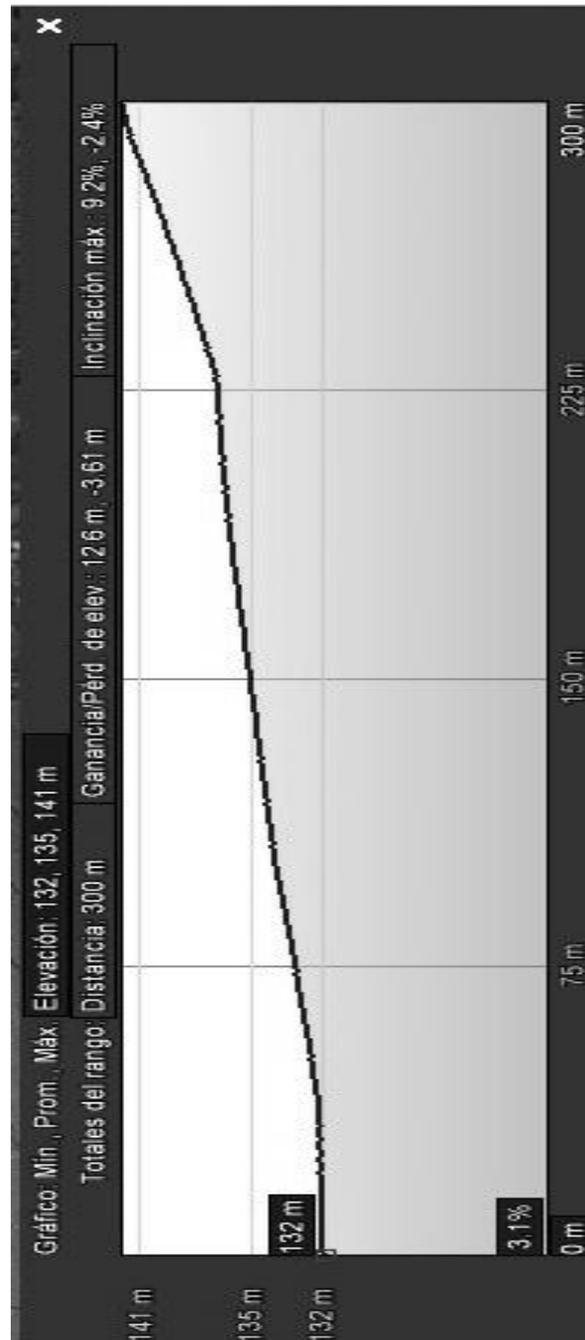
Fuente: elaboración propia con programa Google Earth.

**ANEXO 2:** elevación de terreno, fábrica – vertedero entrada.



Fuente: elaboración propia con programa Google Earth.

**ANEXO 3:** elevación de terreno, torre de enfriamiento – vertedero salida.



Fuente: elaboración propia con programa Google Earth.

## ANEXO 4: hoja técnica, medidor de nivel tipo radar.

Hoja de datos del producto

VEGA

### VEGAPULS 65

4 ... 20 mA/HART - cuatro hilos

Sensor de radar para la medición continua de nivel de líquidos



#### Campo de aplicación

VEGAPULS 65 es un sensor de radar para la medición continua de nivel en líquidos en condiciones simples de proceso. El mismo es adecuado especialmente para la medición de nivel en depósitos con conexiones a proceso pequeñas y en condiciones de proceso simples. La antena de varilla delgada posibilita el montaje en aberturas del depósito pequeñas.

#### Su ventaja

- Operación sin mantenimiento gracias al método de medición sin contacto
- Gran disponibilidad de instalación gracias a la ausencia de desgaste y de mantenimiento
- Resultados exactos de medición independientemente de las condiciones de proceso

#### Función

Impulsos de microondas extremadamente cortos son emitidos por el sistema de antenas sobre el producto a medir, reflejados por la superficie del producto y captados nuevamente por el sistema de antenas. El tiempo desde la transmisión hasta la recepción de la señal es proporcional al nivel en el depósito. Un proceso especial de prolongación del tiempo posibilita la medición precisa y segura de los tiempos extremadamente cortos.

#### Datos técnicos

Rango de medida hasta	35 m (114.8 ft)
Error de medición	±8 mm
Conexión a proceso	Rosca a partir de G1½; 1½ NPT; bridas a partir de DN 50, 2"
Presión de proceso	-1 ... +16 bar/-100 ... +1600 kPa (-14.5 ... +232 psig)
Temperatura de proceso	-40 ... +150 °C (-40 ... +302 °F)
Temperatura ambiente, de almacenaje y de transporte	-40 ... +70 °C (-40 ... +158 °F)
Tensión de trabajo	
- Versión para bajo voltaje	9,6 ... 48 V DC, 20 ... 42 V AC, 50/60 Hz
- Versión para tensión de red	90 ... 253 V AC, 50/60 Hz
Calificación SIL	Opcional hasta SIL2

#### Material

Las piezas del equipos en contacto con el medio están hechas de PVDF, 316L o PTFE. El sello de proceso de FKM. Un resumen completo de todos los materiales y juntas disponibles se encuentran en el "Configurador" en [www.vega.com](http://www.vega.com) y "VEGA Tools".

#### Versiones de carcasas

Las carcasas se pueden suministrar en versión de dos cámaras en los materiales plástico, acero inoxidable o aluminio. Están disponibles en tipo de protección IP 66/IP 67.

#### Versiones electrónicas

Los equipos están disponibles en diferentes versiones electrónicas. Además de la versión HART de 4 ... 20 mA con dos o cuatro hilos, también son posibles versiones digitales con protocolo Profibus PA, Foundation Fieldbus y Modbus. Hay disponible otra versión HART con acumulador integrado.

#### Homologaciones

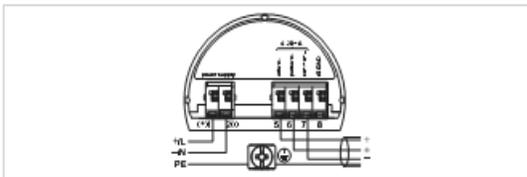
Los equipos están homologados para el empleo en áreas bajo riesgo de explosión p. Ej. según ATEX e IEC. Los equipos tienen además diferentes homologaciones náuticas p. Ej. GL, LRS o ABS. Informaciones detalladas se encuentran en [www.vega.com/downloads](http://www.vega.com/downloads) y "Homologaciones".

## Configuración

La configuración del equipo se realiza a través del módulo de indicación y configuración de uso opcional PLICSCOM o a través de un PC con software de configuración PACTware y DTM adecuado. Otras posibilidades de comunicación se tienen con un comunicador HART así como programas AMS™ o PDM.



## Conexión eléctrica

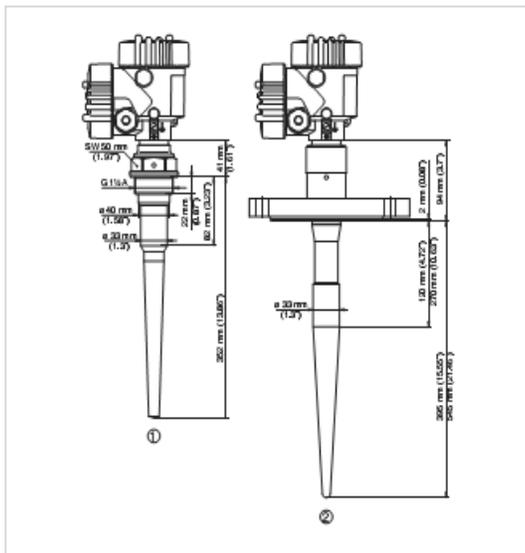


Compartimiento de conexión carcasa de dos cámaras

- 1 Alimentación de tensión
- 2 Salida de señal 4 ... 20 mA activa
- 3 Salida de señal 4 ... 20 mA pasiva

Detalles para la conexión eléctrica se encuentran en la instrucción de servicio del equipo en [www.vega.com/downloads](http://www.vega.com/downloads).

## Medidas



Medidas VEGAPULS 65

- 1 Versión roscada G1 1/2 A
- 2 Versión embreada DN 80

## Información

En [www.vega.com](http://www.vega.com) se encuentran informaciones más detalladas sobre el programa de productos de VEGA. en el área de descarga en [www.vega.com/downloads](http://www.vega.com/downloads) se encuentra Informaciones detalladas instrucciones de servicio, informaciones de productos, folletos ramales, documentos de homologación, planos de equipos y muchas cosas más. Allí están disponibles también archivos GSD y EDD para sistemas Profibus-PA así como archivos DD y CFF para sistemas Foundation-Fieldbus.

## Selección de equipo

Con el "Buscador" en [www.vega.com/finder](http://www.vega.com/finder) y "VEGA Tools" se puede seleccionar el principio de medición correspondiente para su aplicación. Informaciones detalladas sobre las versiones de los equipos se encuentran en el "Configurador" en [www.vega.com/configurator](http://www.vega.com/configurator) y "VEGA Tools".

## Contacto

Usted encontrará su representación correspondiente en nuestra página inicial [www.vega.com](http://www.vega.com).

## ANEXO 5: hoja técnica, transmisor inalámbrico.

Technical Information

**Honeywell**

### Wireless Dual Analog Input Transmitters Series XYR 5000, Model WI55x Specifications - Americas

34-XY-03-04, May 2012

#### Function

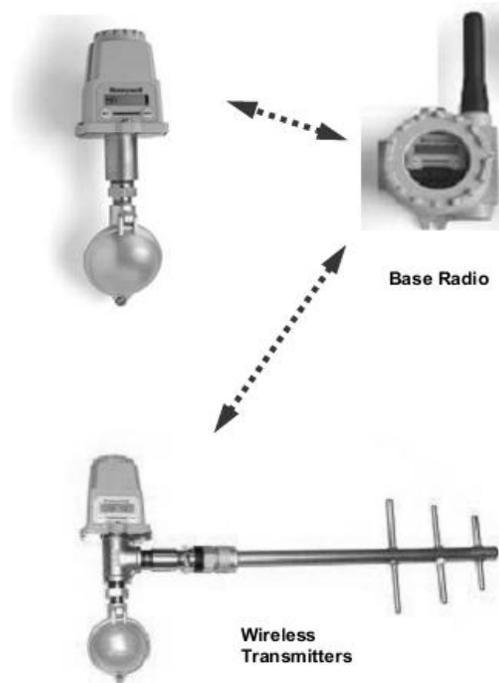
The WI55x Analog Input Field Transmitter is part of the XYR 5000 family of wireless products. It is used to add wireless capabilities to new or existing analog transmitters, such as pressure, temperature, level, flow meters, pH meters, or any device that has voltage (0 – 10 V) or current (4 – 20 mA) outputs. The Smart Response Manager allows the transmitter to adapt to changing process conditions, allowing greater visibility to process variation. Smart Response Manager allows the user to set thresholds which, when exceeded, cause the transmitter to adjust sampling and data transmission rates. Optional discrete inputs are available for

- Monitoring process variables
- Discrete monitoring

The transmitter combines a high resolution signal conditioner, with a Radio Frequency (RF) transceiver operating in the 900MHz ISM license-free band. Communication is a digital protocol, using Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS). FHSS ensures data integrity by continually switching the carrier wave over a wide range of frequencies. Power is supplied by a C size 3.6 V lithium battery, with an expected lifetime of up to five years.

Enjoy the benefits of wireless technology today:

- Improve Product Quality
- Ensure High Uptime
- Reduce Maintenance and Operational Costs
- Meet Regulatory Requirements
- Enhance Flexibility



**Multi-Input**

Model #	INPUTS	INPUT CHARACTERISTICS
WI551	Two 4 – 20 mA inputs	10 ohms
WI552	Two 0 – 10 volt inputs	100 k ohms
WI553	Two 4 – 20 mA inputs	10 ohms
WI554	Two 0 – 10 volt inputs	100 k ohms

**Wireless General Specifications**

<b>Wireless Communication</b>	902 MHz – 928 MHz Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS) FCC certified ISM license-free band Every data block transmitted is verified (CRC check) and acknowledged by the Base Radio	
<b>RF Transmit Power</b>	31 mW, 17.8 mW typical	
<b>Data Rate</b>	Configurable: 4.8 Kbps, 19.2 Kbps, or 76.8 Kbps	
<b>Antenna</b>	<b>Omnidirectional</b>	<b>Yagi Directional</b>
	Internal 3" omni-directional, ¼ wave, monopole	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Length: 18"</li> <li>• Gain: 6 dBd</li> <li>• Weight: 1.5 lbs</li> <li>• Polarization: Vertical</li> </ul>
<b>Signal Range</b>	Up to 2000 feet (600 meters) from Base Radio with clear line of sight*	Up to 5000 feet (1500 meters) from Base Radio with clear line of sight*

\*Actual range may vary depending on site topography.

**Performance**

<b>Accuracy (linearity and hysteresis)</b>	±0.1% of full scale reading at Reference Conditions (24°C, 75°F)
<b>Ambient Temperature Effect</b>	±0.01% of reading per °C
<b>Resolution</b>	24-bit A/D converter

**Discrete Inputs (Optional)****Discrete Input Switch (Dry Contact Only, no Voltage or Current Allowed)**

<b>Maximum Impedance at Input</b>	1 K ohm
<b>Isolation</b>	110 K ohms between Output (-) and Input (-)
<b>Wiring</b>	Plug – Wire Size 28 to 16 gauge maximum
<b>Warning</b>	No external voltage or current shall be applied to input terminals

**Device Configuration**

<b>Parameter Configuration</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• RF Channel Setup: 1 to 16</li> <li>• Baud Rate: 4.8 Kbps, 19.2 Kbps, 76.8 Kbps</li> <li>• RF ID: 1 to 100</li> <li>• Password</li> <li>• Tag Name (up to 21 characters)</li> <li>• Normal Transmit Rate: (1–5 sec, 10 sec, 15 sec, 20 sec, 40 sec, 1 min)</li> <li>• Normal Sampling Rate: (1–10 sec, 15 sec, 20 sec, 30 sec, 1 min)</li> <li>• Abnormal Transmit Rate: (1–5 sec, 10 sec, 15 sec, 20 sec, 40 sec, 1 min)</li> <li>• Abnormal Sampling Rate: (1–10 sec, 15 sec, 20 sec, 30 sec)</li> <li>• Analog Input Normal Upper Value: Disabled/Enabled. Enabled to change Sampling and Transmit rates during abnormal process conditions</li> <li>• Analog Input Normal Lower Value: Disabled/Enabled. Enabled to change Sampling and Transmit rates during abnormal process conditions</li> <li>• Engineering Units: Current model (mA/A); Voltage model (V/mV)</li> <li>• Offset: User defined offset will be transmitted instead of actual value</li> <li>• Trim: Applies a user-defined one- or two-point correction curve to the actual value</li> <li>• Discrete Input parameters configured from the Wireless Management Toolkit</li> </ul>
<b>Configuration Panel</b>	<p>Integrated LCD display with membrane switch buttons for local configuration. LCD display is 7-digit (alternating) high contrast, anti-reflective monochrome. Display cycles between input 1, input 2, and RF status.</p>

**Site Survey Tools**

<b>RSSI</b>	Received Signal Strength Indicator displays the RF signal strength in one of seven ranges.
<b>Link Test</b>	Link Test measures the wireless link performance of a transmitter running in normal operating mode. This function looks at wireless performance in both directions, from the transmitter to base radio and vice versa and assigns a rating to that performance or quality of signal.

**Features**

<b>Automatic Re-transmit</b>	<p>The field unit checks with the base radio to insure successful receipt of data. If data was not received, the transmitter retries on the next RF cycle. Ensures communication confidence in the harshest of industrial environments. At the maximum transmit rate this feature is inactive.</p>																				
<b>Battery Life Saver</b>	<p>To save conserve battery power, all field units will attempt to synchronize with the network using the following technique:</p> <table border="0" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"><u><b>Time</b></u></td> <td style="width: 50%; vertical-align: top;"><u><b>Field Unit Synchronization Attempts and Attempt Delay</b></u></td> </tr> <tr> <td>0 – 1 minute</td> <td>Continuous Synchronization attempts</td> </tr> <tr> <td>1 – 10 minutes</td> <td>One attempt with a 10 second delay between attempts</td> </tr> <tr> <td>10 – 30 minutes</td> <td>One attempt with a 30 second delay between attempts</td> </tr> <tr> <td>30 – 60 minutes</td> <td>One attempt with a 1-minute delay between attempts</td> </tr> <tr> <td>1 – 12 hours</td> <td>Three-attempt burst with a 5-minute delay between attempts</td> </tr> <tr> <td>12 – 24 hours</td> <td>Three-attempt burst with a 10-minute delay between attempts</td> </tr> <tr> <td>24 – 36 hours</td> <td>Three-attempt burst with a 30-minute delay between attempts</td> </tr> <tr> <td>36 – 48 hours</td> <td>Three-attempt burst with a 1-hour delay between attempts</td> </tr> <tr> <td>48 + hours</td> <td>Three-attempt burst with a 2-hour delay between attempts</td> </tr> </table>	<u><b>Time</b></u>	<u><b>Field Unit Synchronization Attempts and Attempt Delay</b></u>	0 – 1 minute	Continuous Synchronization attempts	1 – 10 minutes	One attempt with a 10 second delay between attempts	10 – 30 minutes	One attempt with a 30 second delay between attempts	30 – 60 minutes	One attempt with a 1-minute delay between attempts	1 – 12 hours	Three-attempt burst with a 5-minute delay between attempts	12 – 24 hours	Three-attempt burst with a 10-minute delay between attempts	24 – 36 hours	Three-attempt burst with a 30-minute delay between attempts	36 – 48 hours	Three-attempt burst with a 1-hour delay between attempts	48 + hours	Three-attempt burst with a 2-hour delay between attempts
<u><b>Time</b></u>	<u><b>Field Unit Synchronization Attempts and Attempt Delay</b></u>																				
0 – 1 minute	Continuous Synchronization attempts																				
1 – 10 minutes	One attempt with a 10 second delay between attempts																				
10 – 30 minutes	One attempt with a 30 second delay between attempts																				
30 – 60 minutes	One attempt with a 1-minute delay between attempts																				
1 – 12 hours	Three-attempt burst with a 5-minute delay between attempts																				
12 – 24 hours	Three-attempt burst with a 10-minute delay between attempts																				
24 – 36 hours	Three-attempt burst with a 30-minute delay between attempts																				
36 – 48 hours	Three-attempt burst with a 1-hour delay between attempts																				
48 + hours	Three-attempt burst with a 2-hour delay between attempts																				

**Self Diagnostics**

Self-checking software and hardware that identifies and reports out of spec conditions, and field unit low battery voltage.

**Operating/Storage Conditions**

<b>Humidity</b>	95% RH (non-condensing).	
<b>Temperature</b>	Ambient Electronics:	-40 to +149/+185°F (-40 to +65/+85°C) (see Model Selection Guide)
	Display (Full visibility):	-4 to +158°F (-20 to +70°C)
	Display (Reduced visibility):	-40 to +185°F (-40 to +85°C)
	Storage:	-58 to +185°F (-50 to +85°C).

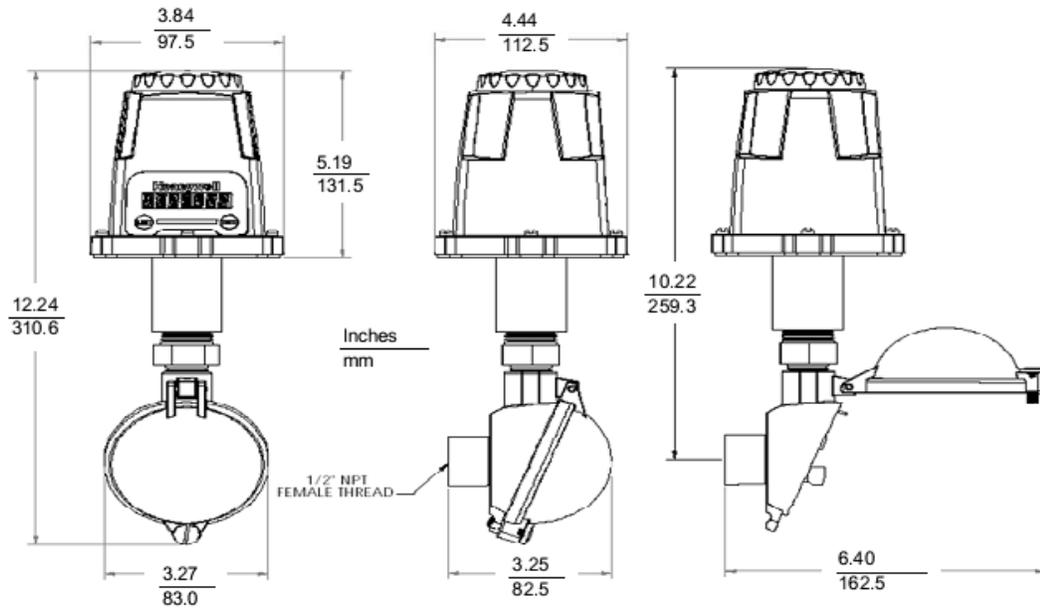
**Physical Specifications**

<b>Base</b>	Aluminum junction box.	
<b>Electronic Housing</b>	GE Lexan. V0 Rating and UV Stable.	
<b>Vibration and Shock</b>	Certified per IEC EN00068 2-6 (Vibration) and 2-27 (Shock)	
<b>Random Vibration</b>	Certified to withstand 6 g's, 15 minutes per axis from 9 – 500 Hz.	
<b>Net weight</b>	<b>With Omnidirectional antenna</b>	<b>With Yagi directional antenna</b>
	0.6 kg (1.2 lbs)	1.4 kg (2.7 lbs.)
<b>Electromagnetic Compatibility (CE Compliance)</b>	Operates within Specifications in fields from 80 to 1,000 MHz with Field Strengths to 10 V/m. Meets EN 50082-1 General Immunity Standard and EN 55011 Compatibility Emissions Standard.	

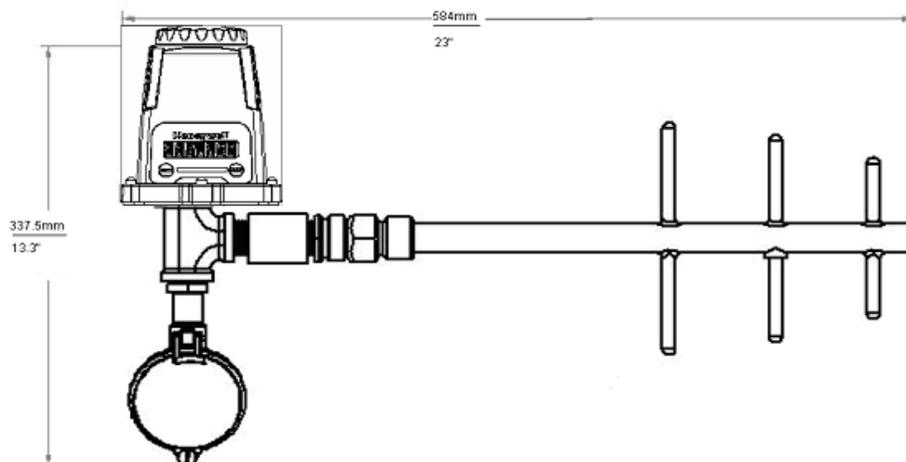
**Approvals**

<b>Environmental protection</b>	NEMA 4, IP 65.
<b>Combined FM/CSA</b>	FM – Intrinsically safe - Class I, Div. 1, Groups A,B,C,D,E,F,G,T4, Class I, Zone 0, AEx ia IIC T4, (Ta = -40°C to +85°C) Enclosure 4 CSA - Intrinsically safe - Class I, Div. 1, Groups A,B,C,D,E,F,G,T4, Class I, Zone 0, Ex ia IIC T4, (Ta = -40°C to +85°C) Enclosure 4
<b>Combined CE/ATEX</b>	CE EMC Conformity, ETSI EN 300 489-1 Intrinsically Safe, Zone 0/1: Ex II 1 G EEx ia IIC T4 (Ta = -40°C to +65°C) IP65 Non-Sparking, Zone 2: Ex II 3 G EEx nA, IIC T6 (Ta = -40°C to +85°C) IP65

**Dimensions (Omni directional antenna)**



**Dimensions (Yagi directional antenna)**



Fuente: <https://www.honeywellprocess.com/en-US/explore/products/wireless/input-output-devices/xyr-5000/Pages/xyr-5000-dual-analog-input.aspx>. Consulta: enero de 2013.

ANEXO 6: hoja técnica, radio base inalámbrica.

Honeywell

**XYR 5000**

**WBR/WBH**

**Wireless Base Radio**

34-XY-03-05 11/2006

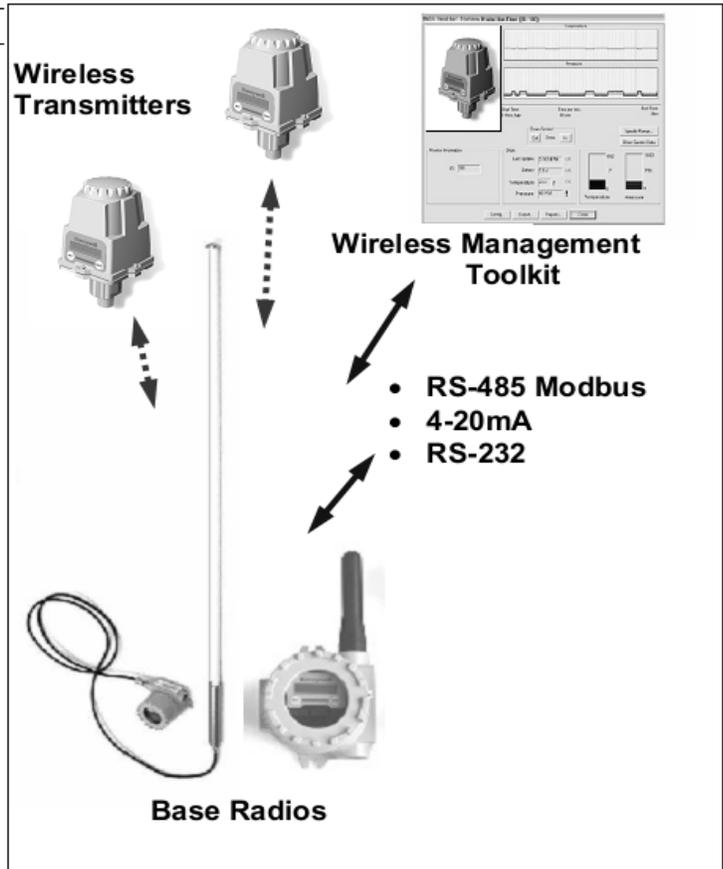
PRODUCT SPECIFICATION AND MODEL SELECTION GUIDE

**Function**

The Wireless Base Radio (WBR) is part of the XYR 5000 family of wireless products. It combines an RF transceiver and the interface to a SCADA, DCS, or data acquisition device. The WBR Radio Frequency (RF) transceiver communicates in a digital protocol, using Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS). FHSS ensures data integrity by continually switching the carrier wave over a wide range of frequencies. Each Wireless Base Radio can communicate with up to 100 field units. As part of its diagnostic capability, the Wireless Base Radio can identify and report field unit out of spec conditions, and low battery alarms. Multiple outputs are available. The Wireless Base Radio is easily configured using the local pushbuttons and display.

Enjoy the benefits of wireless technology today:

- Improve Product Quality
- Ensure High Uptime
- Reduce Maintenance and Operational Costs
- Meet Regulatory Requirements
- Enhance Flexibility



**MODEL**

Base Radio

Model #	INPUTS	OUTPUT
WBR	Up to 100 field units	<ul style="list-style-type: none"> <li>• RS-485 Modbus</li> <li>• 4-20 mA (Quad Analog Output module)</li> <li>• RS-232</li> </ul>
WBH	Up to 100 field units	<ul style="list-style-type: none"> <li>• RS-485 Modbus</li> <li>• 4-20 mA (Quad Analog Output module)</li> <li>• RS-232</li> </ul>

### WIRELESS GENERAL SPECIFICATIONS

<b>Wireless Communication</b>	902 MHz – 928 MHz Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS) FCC certified ISM license-free band. Every data block transmitted is verified (CRC check) and acknowledged by the Base Radio.	
<b>RF Transmit Power</b>	31 mW, 17.8 mW typical.	
<b>Data Rate</b>	Configurable: 4.8 Kbps, 19.2 Kbps, or 76.8 Kbps.	
<b>Scan Rate</b>	20 seconds @ 4.8 Kbps, 5 seconds @ 19.2 Kbps, 1.4 seconds @ 76.8 Kbps.	
<b>Antenna</b>	External 3" omni-directional, ½ wave, dipole.	<p>Remote High Gain Omnidirectional</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Available by itself, or with a lightning suppressor and 10 or 25 feet of cable.</li> <li>• Length: 65".</li> <li>• Gain: 6 dBd (less cable loss ≈ 0.04 dBm/ft).</li> <li>• Weight: 6 lbs.</li> <li>• Polarization: Vertical.</li> <li>• Material: Precision copper clad radiators enclosed in high density fiberglass, UV protected.</li> <li>• Mounting: Heavy wall gold anodized 1 ¼" aluminum with brackets.</li> </ul> <p>Base Radio coaxial cable</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Factory installed coax cable in 10 of 25 foot lengths</li> <li>• RG Type 8/U, Series Type RF 400, 10 AWG.</li> </ul>
<b>Signal Range</b>	Up to 2000 feet (600 meters) from Base Radio with clear line of sight.*	Up to 5000 feet (1500 meters) from Base Radio with clear line of sight.*

\*Actual range may vary depending on site topography. Yagi antenna option on field unit will increase signal range.

### DEVICE CONFIGURATION

<b>Parameter Configuration</b>	<p>RF Channel Setup: 1 to 16.</p> <p>Field Device Baud Rate: 4.8 Kbps, 19.2 Kbps, 76.8 Kbps.</p> <p>Serial Output: 9.6 Kbps, 19.2 Kbps, 38.4 Kbps, 57.6 Kbps, 115 Kbps.</p> <p>Number of field units: 1 to 100.</p> <p>Output:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• RS-485.</li> <li>• 4 – 20 mA (analog output via Quad output modules).</li> <li>• RS-232 (optional converter required).</li> </ul>
<b>Configuration Panel</b>	<p>Integrated LCD display with membrane switch buttons for local configuration.</p> <p>LCD display is 7-digit (alternating) high contrast, anti-reflective monochrome.</p> <p>Display cycles between field unit status, and RF status.</p>

**SELF DIAGNOSTICS**

Self-checking software and hardware that identifies and reports out of spec conditions, and field unit low battery voltage.
---

**OPERATING CONDITIONS**

<b>Humidity</b>	95% RH (non-condensing).
<b>Temperature</b>	Ambient Electronics: -40 to +185°F (-40 to +85°C) Display (Full visibility): -4 to +158°F (-20 to +70°C) Display (Reduced visibility): -40 to +185°F (-40 to +85°C) Storage: -58 to +185°F (-50 to +85°C).

**ELECTRICAL SPECIFICATIONS**

<b>Power connection</b>	Two terminals, 22 AWG power supply wire (GND, 24V).
<b>Signal connection</b>	Two terminals, use 2 wire shielded and protected 16 AWG. Additional two terminals are supplied for linking base radios.
<b>Grounding</b>	Earth grounding required.
<b>Power Supply</b>	External Supply Voltage, 12 – 30 VDC @ 0.2A. DIN rail mounted 120/240 VAC adapter (optional).

**PHYSICAL SPECIFICATIONS**

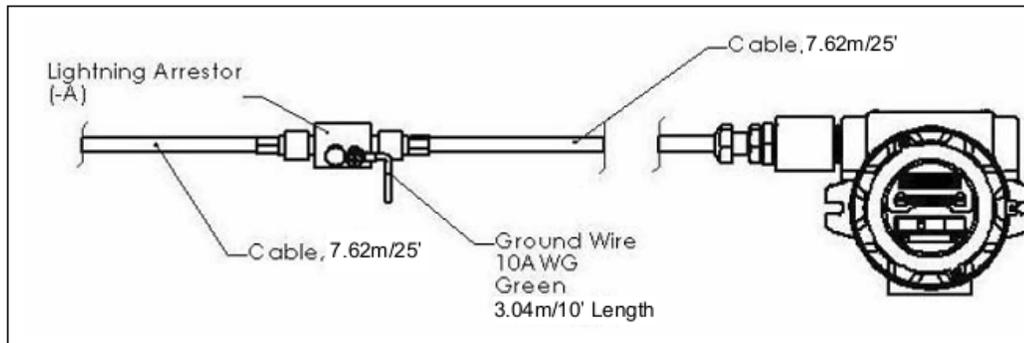
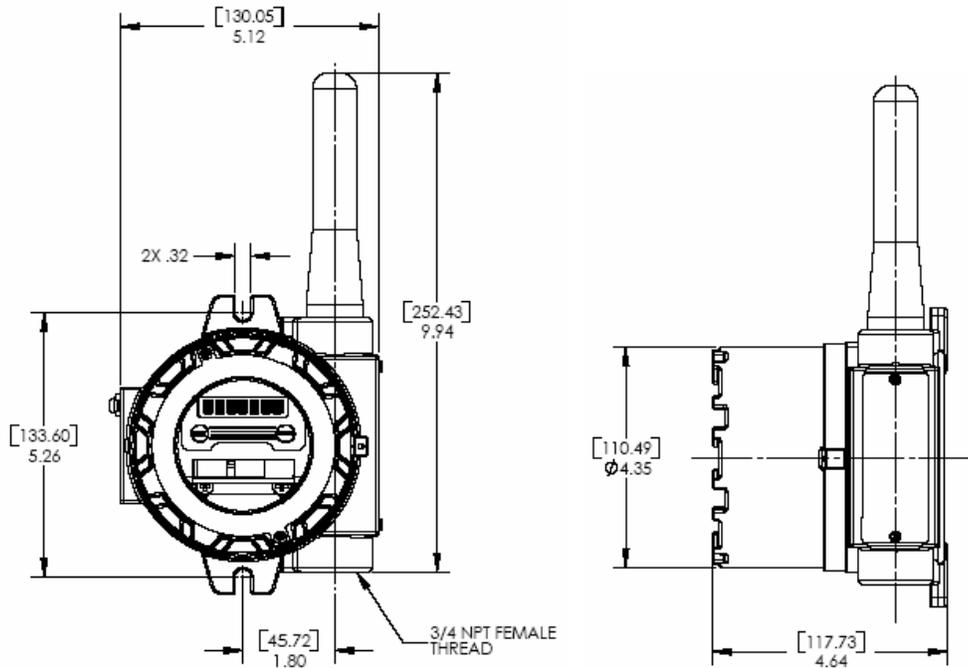
<b>Electronic Housing</b>	Baked enamel aluminum housing.
<b>Conduit Connection</b>	¾"-NPTF.
<b>Net weight</b>	2.5 kgs (5 lbs).
<b>Mounting</b>	Wall mount standard, or 2" pipe mounting bracket optional.

**APPROVALS**

<b>Environmental protection</b>	NEMA 4X, NEMA 7, IP 65
<b>Combined FM/CSA</b>	FM – Explosion proof - Class I, Div. 1, Groups B,C,D, T5,T6, Enclosure 4X Dust-Ignition proof - Class II, III, Div. 1, Groups E,F,G, T5,T6, Enclosure 4X CSA - Explosion proof - Class I, Div. 1, Groups B,C,D, T5, Enclosure 4X Dust-Ignition proof - Class II, III, Div. 1, Groups E,F,G, T5, Enclosure 4X
<b>CE</b>	CE EMC Conformity, ETSI EN 300 489-1
<b>ATEX (applied for)</b>	Flameproof, Zone 1 - Ex II 2 G EEx d IIC T5, T6; Enclosure IP 66/67

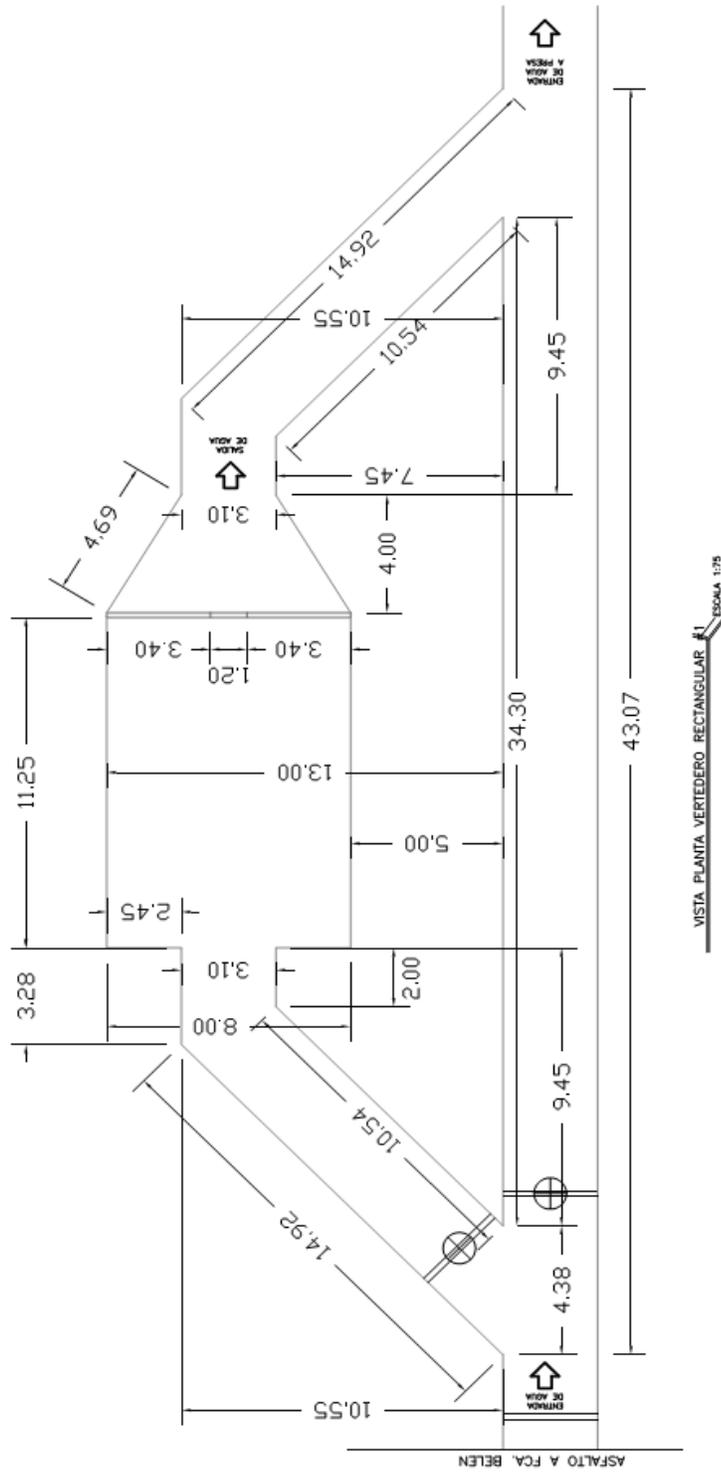
Note: WBH radio is not approved for hazardous locations.

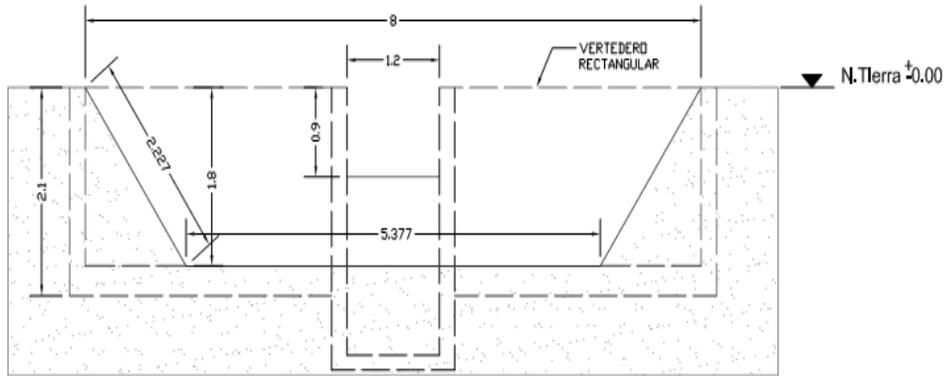
**DIMENSIONS**



Fuente: <https://www.honeywellprocess.com/en-US/explore/products/wireless/input-output-devices/xyr-5000/xyr-5000-network/Pages/xyr-5000-base-radio.aspx>. Consulta: enero de 2013.

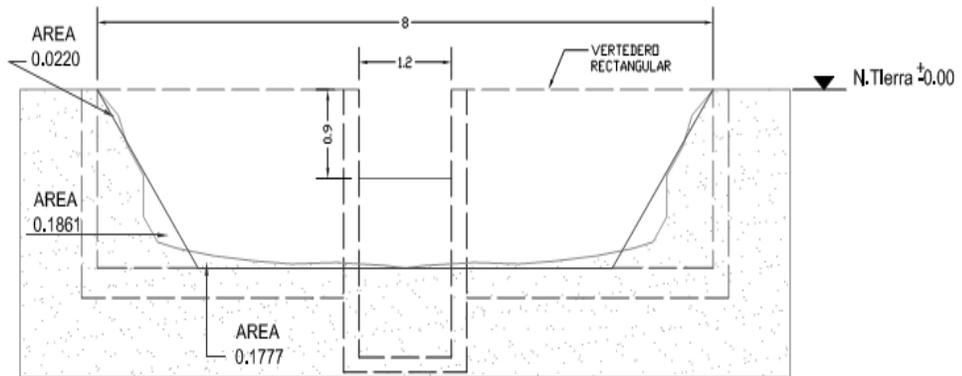
**ANEXO 7: plano, vertedero de entrada (medidas en metros).**





VISTA FRONTAL CORTE B-B'

ESCALA 1:75

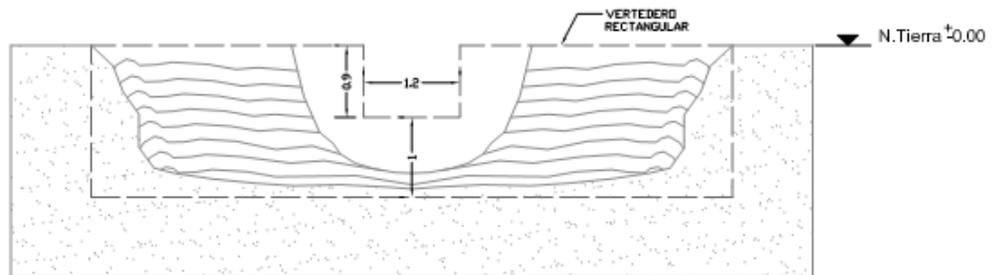
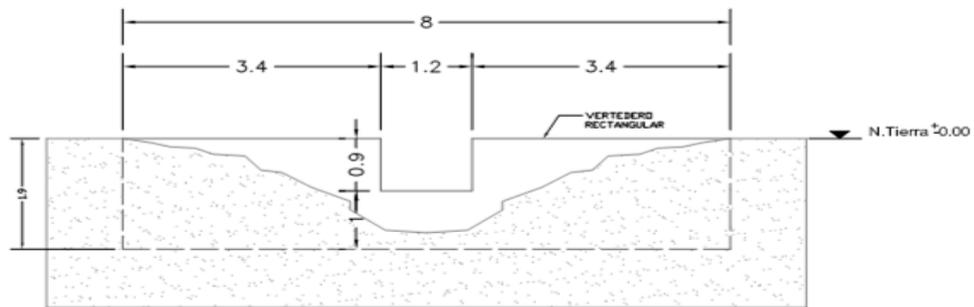


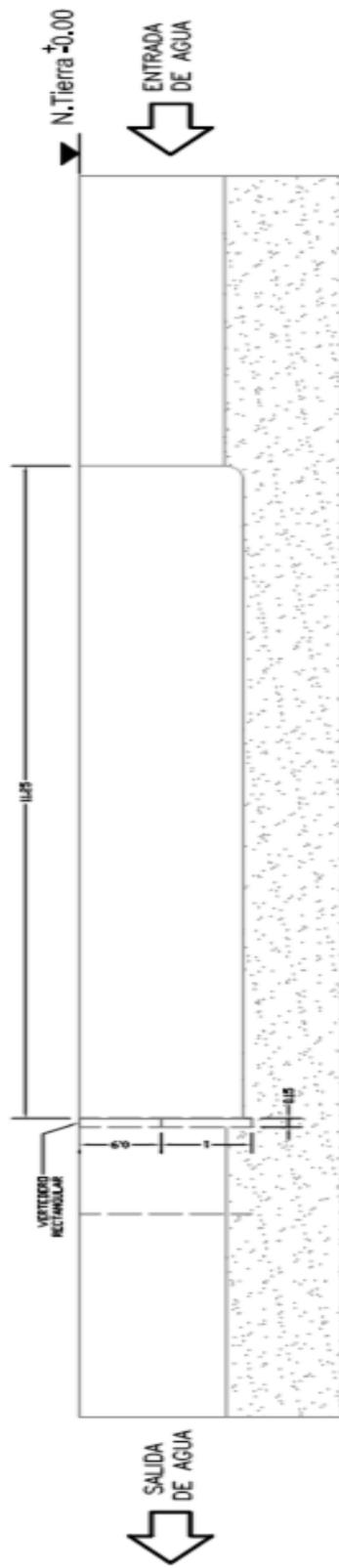
VISTA FRONTAL CORTE B-B'

ESCALA 1:75



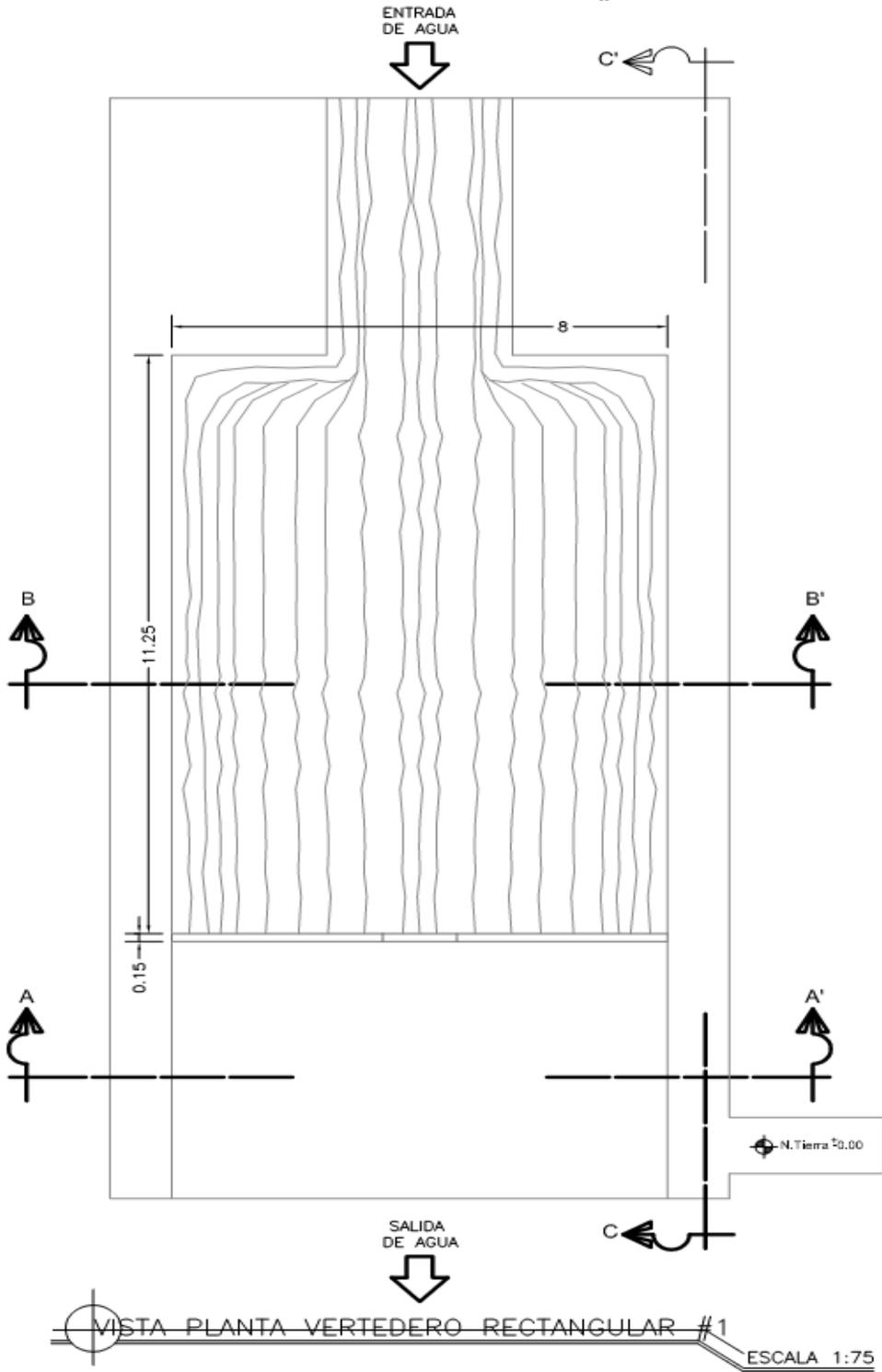
**ANEXO 8:** plano, vertedero de salida (medidas en metros).





VISTA LATERAL DERECHA CORTE C-C'  
 ESCALA 1:75

VERTEDERO RECTANGULAR # 1



Fuente: oficina de control de calidad de Ingenio La Unión.

