

# Ciencia

*La ciencia no es sino una perversión de si misma, a menos que tenga como objetivo final, el mejoramiento de la humanidad. Nicola Tesla, Inventor Austrohungaro.*

La actividad científica está orientada a satisfacer la curiosidad, y a resolver las dudas, acerca de cuáles son y cómo están organizadas las leyes de la naturaleza.

Seguros de que la comunidad científica nacional e internacional, utilizará la Revista MET&FLU como un medio para compartir los hallazgos de alta relevancia, cada semestre nuestros lectores encontrarán un tema de su agrado que facilitará la transferencia del conocimiento al ritmo que nuestra sociedad, nos lo exige.

## Exploración de Alternativas de Comunicación y Transmisión de Datos en Instrumentación Industrial

Alfredo Rafael Acevedo Pico [aacevedo@uis.edu.co](mailto:aacevedo@uis.edu.co)  
Universidad Industrial de Santander

César Augusto Almeida Ortega [calmeida@cdtdegas.com](mailto:calmeida@cdtdegas.com)  
Jhon Alejandro Angulo Pineda [jangulo@cdtdegas.com](mailto:jangulo@cdtdegas.com)  
Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas



## 1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, las exigencias asociadas a los sistemas de medición están en constante crecimiento. En particular los aspectos relacionados con el procesamiento de señal y capacidad de telemetría, que de la mano con la evolución de la electrónica, vienen marcando los avances tecnológicos en el área de la instrumentación. Dentro del campo de la telemetría, la confiabilidad, velocidad de transferencia, versatilidad, compatibilidad y distancia máxima de transmisión de las señales y protocolos de comunicación, se han presentado como los mayores desafíos a estos procesos de avance e innovación. En este sentido uno de los mayores avances se puede asociar con la posibilidad de brindar transmisión y recepción de datos por medio de sistemas de comunicación inalámbrica, dando un paso adelante en la facilidad y practicidad de todo aquello que por años resultó ser un trabajo dispendioso dentro de los sistemas de comunicación por cables.

Tomando este punto de partida y considerando que la innovación tecnológica aceptada en la industria se implementa gradualmente en razón, a que los cambios radicales de tecnología generan altas inversiones en el reemplazo de la instrumentación ya adquirida, en este documento se presenta la descripción del diseño y la construcción de un dispositivo capacitado para la comunicación inalámbrica de los datos provenientes de instrumentos de medición que utilicen el protocolo de comunicación HART (Highway Addressable Remote Transducer Protocol). Este dispositivo se, plantea como una solución adaptable, fácil de instalar y confiable, que constituya una alternativa para obtener transmisión bidireccional de datos sin emplear cables de comunicación.

El tema se inicia presentado una pequeña reseña de las posibilidades de comunicación más usadas en el campo de la instrumentación, continuando con una descripción de protocolo HART. Luego se discuten los aspectos relacionados con las ventajas de la comuni-

cación inalámbrica, para proseguir con la descripción del diseño del dispositivo. Por último se presentan los resultados obtenidos de la implementación del mismo utilizando un transmisor de presión, cerrando el tema con las conclusiones del trabajo realizado.

## 2. POSIBILIDADES DE CONEXIÓN

A través de la historia se han presentado múltiples opciones de señales y protocolos de comunicación industrial, algunos más populares que otros, pero en general todos enfocados hacia la necesidad de proporcionar confiabilidad, velocidad y seguridad en el intercambio de sus datos. La aparición de la instrumentación neumática (hace 40 años) para realizar el manejo de las variables de los procesos (presión, caudal, temperatura, etc.), hizo que el control y monitoreo dentro de las industrias adquiriera autonomía y confiabilidad. Posteriormente y ante desventajas en el control de las señales de procesos, se propicia la aparición de la instrumentación electrónica, que convertía las señales de variables de proceso a señales analógicas eléctricas de 4-20 mili Amper. Desde los años 70 con el surgimiento de MODBUS que se basa en la arquitectura maestro/esclavo, hasta el popular Profinet en 2001, han sido múltiples los desarrollos presentados dentro de las señales y los protocolos de comunicación en la industria. En la Figura 1, se presenta una línea cronológica que ubica los principales protocolos de comunicación dentro de las últimas cuatro décadas [1]. Junto con esto, la Figura 2 [2] muestra una descripción de las posibilidades reales que se pueden lograr a partir de los protocolos de comunicación más destacados dentro de los procesos de automatización en la industria.

Tomando como base las posibilidades de comunicación mencionadas en la Figura 2, se selecciona como elemento de comunicación para el dispositivo desarrollado, el protocolo HART. Este protocolo goza de gran aceptación debido a que dentro de sus capacidades

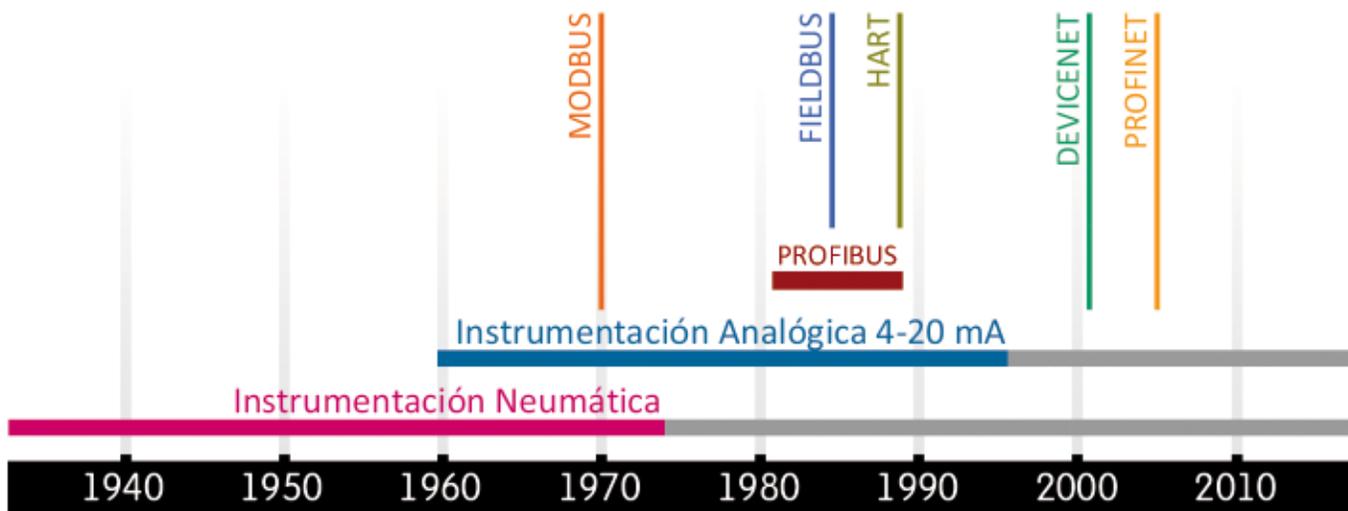


Figura 1. Línea de Tiempo surgimiento Protocolos de Comunicación Industrial.

		MÁXIMO DISPOS.	TASA TRANS. BPS	DISTAN. MÁX. KM	COMUNICACIÓN
MODBUS	Aplican para sistemas con control centralizado; es capacitado para supervisión de procesos por medio de estaciones remotas.	250/SEG	1.2 - 115.2 K	0.21 SEG 24 FIBRA	Maestro/ Esclavo
PROFIBUS	Se refiere a la norma de campo de alta velocidad en control de procesos, aplica en Europa con EN50170. Se clasifica en tres perfiles: DP (Decentralized Periphery), PA (Process Automation) y FMS (Fielbus Message Specification).	127/SEG	1.5 M - 12 M	0.35	Maestro/ Esclavo
FIELDBUS	Protocolo empleado para aplicaciones de control distribuido. Orientado a control de sistemas que requieran gran transferencia de datos a través de múltiples lazos de conexión.	240/SEG	100 M	1.9 CABLE	Simple/Multi Maestro
HART	Protocolo de comunicación que realiza intercambio bidireccional de datos a través del envío y recepción de una señal digital que viaja sobre el lazo de corriente analógica de 4 – 20 mA.	15/SEG	1.2 K	0.5	Maestro/ Esclavo
DEVICENET	Protocolo de comunicación utilizados en la industria para interconectar dispositivos de control para intercambio de datos. Las aplicaciones típicas incluyen el intercambio de información, dispositivos de seguridad, y grandes redes de control de entrada-salida.	2048 NODOS	500 K		Maestro/ Esclavo Multimaestro
PROFINET	Es un protocolo de comunicación que combina los principios de Profibus y Ethernet. Presenta una alta tasa de transferencia de datos.				

Figura 2. Características de Protocolos de Comunicación Industrial.

se incluyen la fácil implementación, seguridad y fiabilidad en la transmisión y recepción de datos. Luego de dos décadas de su aparición, se ha constituido en una herramienta clave dentro de la industria de instrumentación. Un claro ejemplo es la instalación Ormen Lange (ver Figura 3) que recibió el reconocimiento como planta del año, otorgado por HART Communication Foundation [3]. Dicha instalación constituyó un proyecto ambicioso que contrasta una amplia visión de innovación y proactividad partiendo de las necesidades de automatizar un extenso medio de producción y transporte de Gas Natural, basado en un Gasoducto Submarino de una longitud de 1200 km. El sistema de automatización instalado consta de cerca de 1400 dispositivos de campo que utilizan el protocolo HART, permitiendo una adecuada estrategia de mantenimiento preventivo como el medio idóneo para asegurar la mayor eficiencia de la planta.



Figura 3. Planta Ormen Lange. Tomado de [5]

### 3. PROTOCOLO HART

Luego de su desarrollo en los años 80's, por el fabricante de instrumentos Rosemount, el protocolo HART fue transferido en 1993 a la recién creada HART Communication Foundation. Desde entonces esta organización sin ánimo de lucro se encarga de realizar actualizaciones y revisiones al protocolo de comunicación HART [4]. Este proceso de optimización y mejora inició con la revisión 2 en 1987, continuando con las revisiones 3 y 4 en 1988 y 1989 respectivamente. Un cambio significativo se evidenció en la revisión 5 (1989) donde se realizó el ajuste en el direccionamiento de los dispositivos de campo. Por otro lado aunque la revisión 6 en 2001 fue generada no fue difundida, y finalmente ya en el 2007 se inicia la revisión HART 7, revisión que introdujo Wireless-HART. Actualmente el protocolo se encuentra en la revisión 7.2.

En concreto, HART es un protocolo de comunicación industrial digital bidireccional maestro-esclavo, que usa para el envío de la información digital el mismo par de cables que emplean los dispositivos de campo para proveer la señal analógica de 4-20 mA [5]. El protocolo HART implementa las capas 1, 2, 3, 4, y 7 de la Open System Interconnection (OSI). En el protocolo HART, la capa 1 o capa física permite superponer la comunicación digital sobre la señal analógica de 4 a 20mA sin que esta se vea afectada. La capa 2 o capa de enlace de datos, define el protocolo maestro esclavo, y la capa 7 o capa de aplicación, define la construcción de los mensajes que permiten la comunicación. En los siguientes numerales se presenta una descripción de las capas física y de aplicación.[6].

### 3.1 Capa física

HART está basado en el estándar Bell 202, estándar de comunicación telefónica que opera usando el principio de modulación FSK (Frequency Shift Keying) de fase continua [5]. La señal digital está compuesta por una senoidal de dos frecuencias, 1200Hz y 2200Hz que representan bits de 1 y 0 respectivamente (ver Figura 4) y debido a que el valor promedio de la señal FSK es siempre 0, el valor medio de la señal analógica de 4-20 mA permanece intacto.

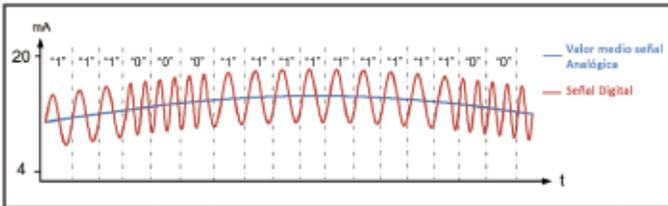


Figura 4. Señal HART

Los dispositivos maestros leen y proporcionan señales de tensión, sin embargo los esclavos o dispositivos de campo, leen y proporcionan señales de corriente, por esta razón se hace necesaria la conversión de corriente a tensión y viceversa. Esta conversión se logra a través de una resistencia de carga en el lazo de conexión como se muestra en la Figura 5. Otra característica importante de la capa física de HART son los niveles para las señales enviadas por el maestro y el esclavo, los cuales se presentan en la Tabla 1 [5]. En lo que se refiere a la forma de conexión se pueden operar en dos modos. El primero de ellos a través de conexión punto a punto (ver Figura 5), en la cual el lazo de 4 a 20 mA se usa para la comunicación de la variable principal, mientras que la señal digital permite el acceso a variables adicionales, como configuraciones o parámetros de operación y otros datos del dispositivo de campo. En este modo de conexión la comunicación se efectúa entre un maestro y un único esclavo. El segundo modo es la conexión multipunto (ver Figura 6), donde a diferencia de la conexión punto a punto, es posible efectuar la comunicación entre un dispositivo maestro y múltiples esclavos. Para esta forma de conexión toda la información acerca de los procesos y variables es transmitida digitalmente, por lo que se debe fijar la corriente de cada dispositivo a su valor mínimo (generalmente 4mA) [5].

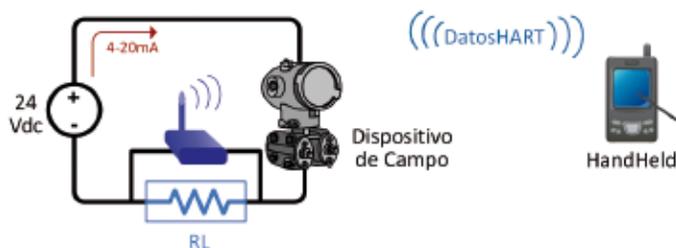


Figura 5. Lazo de Conexión Para un Dispositivo Hart Inalámbrico

Señal enviada por el maestro	
Valor mínimo [mVp]	Valor máximo [mVp]
200	300
Señal enviada por el esclavo	
Valor mínimo [mAp]	Valor máximo [mAp]
0.4	1.2

Tabla 1 Niveles de Señal

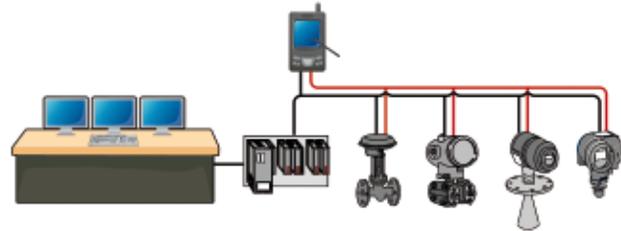


Figura 6. Conexión multipunto

### 3.2 Capa de Aplicación

La estructura del protocolo HART está constituida por mensajes conformados típicamente por 20 o 30 bytes. El mensaje HART (Figura 7) está compuesto por elementos o campos, iniciando por el preámbulo y finalizando en la suma de comprobación o chequeo. Cada uno de estos campos tiene una función específica en la implementación del protocolo. Los campos de preámbulo, inicio, conteo de bytes y suma de chequeo, se usan para sincronizar los mensajes y detectar posibles errores en la transmisión. Por otra parte los campos de dirección y comando indican, a que dispositivo de campo se envía el mensaje, y que tipo de función se desea implementar respectivamente.

Preámbulo	Inicio	Dirección	Comando
Conteo de Bytes	Estado	Datos	Suma de Chequeo

Figura 7. Mensaje HART

En particular el campo "dirección" está constituido por 5 bytes y contiene la dirección única de cada dispositivo, e indica a que esclavo se está enviando el mensaje, de donde proviene y si está implementado el modo ráfaga (el maestro instruye al dispositivo esclavo la transmisión continua de la respuesta a la petición). El único mensaje que tendrá respuesta exitosa al ser enviado sin la dirección única del dispositivo es el que implementa el comando 0, en este caso el campo de dirección consta de un solo byte, el cual contiene la dirección de encuesta del dispositivo (generalmente 0 aunque puede tomar cualquier valor entre 0 y 15). Por otro lado, el campo "comando" indica al esclavo la petición del maestro. Los comandos HART pueden tomar un valor de 0 a 253, y se encuentran clasificados en tres tipos: Comandos Universales, Comandos de Práctica Común y Comandos Específicos. Los Co-



**Figura 8.** Pasos para establecer comunicación con un dispositivo HART

mandos Universales implementan funciones que se encuentran disponibles en todos los dispositivos de campo con capacidad de comunicación HART, estos comandos proveen acceso a información útil en modos de operación normal (por ejemplo la lectura de variables y unidades); los Comandos de Práctica Común proveen funciones que se encuentran implementadas en una gran cantidad de dispositivos HART, pero no necesariamente en todos, y por otra parte los Comandos Específicos representan funciones que son únicas en cada tipo de dispositivo de campo y acceden a configuración e información de calibración y construcción del dispositivo [5].

### 3.3 Establecer comunicación

Para establecer comunicación con un dispositivo de campo haciendo uso del protocolo HART es necesario seguir la serie de pasos que se presenta en la Figura 8 :

## 4. POR QUÉ HART INALÁMBRICO?

Dada la potencialidad que hoy en día ofrecen los sistemas inalámbricos, HART ha decidido posibilitar el manejo de su protocolo dentro de las tecnologías Wireless. La flexibilidad en las conexiones, quizá se ha constituido en un factor vital para la gran acogida que la tecnología Wireless ha tenido dentro de la industria y con la cual se ha incrementado la eficiencia de los procesos de control que vigilan los dispositivos inteligentes basados en el protocolo HART.

Dentro de las necesidades que se presentan en las labores de configuración, inspección y mantenimiento de instrumentos de medición, se plantean ciertos factores claves que contribuyen al uso de tecnologías inalámbricas. Por ejemplo en muchas situaciones el usuario se encuentra con un ambiente poco favorable para realizar sus actividades en campo debido a la dificultad de acceso a la zona y extendido de un cableado para efectuar conexión con los instrumentos presentes en dicho lugar. Esta situación se convierte en el entorno propicio para llevar a cabo la instalación de un sistema de comunicación inalámbrico.

Aunque la concepción de la tecnología Wireless HART es el manejo integral y pleno de su protocolo en toda instrumentación, la tendencia que se está evidenciando es algo distinta. En países industrializados que han comenzado a vivenciar el cambio, han preferido

implementar un ajuste a los instrumentos HART ya instalados en sus plantas de operación, y habilitarlos para el manejo de la nueva tecnología Wireless. Para esto en el mercado se encuentran dispositivos llamados Adaptadores HART, que permiten a esta instrumentación alámbrica, ser controlados por medio de conexión inalámbrica [7],[8]. En cuanto a costo, se ha preferido ir migrando gradualmente hacia el nuevo protocolo Wireless HART, posibilitando así distintas opciones de exploración de estas nuevas tecnologías. Cuando se implementan dispositivos HART a través de medio cableado, la variable principal del proceso se lee mediante el lazo de 4-20mA. Los datos HART aunque se usan en el comisionamiento, no están conectados al sistema de control en tiempo real, además generalmente un gran porcentaje de los dispositivos inteligentes que se encuentran instalados proporcionan información limitada al usuario, dificultando así el análisis de información propia del equipo. Al hacer uso de un adaptador Wireless HART [9] en un instrumento ya instalado, se puede tener acceso a la toda información y herramientas de diagnóstico que este posee, aprovechando completamente las ventajas que la instrumentación inteligente proporciona.

## 5. ALTERNATIVA PROPUESTA

Luego de la revisión teórica que permitió establecer los requisitos de hardware y software necesarios para cumplir con las especificaciones de la capas física, de enlace de datos y de aplicación del protocolo HART, y tomado como base su estado actual (HART Revisión 7.2), se decidió diseñar y construir un sistema que permitiera al usuario establecer comunicación inalámbrica con dispositivos HART. A continuación se presenta una descripción de los diseños realizados tanto en Hardware como en Software; es oportuno aclarar que el hardware se ha desarrollado sin tomar en cuenta, que tipo de maestro se usará para implementar el protocolo HART; como único requisito el maestro debe poseer enlace Bluetooth con perfil de intercambio de datos, sin embargo parte del Software desarrollado se elaboró para una aplicación puntual, este aspecto se discute en el numeral 5.2.

### 5.1 Hardware

El Hardware se encuentra compuesto por 3 secciones (ver Figura 9), cada una con una tarea específica, y la posibilidad de realizar el flujo de datos en ambos sentidos (hacia el transmisor y desde el transmisor); a continuación se realiza una descripción de cada sección.



Figura 9. Diagrama del Sistema

### 5.1.1 Sección 1

Esta es la sección del hardware que permite el envío y la recepción de datos de forma inalámbrica. La selección de tecnología Bluetooth como medio de enlace entre el maestro y el esclavo, obedece a que esta, satisface los requisitos propuestos para la implementación del WirelessHART de acuerdo a la revisión HART 7.2 [10] (Operación en la banda de 2.4GHz, encriptación de datos, transmisión en "Spread Spectrum" con saltos de frecuencia, entre otros) y a los lineamientos del estándar IEEE 802.15.4-2006. Básicamente esta sección se encuentra constituida por el módulo Bluetooth BlueSMiRF del fabricante Sparkfun Electronics [11], su selección obedece a su bajo consumo de potencia, alcance de transmisión/recepción, posibilidad de realizar la configuración del módulo mediante comandos AT, varios modos de trabajo y soporte para varios perfiles Bluetooth. En este trabajo el BlueSMiRF opera virtualmente como un puerto serial, es decir, implementa la tecnología la Bluetooth para comunicarse directamente con el maestro (Computador, palm o handheld), pero al mismo tiempo mediante protocolo serial interactúa con la sección 2 del hardware (ver Figura 10).

### 5.1.2 Sección 2

Es esta sección la que permite realizar el enlace de datos entre las secciones 1 y 3, se debe resaltar que la totalidad del procesamiento de la información se lleva a cabo con un microcontrolador, el cual presenta las especificaciones técnicas necesarias para el control e interconexión de los dispositivos que conforman el sistema (numero de pines multipropósito disponibles, velocidad de procesamiento de datos, amplia capacidad de memoria, bajo consumo de potencia). Debido a que el microcontrolador no requiere circuitería externa para su funcionamiento todo su potencial es explotado mediante programación; este aspecto será tratado con más profundidad en el numeral 5.2.2.

### 5.1.3 Sección 3

Esta sección es la encargada de acondicionar las señales necesarias para establecer comunicación con el transmisor inteligente de acuerdo a la capa física de HART. Esta sección es la que reviste mayor dificultad en cuanto a la selección y diseño de los diferentes circuitos que la conforman; en razón a que es aquí donde se deben llevar a cabo los procesos de modulación y demodulación FSK, el filtrado de las señales de transmisión y recepción, así como su multiplexado (esto debido a la naturaleza "Half Duplex" del protocolo). El diagrama de flujo de datos se presenta en Figura 10.

La modulación y la demodulación en FSK de fase continua se han realizado con ayuda de un modem HART, más específicamente el HT2012 [12], el cual trabaja con señales cuadradas de niveles lógicos de 0 y 1, cuyas amplitudes corresponden a 0 y 3V respectivamente. Estas señales difieren de las señales propias del protocolo HART (señales senoidales), por lo que se hace necesario la implementación de filtros de entrada y salida que adecuen las señales para ser tomadas o incluidas en el lazo de 4-20mA.

El filtro de Entrada (Figura 11) debe transformar la señales senoidales que provee en su respuesta el dispositivo de campo a señales cuadradas que puedan ser leídas por el modem HART. Esta conversión de señal senoidal a señal cuadrada se logra por medio de dos etapas. La primera tiene como objetivo amplificar la señal enviada por el esclavo la señal a un nivel de tensión adecuado para lo cual se usa un amplificador operacional en configuración de inversor con ganancia de 4.5 v/v. En la segunda un amplificador operacional es usado en configuración de multivibrador asstable, básicamente esta configuración satura la salida hacia un nivel alto (tensión de alimentación) cuando la señal de entrada supera en amplitud una referencia preestablecida; esta característica permite que se use la señal senoidal amplificada como señal de entrada o de disparo [13], obteniendo a la salida la señal cuadrada requerida.

El filtro de salida (Figura 12) se encarga de transformar las señales cuadradas generadas por el modem HART en su proceso de modulación, en señales senoidales que puedan ser incluidas en el lazo de corriente de 4-20mA. Esto se logra implementando un filtro pasa-bajas con un amplificador operacional [14]. Cuando las señales cuadradas se hacen pasar por el

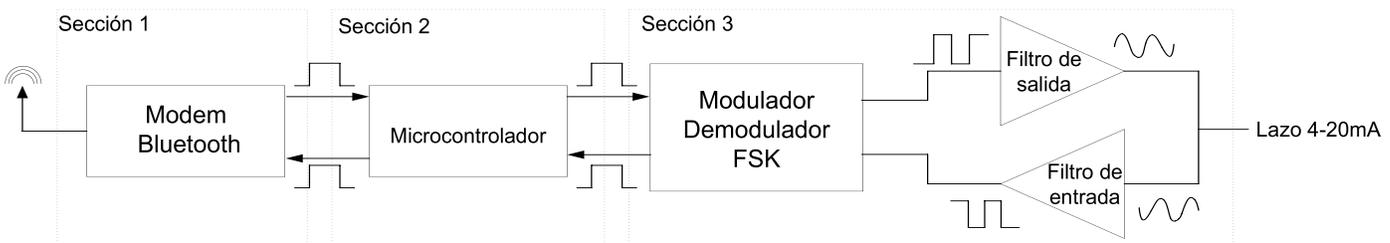


Figura 10. Diagrama de flujo de datos Hardware.

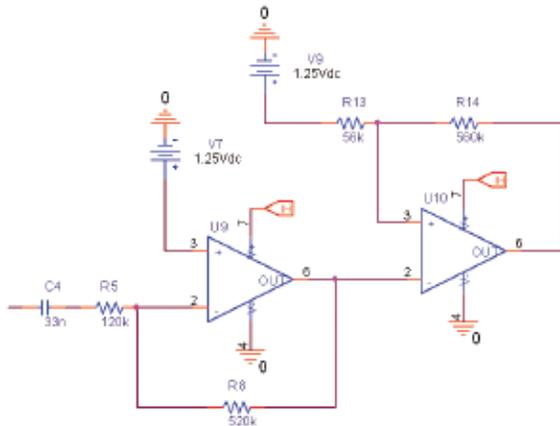


Figura 11 . Filtro de Entrada

filtro de salida las componentes de alta frecuencia son eliminadas, permitiendo solo el paso de las componentes principales (1200 y 2200 Hz), obteniendo como resultado señales senoidales en la salida.

Se mencionó con anterioridad por qué la señal digital no interfiere con la señal analógica. Pero un aspecto que quizá aun no se ha clarificado, es la forma en la que se evita que la señal analógica afecte la lectura de la señal digital; la clave, se encuentra en el acople de impedancias que se realice entre el maestro y el lazo de 4-20mA. Una forma sencilla de lograr el acople de impedancias necesario, es la inclusión de capacitancias de paso. Estas capacitancias deben ser calculadas con especial cuidado, considerando la impedancia de entrada o salida del filtro y la resistencia de carga del lazo de 4-20mA. Con la herramienta Pspice de Orcad se ha simulado la respuesta en frecuencia de los filtros de entrada y salida (incluidas las capacitancias de paso), los resultados se presentan en la Figura 13 y la Figura 14 respectivamente. Lo que importa observar es como ambos filtros permiten el paso de señales en el espectro de 1200 a 2200 Hz únicamente (frecuencias nominales del protocolo HART), mientras que la componente de continua es rechazada, evitando modificar la señal analógica y extrayendo del lazo de corriente sólo la información digital (señales senoidales).

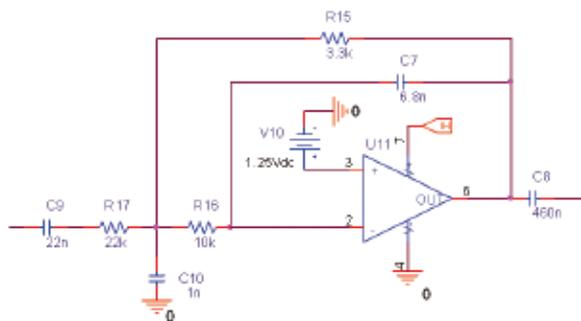


Figura 12. Filtro de Salida

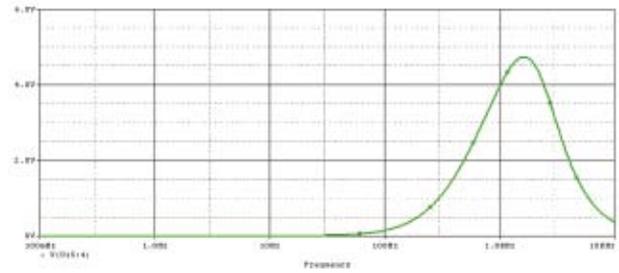


Figura 13. Respuesta en Frecuencia filtro de entrada

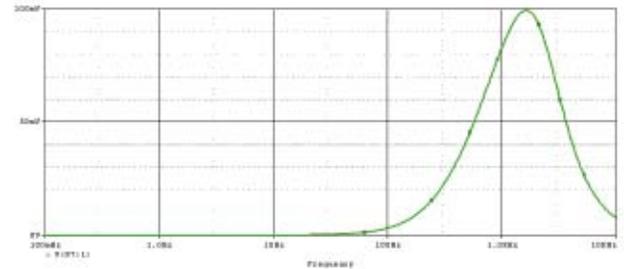


Figura 14. Respuesta en Frecuencia del filtro de salida

## 5.2 Software

Es necesario recordar que el software debe conformar los mensajes HART cumpliendo con la capa de enlace de datos y la capa de aplicación, es decir, debe manejar el protocolo maestro esclavo, estructurar los campos de cada mensaje (Figura 7), identificar y procesar la información correspondiente a la respuesta del dispositivo y evaluar el estado de la comunicación. Tomando esto como base, y debido a la naturaleza del sistema, se hace necesario el desarrollo de software para dos componentes, el primero un dispositivo que permita la visualización e ingreso de datos (teléfono celular, computador o palm) y el segundo el microcontrolador que compone la sección 3 del Hardware. Como se menciona en el numeral 5.1 el Hardware que se ha desarrollado es independiente del maestro que se use, sin embargo también se mencionó que parte del Software se desarrolló para una aplicación en particular, esto debido a la elección de un teléfono celular como maestro o medio para la visualización e ingreso de datos. Teniendo en cuenta este aspecto se describen a continuación las plataformas usadas para el desarrollo del software del teléfono celular y el microcontrolador y la función que cada uno desempeña en el sistema.

### 5.2.1 Teléfono Celular

Para la elaboración de la aplicación del teléfono celular se usó mobile-processing; herramienta que provee su propio IDE ("Integrated Develop Enviroment") y permite la elaboración de "sketches" o prototipos, que gracias a J2ME ("Java 2 Micro Edition") pueden ser ejecutados en dispositivos móviles [15]. Durante el desarrollo de este software fue necesaria la modificación de la librería Bluetooth [16], esto debido a la

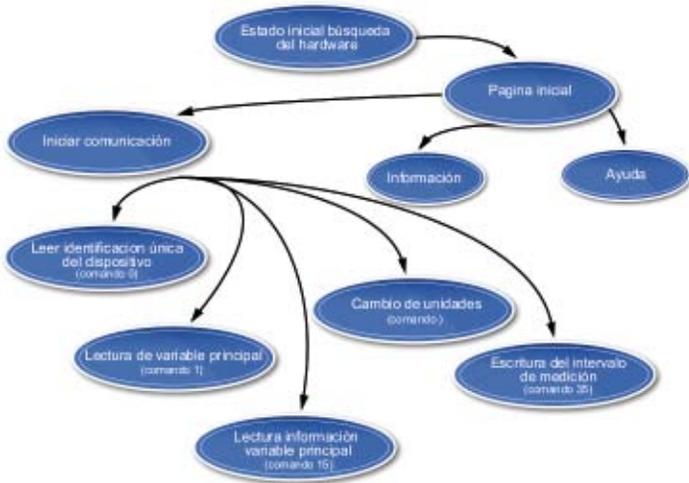


Figura 15. Diagrama de estados software teléfono móvil.

necesidad de emular un puerto serial dentro del perfil de Bluetooth orientado al intercambio de datos. El programa se encuentra estructurado por medio de estados (ver Figura 15). Los estados indican los posibles escenarios que pueda tomar el programa ante una acción ejecutada por el usuario, y a su vez cada estado posee un modo de estado, este modo de estado es el mecanismo que define que pantalla visualiza el usuario en cada uno de ellos.

### 5.2.2 Microcontrolador

La programación del microcontrolador se ha realizado con la plataforma Metroworker Codewarrior, haciendo uso de los lenguajes C y Assembler. Debido a las necesidades del sistema, se han programado dos módulos de comunicación serial, uno para la comunicación con el teléfono celular a través del modem Bluetooth y el otro para la generación de los mensajes a ser enviados al dispositivo de campo. En razón a que los mensajes del protocolo HART se encuentran muy bien definidos, es posible conocer de antemano la cantidad de bytes a recibir en cada mensaje y la información que cada uno contiene [17], permitiendo realizar un control estricto sobre la información que se envía, se recibe y se presenta al usuario, así como la determinación de errores en la comunicación y sus posibles causas.

El microcontrolador también realiza el control del inicio o fin de la modulación/demodulación FSK y el multiplexado de los datos enviados o transmitidos proporcionando las señales adecuadas al modem HART, convirtiéndose en el responsable de que los mensajes HART cumplan estrictamente con la capa de enlace de datos y la capa de aplicación estipulada por el protocolo. En esta aplicación en particular y debido a las limitaciones presentes en el teléfono celular, el microcontrolador es quien genera el mensaje HART, tomando la responsabilidad de generar cada campo (ver Figura 7), y enviar al teléfono móvil sólo la información a visualizar por parte del usuario.

## 6. PRUEBAS Y RESULTADOS

Parte importante del éxito de la comunicación radica en lograr que las señales que se envían al dispositivo de campo, cumplan estrictamente con los parámetros establecidos por el protocolo (amplitud, frecuencia, duración y estructura de la señal) en la capa física, de enlace de datos y de aplicación. Por esta razón antes de poner en marcha el sistema completo se realizaron verificaciones de cada una de las secciones del hardware diseñadas y del flujo de datos en el software desarrollado.

### 6.1 Modulación FSK y Filtro de Salida

En la Figura 16 se presenta la respuesta obtenida al usar el HT2012 para realizar la modulación FSK de fase continua (señal en color azul) tomando como entrada el mensaje HART construido por el microcontrolador (señal en color rojo).

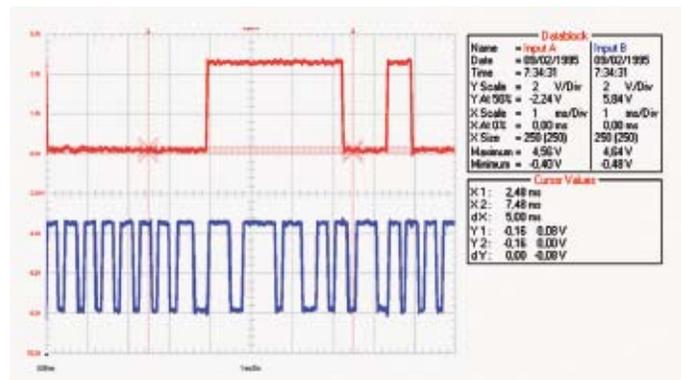


Figura 16. Modulación FSK

Con relación a la Figura 16 es necesario resaltar que en color rojo se presenta sólo una pequeña parte del mensaje HART. En esta figura se puede apreciar como la señal azul tiene una frecuencia de 2200Hz para un nivel de entrada bajo (0V) y una frecuencia de 1200Hz para un nivel de entrada alto (3V); además es fácil advertir que aunque la respuesta del modem HT2012 cumple con el estándar Bell 202, aún no cumple con la capa física de HART.

La respuesta del filtro de salida se presenta en la Figura 17. Como se mencionó anteriormente este filtro elimina las componentes de frecuencia fuera de la banda de 1200 – 2200 Hz, logrando que las señales cuadradas de entrada (señal en color rojo) provenientes del modulador FSK se conviertan en senoidales (señal en color azul). Quizá algo que no se percibe en la Figura 17 es el cambio en la amplitud de la señal, que pasa de 3.3Vp-p a 500mVp-p, este cambio en la amplitud responde a las especificaciones de la capa física de HART (ver Tabla 1).

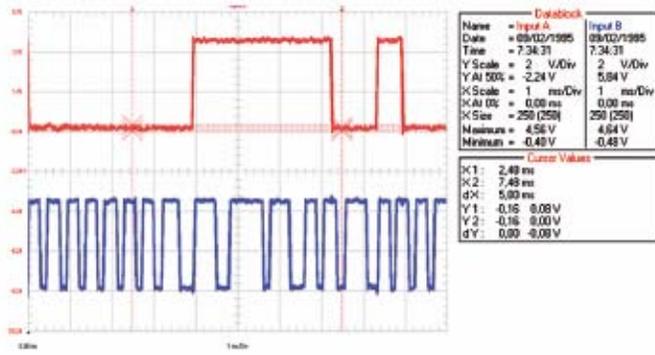


Figura 17. Respuesta Filtro de Salida.

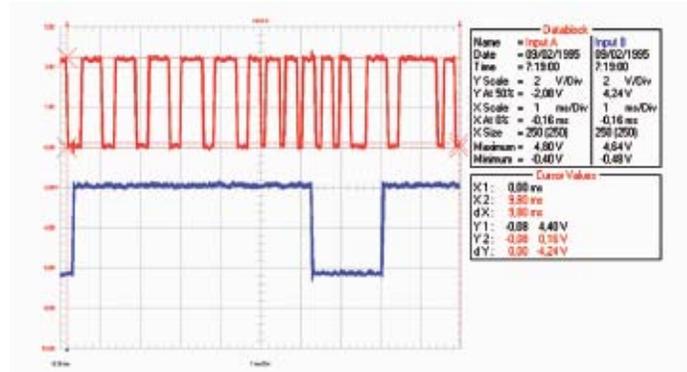


Figura 19. Demodulación FSK

## 6.2 Filtro de Entrada y Demodulación FSK

La respuesta temporal del filtro de entrada (Amplificador y Multivibrador) se muestra en la Figura 18. La señal digital de forma senoidal proporcionada por el dispositivo de campo (señal en color rojo) es amplificada para luego actuar como señal de disparo del multivibrador. Como consecuencia, la salida del filtro (señal en color azul) adquiere un nivel alto en los instantes en que la senoidal se encuentra en el semiciclo positivo y un nivel bajo cuando la senoidal se encuentra en el semiciclo negativo. La implementación de este filtro debe realizarse con especial cuidado, debido a la exactitud con la que se debe ubicar el nivel de referencia para el disparo; un nivel de referencia por debajo del ideal ocasiona que la señal cuadrada posea niveles bajos demasiado cortos, por otra parte un nivel de referencia por encima del ideal ocasiona que la señal cuadrada posea niveles altos demasiado cortos, particularmente en este trabajo el nivel de referencia mencionado era de  $1.25 \pm 0.02$  v. Entregar al demodulador una señal con duración de niveles altos y bajos diferentes puede desencadenar errores y pérdida de información.

En la Figura 19 se aprecia como al proporcionar al demodulador señales cuadradas apropiadas (señal en color rojo) se obtiene un nivel alto cuando las señales cuadradas poseen una frecuencia de 1200Hz, o un nivel bajo cuando las señales cuadradas poseen una frecuencia de 2200Hz. La señal demodulada (señal en color azul) ya es el mensaje HART (al igual que en la Figura 16 Sólo se muestra una pequeña parte del mensaje)

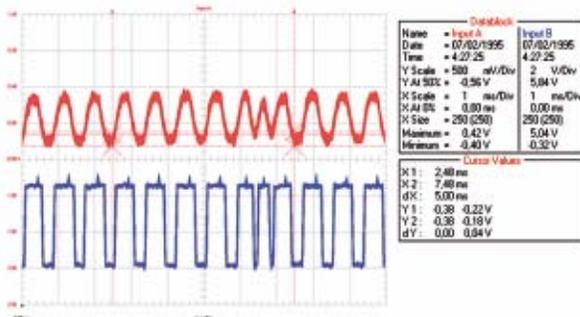


Figura 18. Respuesta Filtro de Entrada

Teniendo la certeza que el hardware diseñado permite cumplir con la capa física, de enlace de datos y de aplicación del protocolo HART, se iniciaron las pruebas de comunicación con un dispositivo de campo. Para tal fin se ha hecho uso de un transmisor de presión marca Honeywell, implementando el comando HART 0, observando en la prueba, la sensibilidad que poseen el dispositivo de campo a variaciones que puedan ocurrir con los tiempos de duración de las señales; se determinó que cambios de  $30\mu s$  en las señales moduladas en FSK ocasionan la no respuesta del mismo. Esto es crítico, debido a que esas variaciones pueden presentarse al realizar cambios de microcontrolador. La situación mencionada provocó que el módulo de comunicación serial se programara por completo en lenguaje Assembler, para tener total control en los tiempos de ejecución por medio de variables que pueden ajustarse según el comportamiento del microcontrolador. Algunas de las pantallas diseñadas para el programa del teléfono celular se presentan en la Figura 20, es importante observar que las pantallas poseen una interfaz gráfica sencilla que permite la navegación de forma intuitiva y la lectura de la información de forma clara y precisa.

Finalmente se realizan las pruebas del sistema completo, incluyendo el envío y la recepción por enlace Bluetooth con un teléfono celular, al transmisor de presión Honeywell, a un transmisor de presión Rosemount y a dos transmisores de temperatura Smart, logrando establecer comunicación e implementación de los Comandos Universales y de Práctica común presentados en la Tabla 2, para todos los casos.

Posteriormente se procedió a determinar el alcance de la transmisión y recepción. Se debe resaltar en este caso, que la distancia máxima de transmisión



Figura 20. Interfaz Software Celular

Comando HART 0 : Leer Identificación Única del Transmisor	
Datos requeridos	Ninguno
Datos en la respuesta	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Código de expansión del dispositivo.</li> <li>• Código de Identificación del Fabricante.</li> <li>• Tipo de dispositivo del Fabricante</li> <li>• Numero de preámbulos requeridos</li> <li>• Nivel de revisión de los comandos Universales</li> <li>• Nivel de revisión del documento del transmisor</li> <li>• Nivel de revisión del Software</li> <li>• Nivel de revisión del Hardware</li> <li>• Banderas</li> <li>• Número de identificación del dispositivo, 24bits MSB</li> <li>• Número de identificación del dispositivo, 24 bits LSB</li> <li>• Número de identificación del dispositivo, 24 bits LSB</li> </ul>
Comando HART 1: Lectura de variable principal	
Datos requeridos	Ninguno
Datos en la respuesta	Código de unidades de la variable principal. Variable principal (formato IEEE 754).
Comando HART 15: Lectura de Información de salida de la variable principal	
Datos requeridos	Ninguno
Datos en la respuesta	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Código de selección de Alarma</li> <li>• Código de la función de transferencia de la variable principal</li> <li>• Código de las unidades de los rangos de valores de la variable principal</li> <li>• Rango Superior de valores de la variable principal (formato IEEE754)</li> <li>• Rango Inferior de valores de la variable principal (formato IEEE754)</li> <li>• Valor de Damping de la variable principal. (formato IEEE754)</li> <li>• Código de protección de escritura.</li> <li>• Código del sello privado del Distribuidor</li> </ul>
Comando HART 35: Escritura de los rangos de la variable principal	
Datos requeridos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Código de unidades de los valores de los rangos superior e inferior</li> <li>• Valor del rango superior de la variable principal (formato IEEE754)</li> <li>• Valor del rango inferior de la variable principal (formato IEEE754)</li> </ul>
Datos en la respuesta	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Código de unidades de los valores de los rangos superior e inferior</li> <li>• Valor del rango superior de la variable principal (formato IEEE754)</li> <li>• Valor del rango inferior de la variable principal (formato IEEE754)</li> </ul>

Tabla 2. Comandos HART Implementados

y/o recepción viene determinada por el alcance del enlace Bluetooth del teléfono celular, debido a que el Modem Bluetooth usado en el hardware presenta un alcance de 106m (muy superior al de cualquier teléfono celular). Particularmente se ha usado el modelo 2760 de Nokia para realizar las pruebas, logrando una

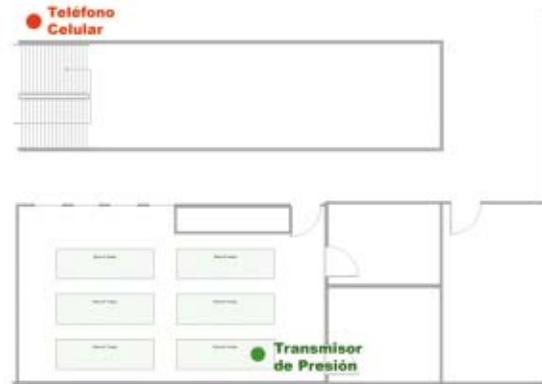


Figura 21. Espacio cerrado para pruebas de alcance.

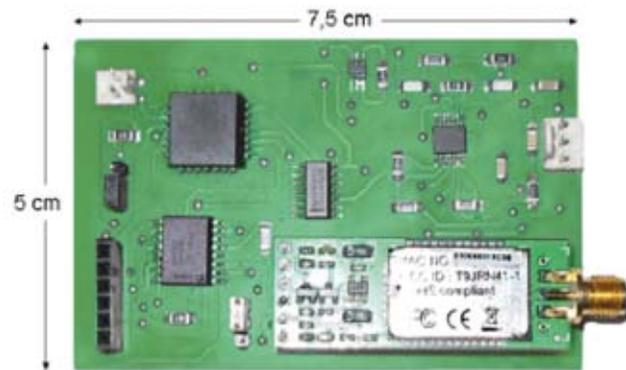


Figura 22. Sistema completo

distancia máxima de transmisión y recepción de: 25m en espacios abiertos y 20m en espacios cerrados o con obstáculos (ver Figura 21).

En la Figura 22 se presenta el sistema completo el cual posee un tamaño de 50mm de ancho por 75mm de largo, una autonomía aproximada de 15 horas con una batería de 750mAh (tomando como base un consumo promedio de 40mAh). Además se han dispuesto pines de conexión que proporcionan la posibilidad de reprogramación del microcontrolador.

## 7. CONCLUSIONES

Como se mencionó anteriormente, la revisión HART actual incluye en sus dispositivos la posibilidad de conexión WirelessHART, que proporciona una gran cantidad de ventajas en cuanto al manejo de datos, costos de cableado y mantenimiento, entre otras. Sin embargo debido a que la gran mayoría de los instrumentos de campo con habilidad de comunicación HART pertenecen a revisiones anteriores del protocolo, la industria ha optado por no reemplazar la instrumentación, sino adaptar la que poseen a WirelessHART, impulsando el desarrollo de dispositivos como el propuesto en este artículo.

El sistema completo muestra una aplicación puntual para el Hardware desarrollado. La aplicación provee a los dispositivos de campo fabricados antes de la revisión HART 7.2 (revisión actual), un enlace Bluetooth con el cual tienen la posibilidad de establecer comunicación de forma remota con un teléfono móvil o un computador portátil entre otros, y realizar configuraciones al sistema de unidades y al intervalo de medición, otorgando al operario simplicidad de conexión, para la adquisición de información propia del medidor y del sensor, además de la lectura de la variable principal.

Debido a la facilidad de configuración del módulo Bluetooth usado en el desarrollo y la versatilidad que proporciona el microcontrolador, el Hardware termina por convertirse en un “adaptador” para lograr que cualquier dispositivo con habilidad de comunicación HART sea conectado de forma remota usando un software estándar. Esto abre la puerta al aprovechamiento de todas las herramientas que presenta los instrumentos inteligentes que se comunican a través de este protocolo, usando una solución de bajo costo desarrollada en el país y con la posibilidad de configuración de acuerdo a las necesidades de los diferentes sistemas de medición que se pueden encontrar en transferencia de custodia o plantas de proceso.

## 8. REFERENCIAS

- [1] F. Ferreira, “Comunicaciones Industriales”, Departamento de Electrónica, Universidad de Buenos Aires, Argentina.
- [2] Portal de Automatización Industrial, “Informe Ethernet Industrial”. <http://www.infoplcn.net/>
- [3] M. Babb, “HART Keeps Ormen Lange Gas Flowing”, Control Engineering Europe.
- [4] HART Communication Foundation, “Protocol HART”, HART Communication Foundation, Austin Texas.
- [5] HART Communication Foundation, “Application Guide”, HART Communication Foundation, Austin Texas, 2005.
- [6] HART Communication Foundation, “About the HART protocol”. <http://www.hartcomm.org/>
- [7] G. Mitchell, “Instrumentación sin Hilos”, the International Society of Automation.
- [8] J. Maraña, “Instrumentación y Control de Procesos”, Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Valladolid, España.
- [9] HART Communication Foundation, “Wireless HART Technology”. <http://www.hartcomm.org/>
- [10] IEEE Std 802.15.4-2006, IEEE Standard for Information technology—Telecommunications and information exchange between systems—Local and metropolitan area networks—Specific requirements— Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs).
- [11] Roving Networks, RN-41 Class 1 Bluetooth Module, Version 3.1, 8/4/2009.
- [12] Smar Research, “HART Modem HT2012 Datasheet”, Smar Research Corporation.
- [13] B. Razavi, “Design of Analog CMOS Integrated Circuits (Feedback)” Berkeley California 2001, p 246-290.
- [14] B. Razavi, “Design of Analog CMOS Integrated Circuits (Basic MOS device physics)” Berkeley California 2001, p 9-46.
- [15] J. Moreno, “Introducción a Mobile Processing Versión 0.1”
- [16] T E, Kurt, “Hacking Roomba”, Extreme Tech, Wiley Publishing, Indianapolis, 2007.
- [17] ABB, “HART-Protocol Overview HART- commands for standard software”, Instruction Bulletin, 2001.