

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROGRAMADOR DE TRANSMISORES
DE PRESIÓN HONEYWELL BASADO EN EL PROTOCOLO HART**

**WALDER DE JESÚS CANOVA GARCÍA
ANDRÉS FELIPE GIRALDO OTERO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2007**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROGRAMADOR DE TRANSMISORES
DE PRESIÓN HONEYWELL BASADO EN EL PROTOCOLO HART**

**WALDER DE JESÚS CANOVA GARCÍA
ANDRÉS FELIPE GIRALDO OTERO**

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Electrónico

**DIRECTOR
ING. JOSE ALEJANDRO AMAYA PALACIO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2007**

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestros agradecimientos a las siguientes personas, por que sin ellos este proyecto no sería una realidad.

Al profesor Ing. José Alejandro Amaya Palacio por la correcta dirección del proyecto, además de su compromiso y colaboración en cada momento del proyecto.

A los profesores Ing. Ana Beatriz Ramírez y al Ing. Alfredo Rafael Acevedo por sus sugerencias y asesorías.

A nuestros padres por el apoyo en los momentos definitivos del proyecto y por que son los verdaderos patrocinadores del proyecto.

A la Universidad Industrial de Santander, especialmente a la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones por brindarnos recursos e implementos necesarios para la ejecución del proyecto y a sus profesores por darnos los conocimientos necesarios para desempeñarnos profesionalmente.

Y sobre todo a Dios, por mantenernos con la esperanza de finalizar este proyecto de grado.

CONTENIDO

	pág.
AGRADECIMIENTOS	5
CONTENIDO	6
LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABLAS	10
LISTA DE ANEXOS	11
RESUMEN	12
SUMMARY	13
1. PROTOCOLO HART	17
1.1 Instrumentos inteligentes y el protocolo HART	17
1.2 Arquitectura de red del protocolo HART	18
1.3 Señal HART	20
1.4 Estructura del mensaje HART	22
1.4.1 Preámbulo	23
1.4.2 Caracter de inicio (SD)	23
1.4.3 Dirección (AD)	23
1.4.4 Comando (Com)	24
1.4.5 Contador de bytes (BC)	28
1.4.6 Estado (Status)	28
1.4.7 Datos	28
1.4.7 Suma de comprobación (CHKS)	29
1.5 Estructura del protocolo HART	29
2. TRANSMISOR DE PRESIÓN INTELIGENTE HONEYWELL ST3000	31

2.1	HONEYWELL ST 3000.....	32
2.2	Compatibilidad HART	34
3.	MICROCONTROLADOR Y MODEM HART	36
3.1	Microcontrolador	36
3.1.1	Descripciones Generales.	37
3.1.2	Módulo de comunicación serial asincrónica (SCI).....	39
3.2.	MÓDEM HT2012	42
3.2.1	Descripción General	42
3.2.2	Presentación del Módem.....	42
3.2.3	Descripción de Pines	43
3.2.4	Operación del Módem	44
4.	DESARROLLO DEL DISPOSITIVO	48
4.1	Etapa de control y visualización	49
4.2	Etapa de codificación.....	55
4.3	Etapa de acondicionamiento de señal a onda senoidal.....	55
4.4	Etapa de acondicionamiento de señal a onda cuadrada	57
4.5	Etapa de Interfaz con el transmisor de presión	59
4.6	Dispositivo final.....	62
5.	IMPLEMENTACIÓN Y PRUEBA DEL DISPOSITIVO.....	64
	CONCLUSIONES	72
	RECOMENDACIONES	74
	BIBLIOGRAFÍA.....	76
	ANEXOS.....	79

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Arquitectura de red.....	18
Figura 2. Conexión Punto – Punto	19
Figura 3. Conexión Multipunto	19
Figura 4. Señal HART.....	20
Figura 5. Lazo de conexión simple.....	22
Figura 6. Estructura del mensaje HART	23
Figura 7. Transmisor de presión diferencial ST 3000	33
Figura 8. Diagrama de bloques del transmisor.....	33
Figura 9. Conexión típica de comunicación	35
Figura 10. Pines del microcontrolador MC68HC908GP32 40-Pin PDIP de Motorola	39
Figura 11. Circuito básico del microcontrolador MC68HC908GP32 de Motorola ..	41
Figura 12. El Módem HT2012	44
Figura 13. Generador de la señal de 460.8 kHz.	46
Figura 14. Señales en demodulación.....	47
Figura 15. Etapas acopladas, dispositivo final	48
Figura 16. Diagrama de flujo del software.....	53
Figura 17. Filtro de salida.....	56
Figura 18. Circuito Inversor de Tensión.....	57
Figura 19. Etapa Bandpass filter.....	58
Figura 20. Acoplamiento con transformador.....	59
Figura 21. Acoplamiento capacitivo	60

Figura 22. Conexión Esclavo – Maestro.....	60
Figura 23. Etapa <i>Hart Interface</i>	61
Figura 24. Foto del dispositivo por ambas caras	62
Figura 25. Circuito Dispositivo Final.....	63
Figura 26. Señal Etapa Control y visualización.....	66
Figura 27. Señal Etapa de codificación	66
Figura 28. Señal Etapa Acondicionamiento Onda Cuadrada	67
Figura 29. Señal HART	68
Figura 30. Comando 15.....	69

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Niveles de Señal HART	21
Tabla 2. Valores del Byte de Inicio	23
Tabla 3. Comandos Universales.....	25
Tabla 4. Comandos de práctica común	26
Tabla 5. Código de Estado	28
Tabla 6. Protocolo HART vs. Modelo OSI.....	30
Tabla 7. Distribución de pines del HT2012	43

LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO A Formato IEEE 754.....	80
ANEXO B Diseño del PCB	82
ANEXO C Manual del Dispositivo	85

RESUMEN

TITULO

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROGRAMADOR DE TRANSMISORES DE PRESIÓN HONEYWELL BASADO EN EL PROTOCOLO HART.*

AUTORES†: ANDRÉS FELIPE GIRALDO OTERO
WALDER DE JESÚS CANOVA GARCÍA

PALABRAS CLAVES: HART, PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN, TRANSMISORES DE PRESIÓN INTELIGENTES, MICROCONTROLADOR, HONEYWELL, LAZO 4-20mA, HAND – HELD, MODEM HT2012.

DESCRIPCIÓN

En el siguiente proyecto se pretende construir un dispositivo portátil que habilite la configuración de las medidas del transmisor de presión Honeywell, ubicado en el laboratorio de instrumentación electrónica. El transmisor de presión al igual que el dispositivo, se rigen por el protocolo de comunicación *Highway Addressable Remote Transducer* (HART). El dispositivo y la información obtenida en el desarrollo de este proyecto servirán de complemento para el curso de instrumentación electrónica, permitiendo a los docentes fundamentar en los estudiantes las bases teóricas y experimentales del protocolo HART.

El protocolo de comunicación HART aprovecha el lazo de 4 a 20 mA para la interconexión de instrumentos inteligentes sin modificar la estructura física existente. HART es principalmente, un protocolo maestro – esclavo. La señal HART es modulada digitalmente en *Frequency Shift Key* (FSK) y su estándar de comunicación es el BELL 202, es decir, se comunica con una tasa de transferencia de datos de 1200 bps y transmite en dos frecuencias diferentes, de la siguiente forma: un “1” lógico a 1200 Hz y un “0” lógico a 2200 Hz. Esta señal se transmite sobre el lazo analógico de 4-20mA. La señal de comando o señal del maestro al igual que la señal del esclavo, contienen una estructura predeterminada de mensaje según lo estipula el protocolo de comunicación.

Para la construcción del dispositivo se tuvieron en cuenta cinco etapas que tienen como objetivo: enviar, recibir y entender señales implantadas por el protocolo de comunicación HART. Estas etapas contienen un Microcontrolador GP32, un Módem HT2012, entre otros. Al final se estableció comunicación entre el dispositivo y un nuevo diseño que simula las respuestas del esclavo o transmisor de presión.

* Trabajo de Grado

† Facultad de Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director Ing. José Amaya

SUMMARY

TITLE

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROGRAMADOR DE TRANSMISORES DE PRESIÓN HONEYWELL BASADO EN EL PROTOCOLO HART.*

AUTHORS[†]: ANDRÉS FELIPE GIRALDO OTERO
WALDER DE JESÚS CANOVA GARCÍA

KEY WORDS: HART, PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN, TRANSMISORES DE PRESIÓN INTELIGENTES, MICROCONTROLADOR, HONEYWELL, LAZO 4-20mA, HAND – HELD, MODEM HT2012.

DESCRIPTION

In the following project it is sought to build a portable device that enables the configuration of the measures for a Honeywell pressure transmitter, located in the electronic instrumentation laboratory. The device and the pressure transmitter are governed by the communication protocol Highway Addressable Remote Transducer (HART). The device and the information obtained in the development of this project will serve as complement for the course of electronic instrumentation, allowing to the educational ones to base in the students the theoretical and experimental bases of the HART protocol.

The HART communication protocol takes advantage of the net of 4-20 mA for the interconnection of intelligent instruments without modifying the existent physical structure. HART is mainly, a master - slave protocol. The HART sign is modulated digitally in Frequency Shift Key (FSK) and its communication standard is the BELL 202, that is to say, it communicates with a rate of transfer of data of 1200 bps and it transmits in two different frequencies, in the following way: a 1 logical at 1200 Hz and a 0 logical to 2200 Hz. This sign is transmitted on the analogical net of 4-20mA. The command sign or the master's sign the same as the slave's sign, contain a predetermined structure of message according to the communication protocol.

For the construction of the device they were took in count five stages that have as objective: to sent, receive and to understand signs implanted by the HART communication protocol. These stages contain a Microcontroller GP32, an HT2012 Modem, among others. At the end it was settled down communication among the device and a new design that simulates the slave's or pressure transmitter answers.

* Degree Project

[†] Faculty Physic-Mechanics. School Engineering Electric, Electronic and Telecommunication. Director Eng. Jose Amaya.

INTRODUCCIÓN

En las industrias con equipos de campo, como las petroleras y procesadoras, es necesaria la lectura permanente de variables diversas de sus estanques, tuberías o máquinas para evitar pérdidas del producto, accidentes o simplemente una disminución de eficiencia en la producción. Los sensores electrónicos, válvulas electromecánicas y transmisores de presión son algunos de los instrumentos utilizados para poder monitorear y supervisar el estado operativo de los procesos. De ahí nace la importancia del mantenimiento, diseño, comunicación y control electrónico de estos instrumentos.

Se han diseñado sensores inteligentes que se pueden programar, configurar o calibrar de tal manera que se acoplen a los procesos en los que se van a utilizar. Estos aparatos tienen capacidad digital, por lo tanto tienen un procesador, memoria y puertos de entrada y salida. Se han desarrollado protocolos para poder entablar comunicación entre el usuario y los instrumentos electrónicos inteligentes, como por ejemplo MODBUS, PROFIBUS y AS-Interface. Pero existe un protocolo que aprovecha el lazo de 4-20 mA, importante en la implementación en instrumentos como transmisores de presión, para enviar señales digitales. Este protocolo de comunicación es llamado protocolo HART (*Highway Addressable Remote Transducer*).

Los transmisores de presión inteligentes pueden ser configurados desde una sala de control o en el mismo campo donde se encuentren, gracias a dispositivos portátiles que pueden ser conectados rápidamente al sensor. El objetivo de este proyecto es diseñar e implementar un dispositivo portátil que permita manipular los rangos de medida del transmisor de presión Honeywell. Se ha escogido esta clase de transmisor ya que son los que se encuentran en el laboratorio de

instrumentación electrónica de la escuela de ingeniería eléctrica, electrónica y telecomunicaciones. El dispositivo trabaja con comunicación HART ya que el transmisor se rige por este protocolo.

Este libro se divide en seis capítulos que describen lo que es el protocolo HART y lo que se implementó para el diseño y construcción del dispositivo portátil.

Como se anuncio antes, el protocolo de comunicación industrial que se empleó entre el transmisor y el dispositivo, es el modelo HART. Entonces toda la base teórica, sus comandos, funciones, estructura y operabilidad están descritas en el capítulo 1, donde se presenta la señal modulada en FSK para aprovechar el lazo de 4 a 20 mA que se incluye en los transmisores.

Como el uso de los transmisores de presión inteligentes es base fundamental para el desarrollo de la implementación del dispositivo, se expone en el capítulo 2 todo lo relacionado con los transmisores de presión, haciendo énfasis especial en los catalogados inteligentes y especializándose en la serie ST3000 de *Honeywell*, que posee entre sus características la aplicación con el protocolo HART. Aquí se incluye, el cómo se configura y como se instalan éstos transmisores para que queden operando bajo el protocolo de comunicación.

El capítulo 3 describe el funcionamiento y especificaciones de los integrados mas significativos del dispositivo, como el microcontrolador GP32 y el modem Hart HT2012, este último es el encargado de modular la señal del microcontrolador a una señal Hart.

El desarrollo, montaje y operación del dispositivo se describen en el capítulo 4 donde se presentan detalles y figuras de cada etapa del montaje hasta terminar con la construcción del dispositivo final.

En el capítulo 5 se presentan las pruebas realizadas tanto en cada una de las etapas como en el acoplamiento de las mismas. A partir de las pruebas se exponen los resultados y por consiguiente, el análisis de los mismos para determinar virtudes y culminación del proceso, ó fracasos y corrección de errores.

Para terminar en el capítulo 6 se presentan las conclusiones obtenidas en el desarrollo de todo el proyecto y algunas recomendaciones para dejar abierto el campo de las comunicaciones industriales.

1. PROTOCOLO HART

Este capítulo presenta toda la base teórica de lo que es el protocolo Hart y la clase de instrumentos que tienen esa capacidad, como son los instrumentos inteligentes. Para explicar de una mejor manera el protocolo se presenta su arquitectura de red, su forma de conexión, la forma de señal, la estructura del mensaje y para finalizar, una comparación entre el modelo OSI y el protocolo Hart.

1.1 Instrumentos inteligentes y el protocolo HART

Un instrumento inteligente, aplicado al área de instrumentación electrónica, es aquel sensor o transmisor que contiene un microprocesador, esto implicaría funcionalidad extra en comparación con los dispositivos que no están basados en microprocesadores, por ejemplo, un transmisor de presión inteligente permite la calibración y reestablecimiento de rangos; también puede proveer diagnósticos internos, y pruebas automáticas para simplificar los procedimientos de mantenimiento. Para hacer uso de estas ventajas, los dispositivos inteligentes requieren de un programador para que el usuario pueda instalar y controlar el instrumento. Se debe definir muy bien el sistema de comunicación que se va a utilizar entre el programador y el transmisor. Es necesario incluir esta comunicación en los cables ya existentes, señal analógica de 4-20 mA. Para ello *Fisher Rosemount* ideó un protocolo de comunicación, protocolo HART (*Highway Addressable Remote Transducer*), donde la señal analógica, la señal digital y la alimentación del equipo, son transmitidas por el mismo par de cables.

Para difundir el uso de la comunicación de dispositivos de campo basados en este protocolo, *Rosemount inc.* colocó a disposición del público el grupo de soporte

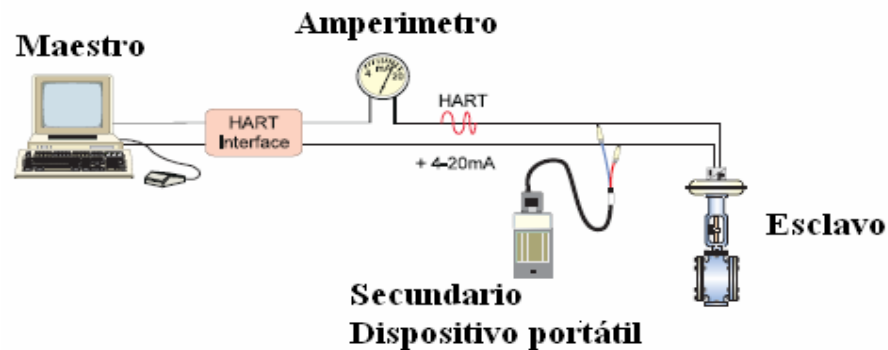
HCF (*HART Communication Foundation*). Este protocolo fue diseñado basado en el modelo OSI.

1.2 *Arquitectura de red del protocolo HART*

HART es principalmente, un protocolo maestro – esclavo, lo cual significa que un dispositivo de campo (esclavo) sólo transmite cuando el maestro lo encuesta. Existen dos tipos de maestros, el primario que es típicamente un computador o PLC (*Controlador Lógico Programable*), y el secundario que es un dispositivo portátil, el cual puede conectarse en cualquier punto de la red para comunicarse con los esclavos, sin interrumpir el proceso de comunicación.

En la figura 1 se puede observar la arquitectura de red.

Figura 1. Arquitectura de red

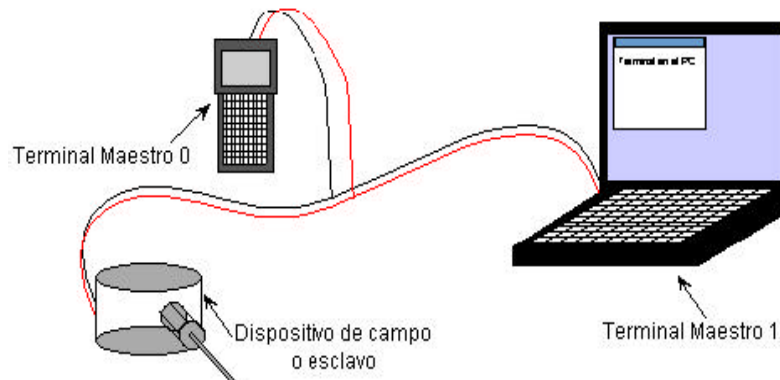


Fuente: Hart Tutorial

Para implementar un bus de comunicación se pueden hacer dos tipos de conexión: Punto a punto o Multipunto, según se conecten los instrumentos.

En la figura 2 se muestra la conexión punto a punto, que se utiliza para referirse a casos en los que solo existe un maestro y un esclavo, o un transmisor y un receptor.

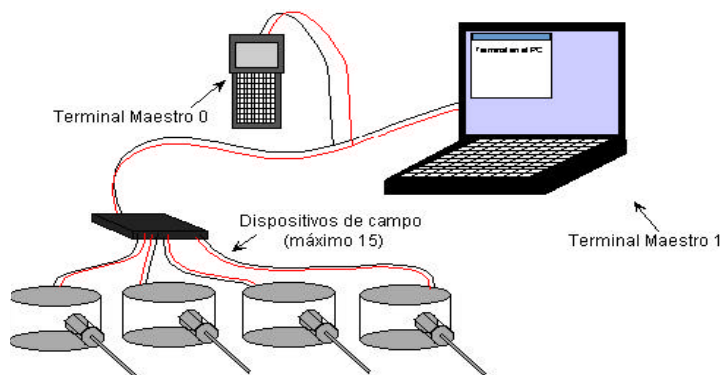
Figura 2. Conexión Punto – Punto



Fuente: Protocolo de comunicación Hart para los instrumentos de Flotech S.A.

En la conexión multipunto, mostrada en la figura 3, se hace posible conectar máximo 15 dispositivos de campo en paralelo a un simple par de cables, y comunicarse con cada uno por turnos para leer sus variables (u otros datos). Para hacer esto, cada dispositivo debe tener una dirección, a la cual responderá, y cada petición del sistema de control o maestro debe incluir dicha dirección.

Figura 3. Conexión Multipunto



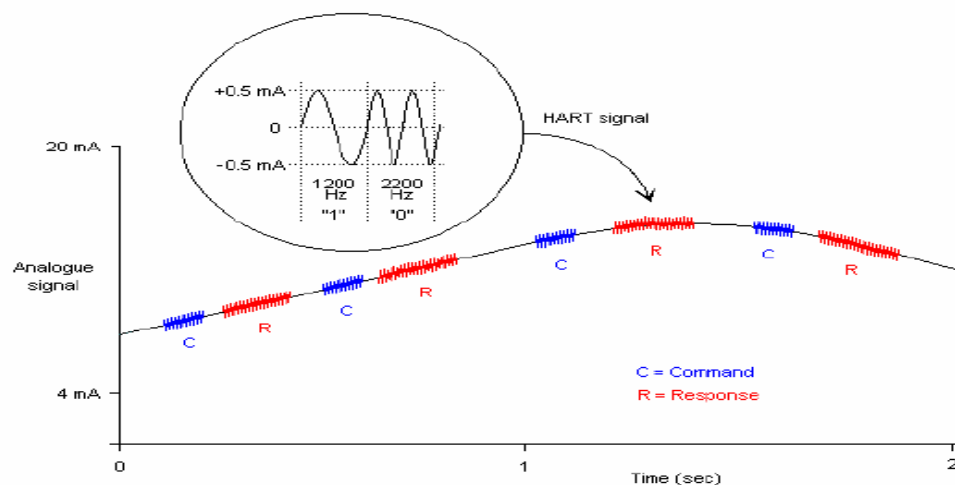
Fuente: Protocolo de comunicación Hart para los instrumentos de Flotech S.A.

1.3 Señal HART

Una vez expuesto la arquitectura de red y las formas de conexión, se presenta la forma de la señal y sus características. La señal HART es modulada digitalmente en FSK (*Frequency Shift Key*) y su estándar de comunicación es el BELL 202, es decir, se comunica con una tasa de transferencia de datos de 1200 bps y transmite en dos frecuencias diferentes, de la siguiente forma: un "1" lógico a 1200 Hz y un "0" lógico a 2200 Hz. Esta señal, de forma sinusoidal, cuya amplitud es de 1 mA pico a pico y con promedio cero, se transmite sobre el lazo analógico de 4-20mA, tal como se muestra en la figura 4.

La comunicación HART es bidireccional, por consiguiente se tiene una señal de comando y de respuesta sobre el mismo canal. Una transacción equivale a una señal de comando y de respuesta. Dos o tres transacciones de mensajes se pueden realizar cada segundo.

Figura 4. Señal HART



Fuente: Protocolo de comunicación Hart para los instrumentos de Flotech S.A.

El dispositivo maestro maneja señales de tensión mientras que el esclavo maneja señales de corriente. La señal de corriente debe ser convertida en señal de tensión por medio de una resistencia de carga cuyo valor se encuentra entre los 230Ω a 1100Ω. Los niveles pico-pico de la señal se muestran en la tabla 1.

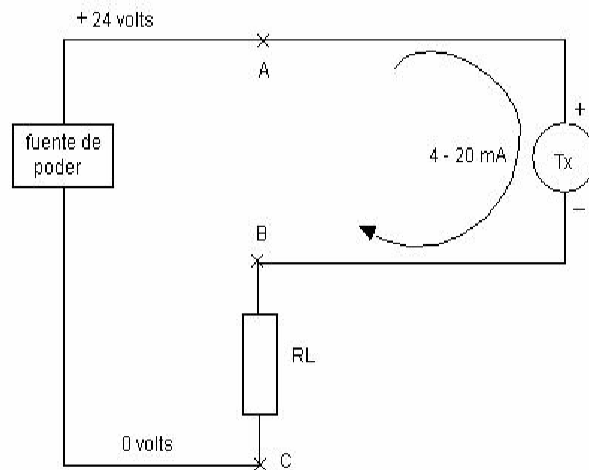
Tabla 1. Niveles de Señal HART

Señal transmitida por el maestro	min 400mV p-p max 600mV p-p
Señal transmitida por el esclavo	min 0.8 mA p-p max 1.2 mA p-p
Señal mínima del esclavo, convertida por una carga de 230 Ω	180 mV p-p
Señal mínima del esclavo, convertida por una carga de 1100 Ω	1320 mV p-p

Fuente: Protocolo de comunicación Hart para los instrumentos de Flotech S.A.

A continuación se describe el lazo de conexión, tal como se muestra en la figura 5. En la práctica, los tres elementos (la fuente de poder, el transmisor TX y la resistencia de carga, RL) se pueden conectar en cualquier orden, ya que se conectan en serie. La señal HART debe ser introducida y leída del lazo de corriente. La fuente de poder está casi en corto circuito para las frecuencias de la señal Hart, por lo que dispositivos secundarios (como el segundo maestro) no pueden ser conectados directamente al lazo, se deben conectar en paralelo al transmisor o a la resistencia de carga, entre los puntos A y B o B y C de la figura 5. Un equipo con protocolo de comunicación Hart no debe introducir ninguna carga DC a la línea, para asegurarse de que así sea se debe conectar al lazo mediante un condensador de 5 μF o más.

Figura 5. Lazo de conexión simple



Fuente: Protocolo de comunicación Hart para los instrumentos de Flotech S.A.

1.4 Estructura del mensaje HART

En esta parte del capítulo se describe el contenido y estructura del mensaje Hart. La señal Hart, ya sea de comando o respuesta, tiene una estructura predeterminada del mensaje, como se muestra en la figura 6, y tal como se puede apreciar, consta de varios campos (Preámbulo, Carácter de Inicio, Dirección, Comando, Contador de bytes, Estado, Datos y Suma de comprobación) en la cual cada campo cumple con una función establecida. La estructura del mensaje puede ser en formato corto o en formato largo. Los mensajes Hart son codificados como series de 8 bits, es decir bytes. Estos se transmiten de modo serial, utilizando una UART convencional (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) para serializar cada byte, añadiendo un bit de inicio, un bit de paridad impar y un bit de fin, esto permite que la UART receptora identifique el inicio de cada carácter, y para detectar errores en la transmisión debidos a ruido u otro tipo de interferencia. El bit menos significativo se envía primero.

Figura 6. Estructura del mensaje HART

Preámbulo	SD	AD	Com	BC	Status	Datos	CHKS
-----------	----	----	-----	----	--------	-------	------

Fuente: Protocolo de comunicación Hart para los instrumentos de Flotech S.A.

1.4.1 Preámbulo. De 5 a 20 bytes con caracteres hexadecimales FF. Estos se usan para la sincronización de la frecuencia de la señal y la cadena de caracteres que el receptor va a recibir. La respuesta al comando #0 le dice al maestro cuantos caracteres de preámbulo le gustaría recibir al dispositivo; el maestro puede utilizar el comando #59 para indicarle cuantos bytes de preámbulo debe incluir en la respuesta.

1.4.2 Caracter de inicio (SD). Es un byte que indica el inicio del mensaje. El caracter de inicio en Hart tiene diversos valores posibles, indicando cual formato está siendo utilizado por la fuente del mensaje. Esto se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Valores del Byte de Inicio

TIPO DE MENSAJE	FORMATO CORTO	FORMATO LARGO
Maestro a esclavo	2	82
Esclavo a maestro	6	86

Fuente: Autor del Proyecto

1.4.3 Dirección (AD). Esta contenida en un byte, para el formato corto y en 5 bytes para el formato largo. El bit más significativo de la dirección, indica si el maestro es el primario (1) o el secundario (0). En el formato corto, los cuatro bits menos significativos son la dirección del esclavo. De valor cero para configuración

punto-punto o del 0 al 15 para configuración multipunto. En el formato largo la dirección del esclavo es un número de identificación único, un número de 38 bits derivado del código del fabricante, el código del tipo de dispositivo y el número de identificación del dispositivo.

1.4.4 Comando (Com). Es un campo desde el 0 hasta el FD hexadecimal o hasta 253 decimal. Indica el comando del protocolo HART. Los comandos del protocolo HART se definen en tres grupos. El primer grupo es el de comandos universales, y provee funciones que están implementadas en todos los dispositivos de campo. El segundo grupo, comandos de práctica común, provee funciones comunes a muchos dispositivos de campo, pero no todos. Si un dispositivo implementa funciones que estos comandos describen, deberán ser invocadas mediante el número de comando asignado por la Fundación Hart. El tercer grupo, comandos específicos de dispositivo (anteriormente llamados específicos de transmisor), provee funciones que son más o menos únicas para un dispositivo particular.

Un maestro normalmente utilizará el comando # 0 para la primera conexión con el dispositivo, ya que en ese momento el número único de identificación no se conoce. También puede reconocer el tipo de revisión que utiliza el transmisor. Si la revisión del transmisor es de cinco se debe utilizar formato largo pero si es 4, 3 o 2 el maestro debe utilizar formato corto.

A continuación se puede observar en la tabla 3 los comandos universales con su respectivo campo de datos y en la tabla 4 algunos de los comandos de práctica común.

Nota: En las siguientes tablas los tipos son indicados como sigue:

- A Formato ASCII (4 caracteres por 3 bytes)
- B Banderas Bit-mapped
- D Día (3 bytes: día, mes, año-1900)
- F Punto flotante (4 bytes IEEE 754)
- H Enteros xxxxx yyy (xxxxx=revisión hardware, yyy=Código de señal física)

Tabla 3. Comandos Universales.

Número de Comando Universal y Función		Datos en comando		Datos en respuesta	
0	Leer identificación única		No	Byte 0 Byte 1 Byte 2 Byte 3 Byte 4 Byte 5 Byte 6 Byte 7 Byte 8 Byte 9-11 Byte 12 Byte 13 Byte 14 Byte 15	"254" (expansion) Código identificación fabricante Código tipo dispositivo fabricante Número de preámbulo requerido Revisión Comandos Universales Revisión comandos específicos Revisión Software Revisión Hardware (H) Banderas de función (B) Número ID de dispositivo Revisión comandos práctica común Revisión tablas comunes Revisión data link Código familia dispositivo
1	Leer variable primaria (PV)		No	Byte 0 Byte 1-4	PV Código Unidad Variable primaria (F)
2	Leer corriente y porcentaje de rango		No	Byte 0-3 Byte 4-7	Corriente (mA) (F) Porcentaje del rango (F)
3	Leer corriente y cuatro predeterminadas variables dinámicas		No	Byte 0-3 Byte 4 Byte 5-8 Byte 9 Byte 10-13 Byte 14 Byte 15-18 Byte 19 Byte 20-23	Corriente(mA) (F) PV Código Unidad Variable Primaria (F) SV Código Unidad Variable Secundaria (F) TV Código Unidad Tercera variable (F) FV Código Unidad Cuarta variable (F)
6	Escribir dirección de elección	Byte 0	Dirección de elección		Como en comando
11	Leer identificación única asociado con etiqueta	Byte 0-5	Etiqueta (A)	Byte 0-11	Como en comando #0
12	Leer mensaje		No	Byte 0-23	Mensaje 32 caracteres (A)
13	Leer etiqueta, descripción, día		No	Byte 0-5 Byte 6-17 Byte 18-20	Etiqueta (8 caracteres) (A) descriptor (16 caracteres) (A) Día (D)
14	Leer PV información sensor		No	Byte 0-2 Byte 3 Byte 4-7 Byte 8-11 Byte 12-15	Número serial del sensor Código de unidad para límites sensor Límite superior del sensor (F) Límite inferior del sensor (F) Span mínimo (F)

Número de Comando Universal y Función		Datos en comando		Datos en respuesta	
15	Leer información de salida		No	Byte 0 Byte 1 Byte 2 Byte 3-6 Byte 7-10 Byte 11-14 Byte 15 Byte 16	Código de selección de alarma Código de función de transferencia PV/Código de unidades de rango Valor superior del rango (F) Valor inferior del rango (F) Valor damping (segundos) (F) Código de protección- escribir Código del distribuidor de etiqueta privada
16	Leer número de ensamblaje final		No	Byte 0-2	Número de ensamblaje final
17	Escribir mensaje	Byte 0-23	Mensaje 32 caracteres (A)		Como en comando
18	Escribir etiqueta, descripción, día	Byte 0-5 Byte 6-17 Byte 18-20	Etiqueta (8 caracteres) (A) descriptor (16 caracteres) (A) Día (D)		Como en comando
19	Escribir número de ensamblaje final	Byte 0-2	Número de ensamblaje final		Como en comando

Fuente: Hart Application Guide

Tabla 4. Comandos de práctica común

Número de Comando de práctica común y Función		Datos en comando		Datos en respuesta	
33	Leer las variables del transmisor	Byte 0 Byte 1 Byte 2 Byte 3	Código variable ranura 0 Código variable ranura 1 Código variable ranura 2 Código variable ranura 3	Byte 0 Byte 1 Byte 2-5 Byte 6 Byte 7 Byte 8-11 Byte 12 Byte 13 Byte 14-17 Byte 18 Byte 19 Byte 20-23	Código variable ranura 0 Código unidad ranura 0 variable ranura 0 Código variable ranura 1 Código unidad ranura 1 variable ranura 1 Código variable ranura 2 Código unidad ranura 2 variable ranura 2 Código variable ranura 3 Código unidad ranura 3 variable ranura 3
34	Escribir valor damping	Byte 0-3	Valor damping (segundos) (F)		Como en comando

Número de Comando de práctica común y Función		Datos en comando		Datos en respuesta	
35	Escribir valores de rango	Byte 0 Byte 1-4 Byte 5-8	Código unidades rango Valor superior del rango (F) Valor inferior del rango (F)		Como en comando
36	Establecer el valor del rango superior		No		No
37	Establecer el valor del rango inferior		No		No
44 - 47	Establecer parámetros de operación (rango, unidades, función de transferencia)				
38	Reindicar la bandera de "configuración modificada"				
39	Control de la EEPROM				
40-42	Funciones de diagnóstico (modo de corriente fija, auto prueba, reset)				
43,45,46	Ajuste de la entrada y salida analógica				
48	Leer estados adicionales				
49	Escribir el número serial del sensor				
50-56	Uso de variable del transmisor				
57,58	Información de la unidad (tag. descriptor, fecha)				
59	Escribir el número de bits de preámbulo necesarios				
60,62-70	Uso de múltiples salidas analógicas				
107-109	Control del modo ráfaga				

Fuente: Hart Application Guide

1.4.5 Contador de bytes (BC). Contiene un entero para el número de bytes que forman el resto del mensaje. Esto se usa para indicar si el mensaje llegó completo. Esta cuenta puede ser desde 0 hasta 27. El número 27 equivale a dos bytes de estado y 25 de datos.

1.4.6 Estado (Status). Se incluye sólo en el mensaje de respuesta del esclavo y consta de dos bytes que reportan error en la comunicación y la recepción del mensaje. En la tabla 5 se puede observar algunos de los códigos de estado.

Tabla 5. Código de Estado

ESTADO	CÓDIGO
PRIMER BYTE	
Bit 7 en uno	Error en comunicación
Bit 6 en uno	Error de paridad
Bit 5 en uno	Error overrun
Bit 4 en uno	Error framing
Bit 3 en uno	Error en suma de comprobación
Bit 2 en uno	Reservado
Bit 1 en uno	RX Buffer overflow
Bit 0 en uno	Indefinido
SEGUNDO BYTE	
Todos los ocho bits en cero	

Fuente: Autor del Proyecto

1.4.7 Datos. Representa los bytes de los datos enviados y no puede exceder los 25 bytes. Su forma puede ser entero sin signo, punto flotante o codificación ASCII. El número de bytes del campo de datos, y el formato de datos utilizado para cada ítem se especifican de acuerdo al comando recibido.

1.4.7 Suma de comprobación (CHKS). Es una operación de OR exclusivo de todos los bytes que le preceden en el mensaje, comenzando por el caracter de inicio. Esto provee un segundo chequeo para la detección de errores en la transmisión.

1.5 Estructura del protocolo HART

El protocolo HART fue diseñado basado en el modelo OSI (*Open System Interconnection*), por lo tanto, en esta parte del capítulo, se hará una comparación entre este modelo y el modelo Hart. El protocolo Hart sólo implementa tres de las siete capas del modelo OSI: la capa física, de enlace de datos y de aplicación.

La capa *física* proporciona el manejo de la señal HART mediante el medio de transmisión, es decir todas las configuraciones y especificaciones de los cables y la conexión física con el transmisor de campo, como por ejemplo la resistencia que varía entre 230 y 1100 ohms. Los cables utilizados para cortas distancias es de dos hilos y para largas es STP (*Shield Twisted Pair*).

La capa de *enlace de datos* proporciona el formato del mensaje HART y la forma de comunicación maestro – esclavo, esto es, la comunicación se origina desde un maestro y se establece una dirección a un esclavo ubicado en el campo. El maestro genera un comando y recibe una respuesta del esclavo. Esta capa garantiza la fiabilidad del mensaje incluyendo un método para detectar errores como es la suma de comprobación.

La capa de *aplicación*, proporciona la posibilidad de que los comandos y las funciones HART sean entendidas entre maestro y esclavo. El maestro envía un mensaje al dispositivo de campo solicitando información o estado del mismo. El maestro también puede solicitar la ejecución de algún comando específico. El

esclavo responde a cualquier petición hecha por el maestro ya sea enviando información o ejecutando algún comando.

La siguiente tabla muestra la comparación del modelo OSI con el implementado en el protocolo HART:

Tabla 6. Protocolo HART vs. Modelo OSI

Capa	Modelo OSI	Función	Protocolo HART
7	Aplicación	Provee información de los datos	Instrucciones HART
6	Sesión	Conversión de datos	
5	Presentación	Interfaz	
4	Transporte	Asegura la conexión de red	
3	Red	Establece la conexión de red	
2	Enlace	Establece la conexión de datos	Regulación del protocolo HART
1	Físico	Conexión con los equipos	Señales BELL 202

Fuente: Hart Communications (Technical Information).

2. TRANSMISOR DE PRESIÓN INTELIGENTE HONEYWELL ST3000

En este capítulo se describe el funcionamiento del transmisor de presión inteligente *Honeywell* de la serie ST 3000, puesto que tiene implementado el protocolo HART, pero se desarrollaran primero los conceptos de un transmisor, de un transmisor de presión y finalmente, por qué se considera inteligente o no inteligente un transmisor de presión.

Un transmisor, en términos generales, es un elemento que lleva información de un lado hacia otro, por medio de un sistema en particular. Específicamente hablando en instrumentación industrial, un transmisor consta de un transductor y un sistema de amplificación; un transductor convierte de una forma de energía a otra, por ejemplo, un sensor es un transductor que transforma cualquier forma de energía en señales eléctricas.

Los transmisores de presión toman una medida de presión y la convierte en una escala de 0 a 100 por ciento del rango de presión al estándar, es decir, 4 a 20 mA (transmisión eléctrica) o 3 a 15 psi (transmisión neumática). El término inteligente se le incluye a los transmisores de presión, ó a cualquier instrumento, cuando es controlado por un microprocesador y se caracteriza por sus capacidades avanzadas en comunicación, por ejemplo, MODBUS o HART.

Cabe recordar, que la presión es la cantidad de fuerza sobre el área donde está aplicada la fuerza. Sus unidades varían según la aplicación, atmósferas (atm) y pascal (pa) para denominar presiones locales, milímetros de mercurio (mmHg) para aplicaciones químicas o libra por pulgada cuadrada (psi) para aplicaciones industriales.

La presión es representada como una columna de cierta sustancia en un determinado volumen, por ejemplo, se denomina presión atmosférica a la presión que ejerce la columna de aire sobre la tierra. Con respecto a nuestro proyecto, será la presión ejercida de la sustancia que fluye por el conducto sobre el volumen del mismo.

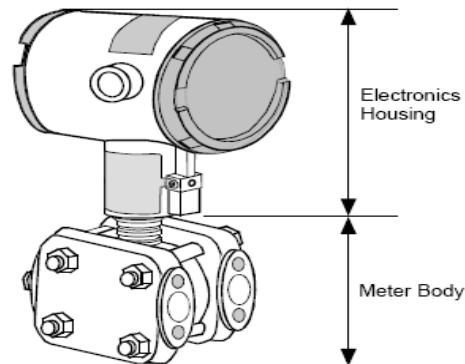
2.1 HONEYWELL ST 3000

El transmisor de presión inteligente ST 3000 presenta una variedad de tres modelos para diferentes medidas de presión: absoluta, diferencial y manométrica en dos series diferentes: la S100 y la S900.

Para reconocer con cual modelo se está trabajando, cada transmisor viene con una plaqueta localizada en la parte de arriba, donde se especifica el numero del modelo, este contiene un *key number*. S-T-X-Y-Y-Y, donde el tercer espacio (X) es para el tipo del transmisor de presión: absoluta (A), diferencial (D), manométrica (G: gauge) y otras. Y las tres últimas (Y-Y-Y) es para la serie del transmisor: serie 100 (1--) y 900 (9--). Específicamente, el modelo que se va a utilizar en nuestro trabajo es: STG94L, es decir, un transmisor de presión manométrica de la serie 900.

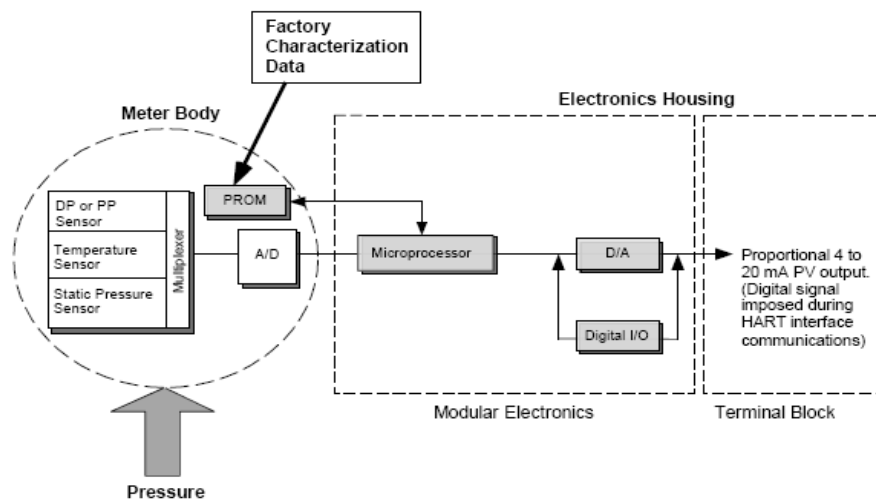
El transmisor mide la presión del proceso y transmite una señal de salida proporcional a la variable medida, sobre una línea física de 4 a 20mA. La estructura física del ST 3000 consta de una cavidad para los elementos electrónicos y cuerpo del medidor. Ver figura 7. En la primera se encuentra un microprocesador y un convertidor digital/análogo y provee la señal proporcional al rango de 4 a 20mA. Por último, en la segunda se encuentran tres diferentes sensores, uno para presión estática, otro para temperatura y otro para el tipo de presión que se está utilizando. Las tres señales proporcionadas por los sensores serán seleccionadas por un multiplexor y digitalizadas para ser enviadas al microprocesador. Ver figura 8.

Figura 7. Transmisor de presión diferencial ST 3000



Fuente: ST 3000 Smart Transmitter User Manual

Figura 8. Diagrama de bloques del transmisor



Fuente: ST 3000 Smart Transmitter User Manual

Se considera configurar el transmisor de presión ST 3000 a la lectura o variación de ciertos parámetros establecidos o condiciones iniciales, esto por medio del comunicador HART. La configuración del transmisor puede ser efectuada *on-line*, con el transmisor funcionando directamente con el comunicador, u *off-line*, la configuración se hace en el comunicador y se guarda en su memoria para ser

descargada luego en el transmisor. Es importante mencionar que se plantea realizar las pruebas de nuestro trabajo, online.

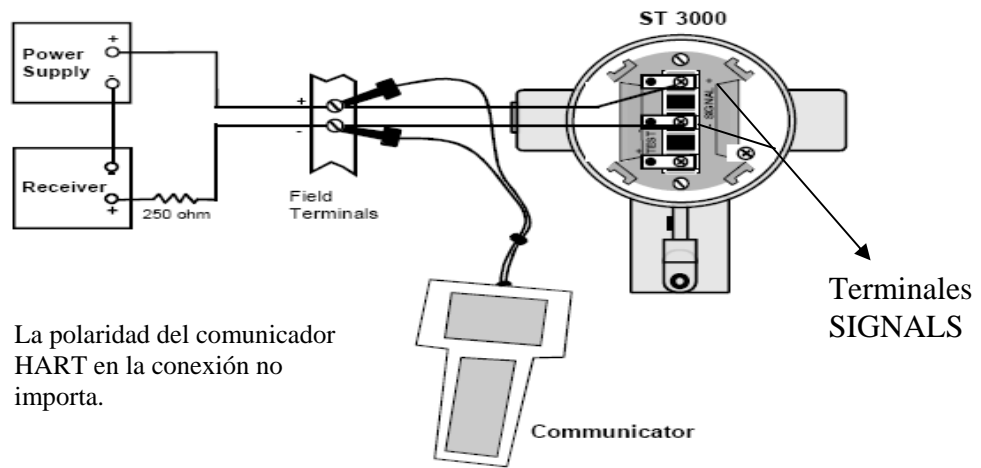
El transmisor ST 3000 dispone de memorias temporales para el intercambio de datos durante la comunicación. Además, el transmisor posee una memoria no volátil la cual es un área de almacenamiento permanente para realizar copias de seguridad de los datos que están en la memoria temporal. Esta memoria permanente retiene los datos aún si el transmisor está desconectado.

2.2 Compatibilidad HART

El transmisor de presión ST 3000 puede hacer ajustes a sus rangos de medida superior e inferior con un comunicador HART, el más utilizado en el campo es el modelo 375 de *Rosemount inc*, sin embargo, este es el objeto de nuestro trabajo, presentar una opción de un dispositivo comunicador HART.

El transmisor está diseñado para operar en una línea de alimentación con una resistencia de lazo energizada por una fuente. La línea (4-20mA) se conecta entre el positivo y negativo de los terminales SIGNALS de la cavidad electrónica del transmisor. El comunicador portátil HART es conectado a la línea del transmisor para lograr una comunicación directa con él, por medio de señales digitales serialmente conectadas al lazo. La comunicación opera en forma de petición/respuesta, donde el microprocesador del transmisor recibe una señal del comunicador, identifica la orden y envía, finalmente, un mensaje de respuesta. En la figura 9 se puede observar la conexión del transmisor y el comunicador.

Figura 9. Conexión típica de comunicación



Fuente: ST 3000 Smart Transmitter User Manual

3. MICROCONTROLADOR Y MODEM HART

En este capítulo se describen los dispositivos más importantes que se utilizaron para la construcción del programador. Dentro de estos se encuentran el microcontrolador GP32 y el modem Hart HT2012. El microcontrolador es programado con el fin de manipular los rangos de medida del transmisor de presión, siguiendo los requerimientos de la estructura del mensaje HART. El módem HT2012 sirve para modular la señal programada según las especificaciones dadas por el protocolo HART.

3.1 *Microcontrolador*

El microcontrolador que se escogió para el desarrollo del proyecto fue el *MC68HC908GP32 de Motorola*. Se ha escogido este microcontrolador debido a que en la escuela de ingeniería eléctrica, electrónica y comunicaciones de la Universidad Industrial de Santander se tiene un mayor acceso a este tipo de dispositivo. En la escuela se desarrolló un proyecto de pregrado con título *Diseño e implementación de la tarjeta de desarrollo del MC68HC908GP32 para el laboratorio de microcontroladores de la escuela de ingeniería eléctrica, electrónica y comunicaciones [Autor: José Gregorio Ardila Gutiérrez, 2005]* cuyo objetivo fue la construcción de una tarjeta de aplicación y programación para el microcontrolador GP32. Esto ahorra el trabajo de la construcción de una tarjeta de programación para así dedicarse completamente a cumplir con los objetivos reales de este proyecto. Además el microcontrolador GP32 tiene un módulo de comunicación serial (SCI) lo cual es muy importante para el envío y recepción de mensajes HART.

3.1.1 Descripciones Generales.

El microcontrolador *MC68HC908GP32* es de bajo costo y pertenece a la familia de los M68HC08 de 8-bits. Todos los micros de esta familia utilizan la unidad central de procesamiento M68HC08 (CPU08) y tienen una gran variedad de módulos. Entre estos módulos se encuentran: El conversor análogo digital (ADC), El generador de reloj (CGM), Teclado (KBI), Comunicación serial asincrónica (SCI), Sistema de integración (SIM), Interfase serial con periféricos (SPI) y el Timer (TIM).

El 68HC08 utiliza cuatro fases de reloj interno en cada ciclo de ejecución de la CPU. Si el 68HC08 está gobernado por un cristal, el ciclo de ejecución es un cuarto de la frecuencia del cristal. A este ciclo se le llama ciclo de bus o ciclo de instrucción. El microcontrolador puede manejar hasta un ciclo de bus de 8MHz, para esto un ciclo de bus de una instrucción se ejecutará en 125ns o 1 dividido en 8Mhz. Esto con un reloj de entrada de 32Mhz

El CPU08 puede direccionar 64 Kbytes de espacio en memoria. El mapa de memoria incluye:

- 32,256 bytes de memoria FLASH para el usuario.
- 512 bytes de memoria RAM
- 36 bytes de vectores definidos por el usuario.
- 307 bytes de monitor ROM

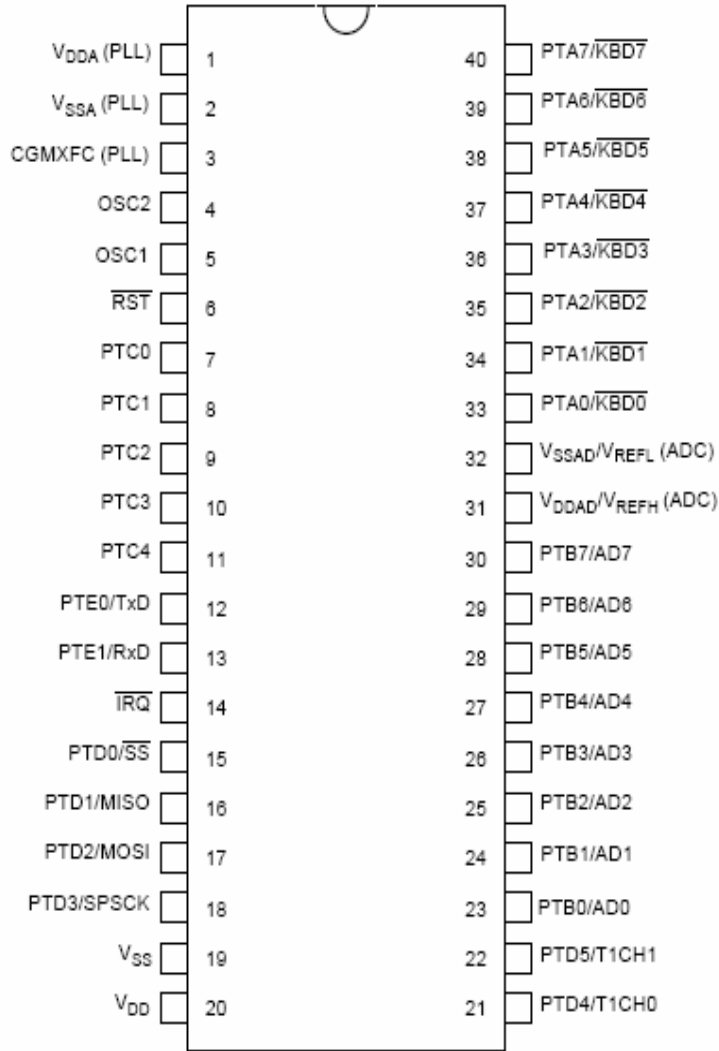
El microcontrolador tiene un total de treinta y tres puertos bidireccionales de entrada y salida. (Ver figura 10). Entre los puertos disponibles se encuentran el puerto A, B, C, D y E. Cada uno de estos puertos puede manejar un total de ocho bits excepto el puerto C y E que manejan 7 y 2 bits respectivamente. El puerto A se utiliza conjuntamente con el módulo del teclado (KBI) mientras que el puerto E0 y E1 se utilizan en el módulo de comunicación serial (SCI) como transmisión y recepción respectivamente. El puerto B también se utiliza conjuntamente con el

módulo ADC y el puerto D utiliza cuatro de sus pines para el módulo SPI y los otros cuatro para el TIM. Para fines del proyecto se utilizaron el puerto A para manipular el teclado, los pines D0 a D3 y C0 a C2 para controlar el LCD y el pin B0 para controlar el modem HT2012.

V_{DD} y V_{SS} son los pines de alimentación. OSC1 y OSC2 son los pines de entrada y salida del reloj u oscilador. El pin RST es el encargado de resetear el microcontrolador si este ve un valor lógico de cero. El pin IRQ controla interrupciones en el microcontrolador. V_{DDA} y V_{SSA} son los pines de alimentación de una porción analógica del módulo generador de reloj (CGM). El pin CGMXFC es un filtro capacitivo externo para el CGM. V_{SSAD}/V_{REFL} y V_{DDAD}/V_{REFH} son los pines de alimentación para el módulo ADC. V_{REFH} es la referencia alta para el ADC y V_{REFL} la referencia baja.

Los pines del microcontrolador *MC68HC908GP32* se observan en la figura 10.

Figura 10. Pines del microcontrolador MC68HC908GP32 40-Pin PDIP de Motorola



Fuente: Technical Data MC68HC908GP32

3.1.2 Módulo de comunicación serial asincrónica (SCI)

Se va a tratar con mayor detalle este módulo debido a que los mensajes del protocolo HART se transmiten de modo serial y en forma asincrónica.

Existen registros, cada uno de ocho bits, para el control y monitoreo de la SCI. Entre estos se encuentran el: SCI control register 1 (SCC1), SCI control register 2

(SCC2), SCI control register 3 (SCC3), SCI status register 1 (SCS1), SCI status register 2 (SCS2), SCI data register (SCDR), y el SCI baud rate register (SCBR). Al deshabilitar o habilitar bits específicos de estos registros se puede controlar el encendido o apagado del modo de transmisión o recepción, el *baud rate*, el número de bits por transmisión, interrupciones y control de errores.

La recepción y transmisión pueden ser habilitadas por separado, una función importante para la comunicación maestro – esclavo del protocolo HART. El módulo SCI puede ser programado para 32 velocidades de transmisión. Entre estas velocidades está la de 1200 bps, la cual es necesaria para cumplir con el estándar Bell-202. También puede ser programado para que la longitud del carácter por transmisión sea de once bits. Esto es necesario para los mensajes HART ya que requieren ocho bits de datos, uno de inicio, uno de paridad y uno de fin. En la recepción este puede ser programado para la detección de errores de paridad y de ruido.

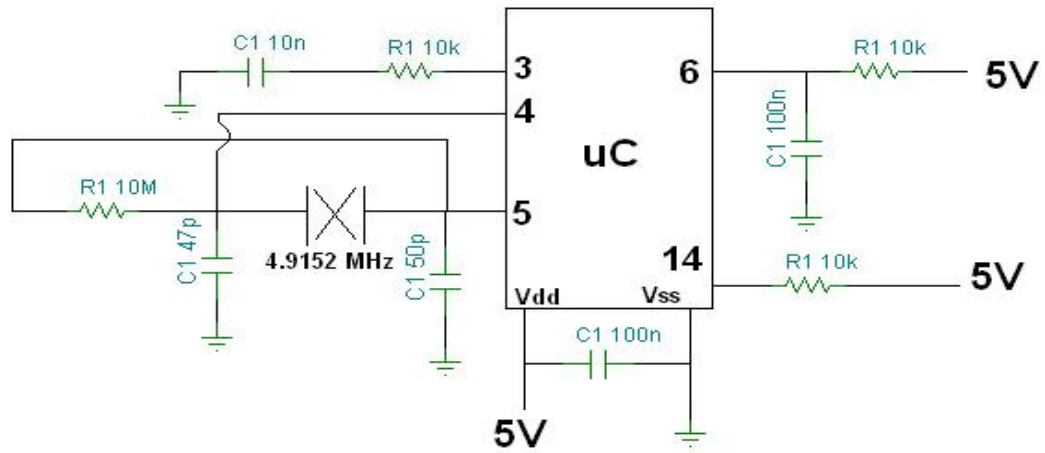
Las interrupciones se refieren a subrutinas que el microcontrolador puede realizar debido a un evento especial. Dentro de estos eventos se encuentran: transmisión completa, recepción lleno, transmisor vacío, error debido a ruido y error de paridad.

En transmisión, el registro SCDR es aquel espacio en memoria donde se escribe la información que se va a transmitir. Cuando el registro SCDR transmite la información, este estará disponible para poder volver a ser escrito. El bit SCTE del registro SCS1 adquirirá un valor alto marcando que el transmisor está vacío.

En recepción, el registro SCDR tiene que ser leído para adquirir la información que el microcontrolador está recibiendo. El bit SCRF del registro SCS1 marcará un valor alto indicando que recepción está llena.

El circuito básico para poder operar el microcontrolador se puede observar en la figura 11.

Figura 11. Circuito básico del microcontrolador MC68HC908GP32 de Motorola



Fuente: Autor del proyecto

3.2. MÓDEM HT2012

3.2.1 Descripción General

En el momento de diseñar el dispositivo para calibrar transmisores de presión, se necesitaba un elemento para operar en un estándar tal que fuera compatible y fuera capaz de manejar señales HART, este elemento es el módem HT2012 que la compañía *Smar Research Company (SRC)* provee para operar bajo el estándar de modulación Bell 202. El modem HT2012 es un integrado de alimentación sencilla, bajo costo, bajo consumo de potencia y con capacidad de la capa física de HART. En esta segunda parte del capítulo se menciona y explica todo lo referente a este elemento, basados en su hoja de datos.

El HT2012 es utilizado en procesos de instrumentación y automatización que requieren baja potencia y seguridad en el ambiente. La circuitería del módem es digital e incluye funciones de modulación y demodulación. La operación del módem es *full duplex*, es decir, en dos direcciones: transmisión y recepción. Esta parte es controlada por uno de los pines del integrado que dependiendo de la entrada digital que reciba activa una u otra función.

El módem está diseñado para ser usado con otras etapas de amplificación y filtración, que serán explicadas con más atención mas tarde en el capítulo.

3.2.2 Presentación del Módem

El HT2012 opera con un rango de alimentación de 3.3 a 5.0 V con bajo consumo de potencia, la corriente nominal que alcanza a circular es de 40 μ A. Usa frecuencias de desplazamiento de 1200 y 2200 Hz, las requeridas para el estándar de comunicación, modula con FSK, *Frequency Shift Keying*, y la tasa de transmisión y recepción es de 1200 baudios. Es compatible con dos tecnologías de fabricación, TTL y CMOS, y se presenta en dos formas de empaquetado, DIP (*Dual In-line Package*) y PLCC (*Plastic Leaded Chip Carrier*), esta segunda es una

forma de montaje superficial. Con respecto a lo anterior, cuando se presenta en DIP, el integrado tiene 14 pines y en PLCC, tiene 28.

3.2.3 Descripción de Pines

El esquema de un integrado HT2012, es decir su distribución de pines, aunque depende del tipo de empaquetamiento no varía en su funcionamiento ni operación. La descripción será mostrada en la siguiente tabla.

Tabla 7. Distribución de pines del HT2012

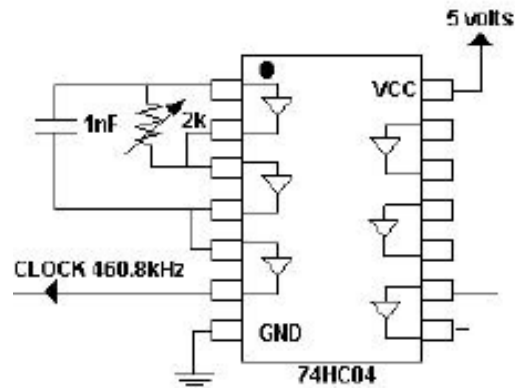
Señal	I/O	PINES		Descripción
		DIP	PLCC	
V _{DD}	Alim	1	1	Alimentación de 3.3 a 5.0 V
Reloj	O	2	2	Generador de Reloj (19.2 kHz.).
OCD	O	3	3	Detector de portadora.
IRXA	I	4	4	Entrada del demodulador
NC	--	5	5-12	Pin no conectado
Test1*	I	6	13	Entrada de prueba.
NC	--	7	--	Pin no conectado
ORXD	O	8	14	Salida del demodulador
V _{SS}	Alim	9	15	Tierra de alimentación
NC	--	10	--	Pin no conectado
OTXA	O	11	16	Salida del modulador
INRTS	I	12	17	Selector de operación
Test0*	I	13	26	Entrada de prueba
ITXD	I	14	27	Entrada del modulador
NC	--	15	18-25	Pin no conectado
I460k	I	16	28	Entrada de Reloj (460.8 kHz)

* Estas entradas de prueba deben conectarse a V_{SS} en operación normal.

Fuente: Hart Modem HT2012 Datasheet

- **Detección de Portadora.** Esta etapa opera de la siguiente manera: si una frecuencia aplicada en la entrada del modulador (pin 4) está en un rango de 1000 a 2575 Hz durante un periodo de 40ns la salida OCD va a bajo (0), por el contrario, si se pierde la detección por 1.68ms, la salida OCD pondrá un alto (1). Las condiciones que deben estar presentes en el Módem para que funcione el detector de portadora es la correcta frecuencia del reloj de entrada de 460.8 kHz.
- **Funcionamiento de Relojes.** En esta etapa se describen dos tipos de señales de reloj en funcionamiento, una que es necesario para que el módem funcione correctamente y es de entrada y otra de salida que es generada por el propio módem. El primero es una entrada de frecuencia digital de 460.8 kHz que proviene de una fuente externa y es usado para generar la segunda señal de reloj. Esta frecuencia es mas baja que las que usan otros tipos de integrados y ello representa para el módem menos consumo de potencia. Aunque por ello, no se pudo conseguir un cristal que opere a esa frecuencia tan baja. Sin embargo, para generar la frecuencia de 460.8 KHz se diseñó el circuito de la figura 13. Por otro lado, la segunda señal de reloj es proporcional a la primera y se genera en el pin 2 una frecuencia de 19.2 kHz. Casualmente es 1/24 veces la primera. Esta misma señal es utilizada para sincronizar operaciones dentro o fuera del módem. La señal de reloj de 460.8 kHz fue generada por un diseño que se encontró en una de las bibliografías del proyecto y es simplemente un arreglo de negadores conectados a un capacitor de 1nF y una resistencia variable, que es la que finalmente, ajusta la frecuencia. El arreglo de negadores, mencionados anteriormente, están comprendidos en un integrado de seis compuertas negadoras, el 74HC04. El circuito se observa en la figura 13.

Figura 13. Generador de la señal de 460.8 kHz.

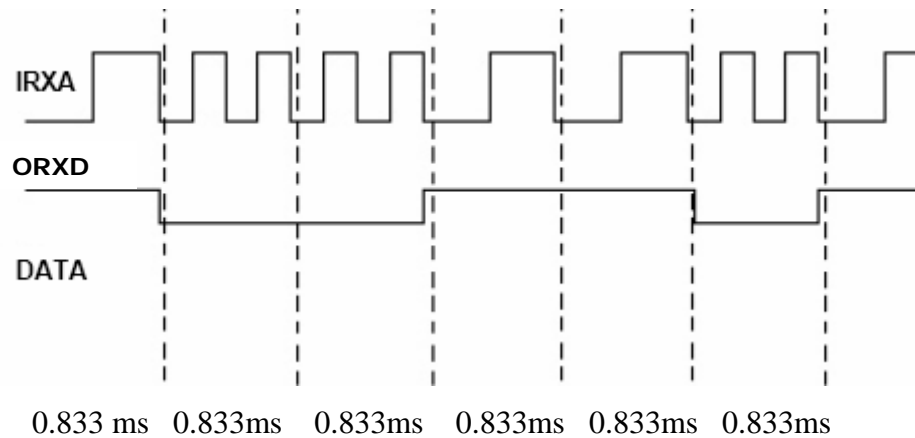


Fuente: Protocolo de comunicación Hart para los instrumentos de Flotech S.A.

- **Modulación.** El modulador toma los datos provenientes del microcontrolador y modula tanto a 1200 como a 2200 Hz. Para que el módem trabaje en la función de modulación, la entrada INRTS (*Input Ready to Send*), pin 12, debe tener un nivel bajo (cero). El pin de entrada del modulador es el 14 y se denomina ITXD (entrada de transmisión digital) y la salida es el pin 11, llamado OTXA (salida de transmisión digital). La operación del modulador es la siguiente, si en la entrada ITXD hay un cero lógico en la salida OTXA se va a producir una onda cuadrada de 2200 Hz, por el contrario si en la entrada hay un uno lógico, en la salida se genera una señal cuadrada de 1200 Hz. Cabe mencionar que esta entrada digital son datos enviados por el microcontrolador en su operación de transmisión. La salida del módem es una señal cuadrada y con un nivel de directa, pero la señal HART para la transmisión, es senoidal y sin nivel de continua, para ello se hizo necesario construir un filtro pasa bajas que hiciera la conversión de cuadrada a seno y un capacitor en serie con la entrada para suprimir el nivel de DC. Este filtro se describe con mas detalle en el capítulo 4.

- Demodulación.** La demodulación sigue el proceso contrario al realizado por la modulación, es decir, éste tomará ondas cuadradas de 1200 o de 2200 Hz y producirá niveles de tensión lógicos. Para que el módem funcione en modo de demodulación, la entrada INRTS debe estar en nivel alto (uno) y así toma las señales en IRXA (entrada de recepción análoga) y los transforma en niveles en ORXD (salida de recepción análoga). La salida del demodulador (ORXD) producirá un nivel de tensión alto (uno) cuando en la entrada (IRXA) exista una señal cuadrada de 1200 Hz y producirá un nivel bajo (cero) cuando en la entrada haya una señal cuadrada de 2200 Hz. Esta salida digital son datos que serán enviados a la entrada de recepción del microcontrolador para que los analice.

Figura 14. Señales en demodulación



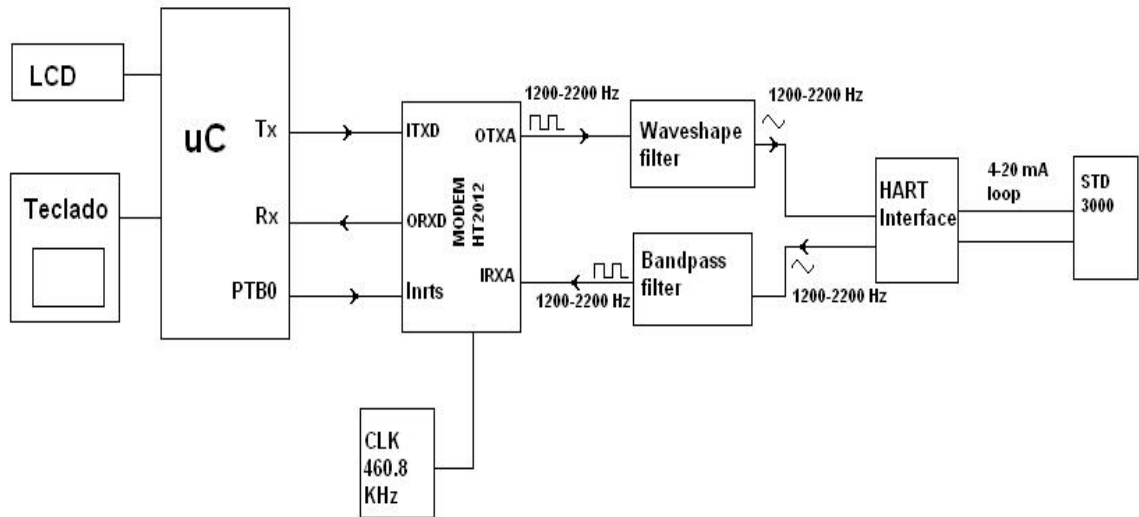
Fuente: Hart Modem HT2012 Datasheet

La entrada del módem HT2012 es una señal cuadrada de 1200 o 2200 Hz, la que proviene de nuestro transmisor de presión es una señal senoidal en esas frecuencias, por lo tanto, hubo la necesidad de diseñar un filtro pasa-banda y un comparador para que hiciera la conversión de senoidal a cuadrada. Este filtro se describe con mas detalle en el capítulo 4.

4. DESARROLLO DEL DISPOSITIVO

En este capítulo se presenta el procedimiento de acople de todas las etapas que componen el dispositivo final. Se describen los circuitos e integrados que se utilizaron para la integración del sistema y se da una explicación breve del software implementado en el microcontrolador. El dispositivo consta de cinco etapas que son: Etapa de control y visualización (Microcontrolador, LCD y Teclado); Codificación (Módem HT2012); Acondicionamiento de señal a onda senoidal (*Waveshape filter*); Acondicionamiento de señal a onda cuadrada (*Bandpass filter*) e Interfaz con el transmisor de presión (*Hart Interface*). En la siguiente figura se puede observar las diferentes etapas acopladas.

Figura 15. Etapas acopladas, dispositivo final



Fuente: Autor del proyecto

A continuación se describe cada una de las etapas que constituyen el dispositivo.

4.1 Etapa de control y visualización

Esta etapa consta de un microcontrolador *MC68HC908GP32*, un LCD y un teclado 4x4 matricial. La etapa de control y visualización es la encargada de enviar y recibir mensajes Hart. Por lo tanto el microcontrolador GP32 es el encargado de ensamblar los mensajes Hart, dependiendo del comando a utilizar, y enviarlos al Módem. También se encarga de decodificar el mensaje proveniente del Módem y controlar por medio de un bit, alto o bajo, el pin INRTS del mismo Módem HT2012 con el puerto PTB0.

El microcontrolador muestra por medio del LCD un menú en el cual se puede escoger entre “*Prueba conexión*” y “*Rangos de medida*”. Por medio de un teclado se accede, con el número uno, a “*Prueba conexión*”. El microcontrolador al ver esta opción envía el comando 0 al Modem para recibir una respuesta que le asegura si existe un esclavo; para nuestro caso, un transmisor de presión conectado correctamente al dispositivo. Al recibir una respuesta exitosa por parte del transmisor, se mostrará en la pantalla “*Conexión exitosa*” de lo contrario mostrará “*Error en Conexión*”. Para acceder a “*Rangos de medida*” se debe presionar la tecla con el número dos. Al ver esta opción el microcontrolador enviará el comando 15, necesario para adquirir el código de unidades de rango, el cual se implementa para poder cambiar los rangos de medida del transmisor de presión. Después de recibir por parte del esclavo una respuesta exitosa al comando 15, el usuario digita los valores inferior y superior deseados. Una vez realizada esta operación el microcontrolador envía el comando 35 al módem con su respectiva información en el campo de datos. Para implementar este comando se requiere que sus datos contengan el código de unidades de rango, adquirido ya por el comando 15, el valor superior y el valor inferior, convertidos a formato IEEE

754. Una vez recibida una respuesta exitosa por parte del esclavo se mostrara una pantalla con “*Conexión exitosa*” y los respectivos valores inferior y superior.

Para lograr esta operación del microcontrolador se implementó un programa que se describe a continuación.

Para la programación del microcontrolador GP32 se utilizó el programa *Metrowerks Codewarrior* version 5.6.1, el cual permite la programación de microcontroladores Motorola con lenguaje C y *assembler*. Para cumplir con los objetivos del proyecto se utilizaron los comandos Hart 0, 15 y 35, ya que nuestro dispositivo cumple la función de maestro, este debe ensamblar el mensaje Hart dependiendo del comando y esperar una respuesta por parte del esclavo. Para acceder al comando 0 se requiere que se pulse la tecla uno y para acceder al comando 15 y 35 se requiere pulsar la tecla dos, como se explicó anteriormente.

Se utilizó el formato corto con la dirección de esclavo igual a cero debido a que la conexión es punto a punto. Con el módulo SCI del GP32 simplemente se le proporciona, por medio del registro SCDR, los 8 bits a enviar y este se encarga de transmitir el mensaje añadiendo el bit de inicio, el bit de paridad y el bit de fin. Una vez transmitidos los datos, el módulo SCI entra en modo de recepción.

Para completar el mensaje Hart correspondiente al comando 0 se le proporcionaron 5 bytes FF hex de preámbulo, un byte 02 hex de inicio, un byte 80 hex de dirección, un byte 00 hex de comando, un byte 00 hex de contador de bytes y un byte 82 hex de suma de comprobación. La suma de comprobación es generada automáticamente por el software realizando la operación XOR con cada byte enviado desde el campo de inicio. Los bytes de estado no van en el mensaje del maestro y el comando 0 no requiere de bytes de datos.

La respuesta al comando 0 contiene datos referentes al esclavo. Los bytes que se reciben se van leyendo del registro SCDR y se les asigna una variable. Este comando simplemente se utiliza para verificar la conexión entre el dispositivo y el transmisor de presión. El módulo SCI puede detectar error en paridad y bit de inicio. Otra forma de detectar errores es por medio de los dos bytes de estado y la suma de comprobación, este tipo de errores son revelados por medio del software. Una vez guardados los bytes de estado en sus respectivas variables, estas se comparan con cero y si estos no son iguales existe un error. Cada vez que se recibe un byte se le realiza la operación XOR con el anterior byte recibido para al final compararlo con el byte de suma de comprobación proveniente del esclavo. Si estos dos son diferentes existe un error.

Una vez detectado un error el software envía otra vez el comando hasta recibir una respuesta correcta. Esta operación se realiza cinco veces, si no se adquiere una respuesta exitosa, se mostrará una leyenda “*Error en Conexión*”. Otra forma de mostrar este mensaje es al no recibir respuesta por parte del esclavo en 3.4s, tiempo suficiente para que exista una comunicación Hart.

Para implementar el comando 15 se le proporcionó al módulo de la SCI el mismo mensaje que se utilizó para el comando 0 pero con la diferencia de que en el campo de comando viene el byte 0F hex.

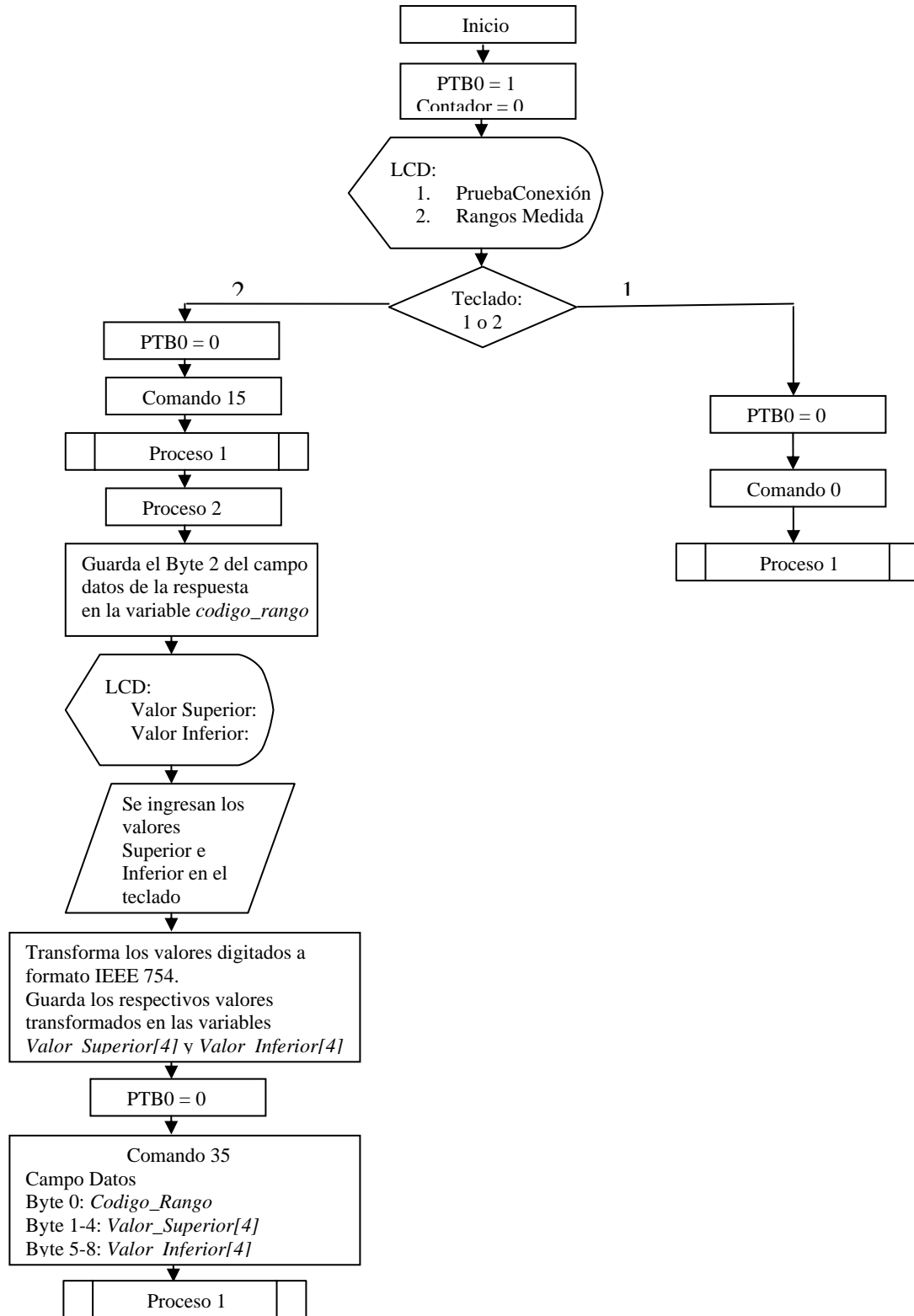
La respuesta del comando 15 contiene en su campo de datos en el byte número dos, el Código de Unidades de rango, información necesaria para implementar el comando 35 que es al final el comando para cambiar los rangos de medida del transmisor de presión. Una vez adquirido el Código de Unidades de rango del registro SCDR, se guarda en una variable llamada *codigo_rango*.

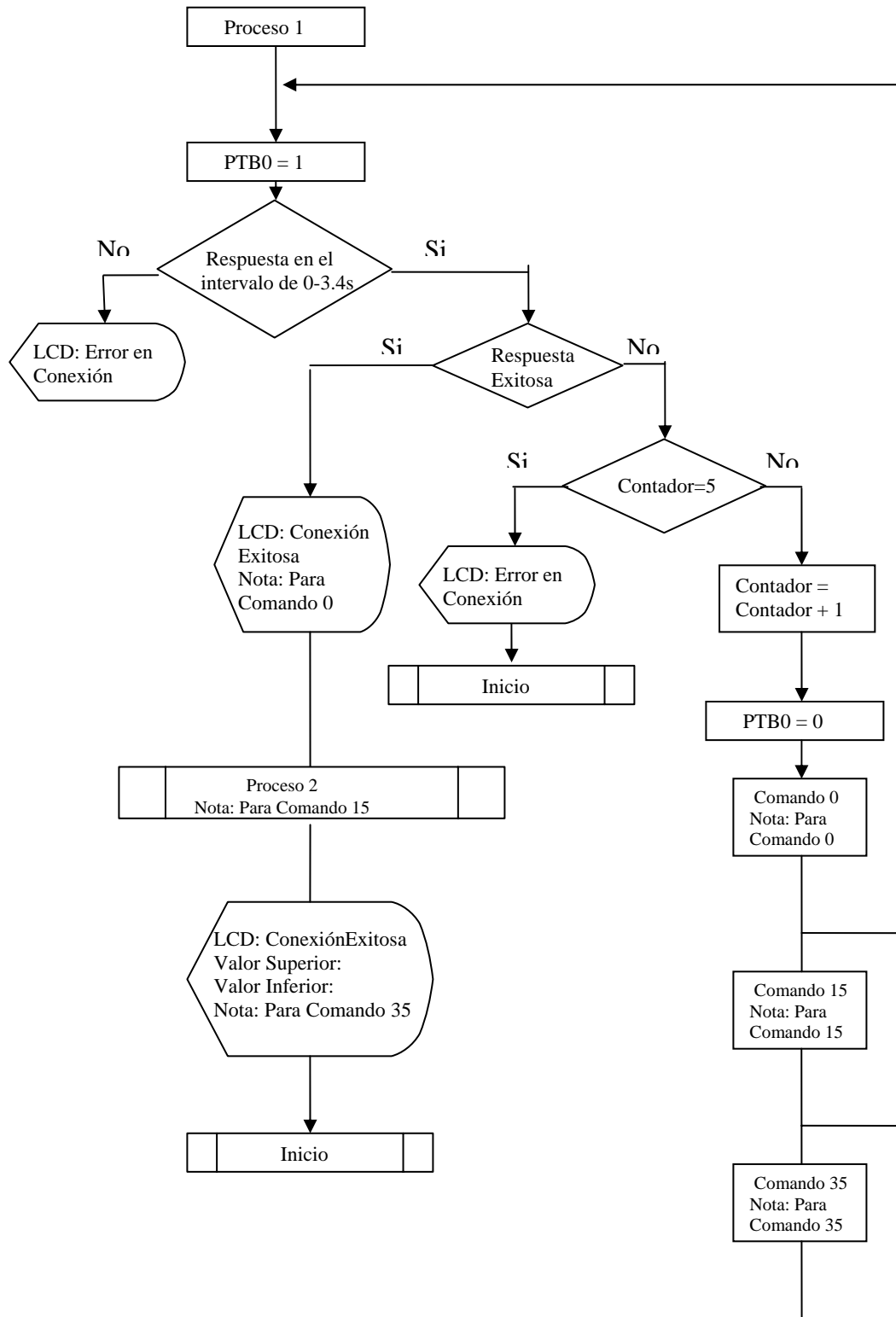
Para implementar el comando 35 se le proporcionó al módulo SCI los mismos cinco bytes de preambulo, el mismo byte de inicio y el mismo byte de dirección que se implementaron en el comando cero. El campo de comando contiene el byte

23 hex y el contador de bytes contiene el byte 09 hex debido a que el campo de datos cuenta con nueve bytes. Como se dijo anteriormente la suma de comprobación es generada por el mismo software. Los nueve bytes de datos comprenden: uno para el *codigo_rango*, cuatro bytes para el valor superior y otros cuatro para el valor inferior, cada uno de estos convertidos a formato IEEE 754. En el software existe una rutina que toma los valores superior e inferior introducidos por el usuario y los convierte a formato IEEE 754. (Para observar la representación del formato IEEE 754 referirse al Anexo A). El software está diseñado para convertir valores menores e iguales que 100. Esto se debe a que en el laboratorio de instrumentación electrónica la medida de presión solo alcanza valores de 100psi y por otra parte se ahorra memoria al ejecutar la operación en el microcontrolador. Los valores superior e inferior transformados se guardan en una variable tipo array con nombre *Valor_Superior[4]* y *Valor_Inferior[4]* respectivamente.

La respuesta al comando 35 simplemente contiene en su campo de datos los mismos nueve bytes que se enviaron. Los bytes recibidos de valor superior e inferior se comparan con las variables *Valor_Superior[4]* y *Valor_Inferior[4]*, si estos bytes son iguales se muestra una pantalla con *Conexión Exitosa* y los respectivos valores inferior y superior. De lo contrario se vuelve a enviar el mismo comando cinco veces más hasta recibir una respuesta exitosa. Para observar el diagrama de flujo del software referirse a la figura 16.

Figura 16. Diagrama de flujo del software





Fuente: Autor del proyecto

4.2 Etapa de codificación

Esta etapa consta de un Módem HT2012 y el integrado 74HC04. Como se mostró en el capítulo 3 el Módem es el encargado de realizar la operación de modulación y demodulación dependiendo del estado del pin INRTS. También requiere una entrada de reloj con frecuencia de 460.8KHz. La generación de esta señal se hace por medio del integrado 74HC04, lo cual se explicó en el capítulo anterior.

Cuando el microcontrolador está transmitiendo, el pin INRTS se encuentra en bajo por lo tanto el Módem operará en modo modulación. El Módem se encargará de convertir la señal digital, proveniente del micro, a señal cuadrada con frecuencia de 1200 o 2200 Hz para luego enviársela al *Waveshape filter*. Cuando el microcontrolador está recibiendo, el pin INRTS estará en alto y por lo tanto el Módem en modo demodulación. En este modo el módem convertirá la señal cuadrada con frecuencia de 1200 o 2200 Hz, proveniente del *Bandpass filter*, a señal digital. Esta señal digital será enviada al GP32.

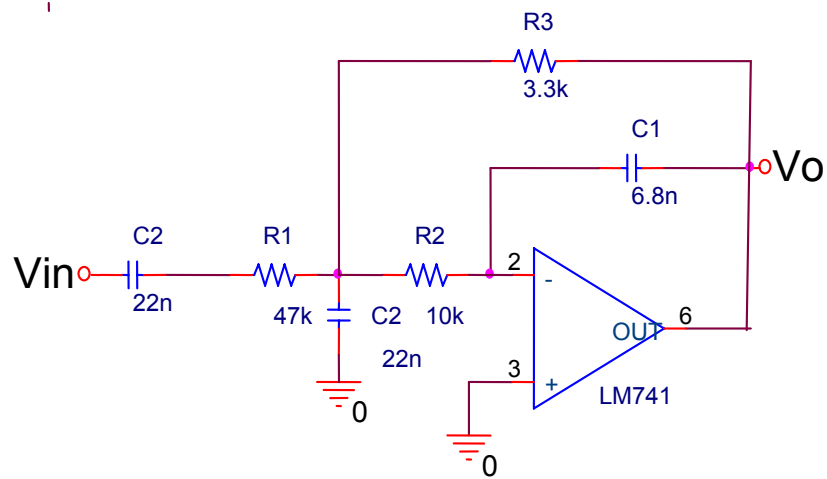
4.3 Etapa de acondicionamiento de señal a onda senoidal

La siguiente etapa del diseño es el denominado filtro de salida. Esta etapa tiene la tarea de convertir la señal cuadrada proveniente del Módem a señal senoidal, la cual es leída por el transmisor de presión. Además este filtro servirá para suprimir cualquier componente de directa existente en la señal y reducir niveles de ruido procedentes del microcontrolador y del módem.

Este conversor de onda cuadrada a senoidal es un filtro pasa-bajos que suprime componentes espectrales secundarias, que se encuentran dentro de una onda cuadrada, para dejar solo la componente principal, que es precisamente el espectro de una señal senoidal. La frecuencia de corte del filtro se debe escoger de tal manera, que las frecuencias de 1200-2200 Hz queden en el corte y posean

la mínima cantidad de componentes espectrales fuera de la principal, por ello la frecuencia de corte que se utilizó fue de aproximadamente de 2300 Hz. El filtro se diseñó de segundo orden con una ganancia de 0.08, para que la señal de salida quede en los parámetros de amplitud requeridos por el esclavo. El esquema del filtro se muestra a continuación:

Figura 17. Filtro de salida



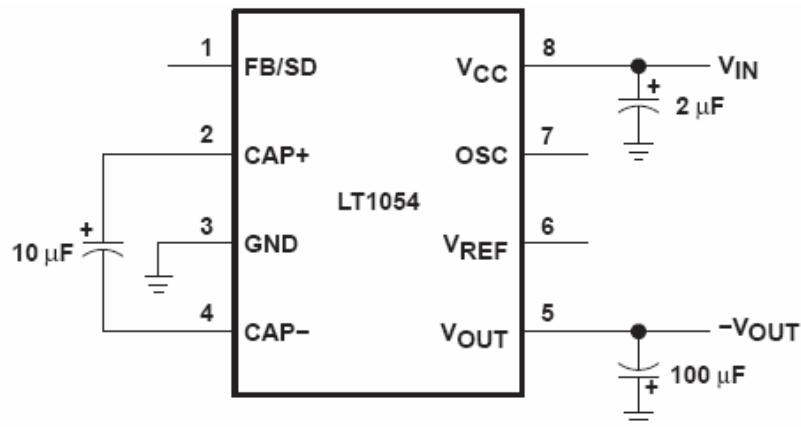
Fuente: Autor del proyecto

El manejo de los capacitores C_1 y C_2 junto con la resistencia de 10 k Ω determinan la frecuencia de corte del filtro y el cociente de R_3 y R_1 determina la ganancia. El capacitor que esta en serie con la entrada es el encargado de suprimir la componente de continúa de 2.58 V que genera el Módem HT2012.

El amplificador operacional utilizado para diseñar el filtro fue el LM741 ya que posee las características de alimentación dual, rapidez de respuesta y baja inmunidad al ruido, además se evaluó el desempeño del filtro con el LM741 y se consideró adecuado.

El filtro requiere de una alimentación dual de $\pm 5V$, pero el dispositivo sólo nos ofrece una alimentación de $5V$, por lo tanto se hizo necesario hacer una inversión de tensión por medio de un integrado que no estuviese alimentado de forma dual. El integrado es el LT1054, un convertor de tensión por medio de capacitores conmutados que, según la aplicación, generan diferentes niveles de tensión. Una de las aplicaciones del LT1054 es la de inversor básico, que simplemente invierte el nivel de tensión que tiene como entrada. El esquema del inversor de muestra a continuación:

Figura 18. Circuito Inversor de Tensión



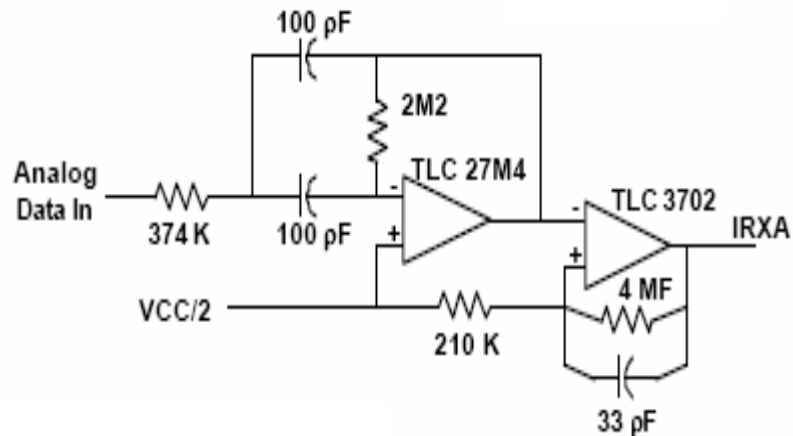
Fuente: LT1054 Datasheet

4.4 Etapa de acondicionamiento de señal a onda cuadrada

La Etapa acondicionamiento de señal a onda cuadrada es un filtro diseñado para recibir las señales enviadas del transmisor de presión. Este se encarga de reducir los niveles de ruido y lo más importante, convierte las señales senoidales recibidas en ondas cuadradas. Esto con el fin de enviar una señal que pueda entender el módem HT2012. La siguiente figura muestra un esquema del filtro, que se

implementó de acuerdo con detalles suministrados por la hoja de datos del Modem HT2012.

Figura 19. Etapa Bandpass filter



Fuente: Hart Modem HT2012 Datasheet

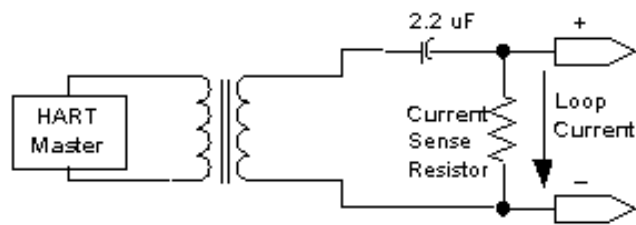
Este es un filtro de configuración pasa-bajos acompañado de un comparador básico que genera ondas cuadradas, limitándolas según el nivel de tensión de entrada, es decir, las tensiones durante el segmento positivo de la onda senoidal se limita a un mismo nivel de aproximadamente 5V y las tensiones en el segmento negativo pasan a tener un nivel cercano a 0V. El integrado utilizado para el comparador fue el TLC 3702 de *Texas Instruments*, un comparador de voltaje de bajo consumo de potencia y alimentación sencilla.

El filtro pasa-bajo se usa para reducir los niveles de ruido inducidos en la señal de recepción y eliminar componentes de altas frecuencias enviadas del transmisor. Las frecuencias de corte alto y bajo son 1200 Hz y 2200 Hz, respectivamente. El amplificador utilizado es TLC1079, un amplificador operacional de precisión de alta impedancia, baja disipación de potencia y una alimentación sencilla.

4.5 Etapa de Interfaz con el transmisor de presión

Esta etapa corresponde al acoplamiento final entre el dispositivo y el transmisor de presión. La presencia de un maestro no debe interrumpir la señal analógica del lazo de 4-20mA. Para esto las señales Hart del maestro deben ser acopladas a través de la resistencia de carga hasta el esclavo sin perturbar la señal. Las técnicas de acoplamiento más típicas son hechas a través de transformadores o capacitores. En la figura 20 se puede observar el acoplamiento tipo transformador. Este tipo de acoplamiento se usa cuando se desconoce la alimentación del sistema.

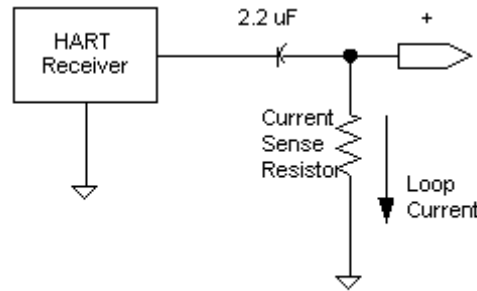
Figura 20. Acoplamiento con transformador



Fuente: Using the AMIS A5191 HART™ MODEM

En la figura 21 se observa el acoplamiento tipo capacitivo. Este tipo de acoplamiento se utiliza cuando el maestro es alimentado por una batería o una fuente de poder aislada.

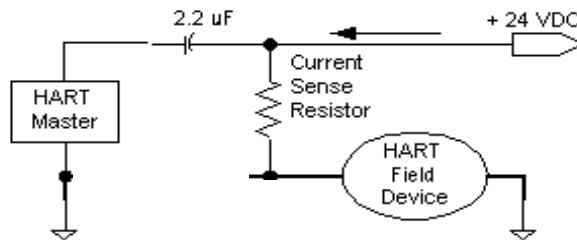
Figura 21. Acoplamiento capacitivo



Fuente: Using the AMIS A5191 HART™ MODEM

Debido a que el dispositivo es portátil este se alimenta de una batería, por ello para la Etapa *Hart Interface* se usó el acoplamiento capacitivo el cual simplemente consta de un capacitor de 10uF conectado como se muestra en la figura 22.

Figura 22. Conexión Esclavo – Maestro



Fuente: Using the AMIS A5191 HART™ Modem

Debido a que una conexión Hart es duplex, utiliza el mismo canal para transmisión y para recepción, se requieren de unos switches que se abran o se cierran dependiendo de si se está transmitiendo o recibiendo. Para esto se utilizó el integrado TC4066 el cual consta de cuatro switches controlados digitalmente. De

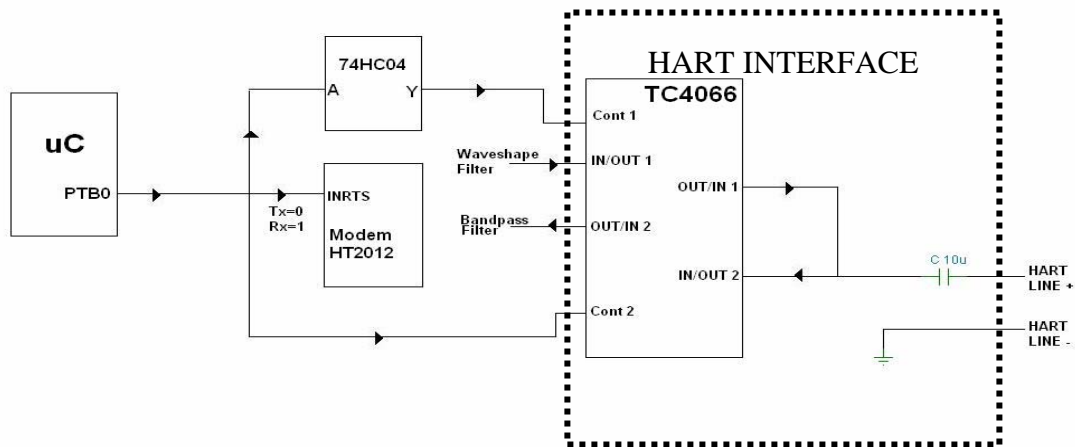
estos cuatro switches solo se aprovecharon dos, uno para transmisión y el otro para recepción. El switch estará abierto cuando la señal de control tome un valor bajo y estará cerrado cuando este valor se encuentre en alto.

Ya que la transmisión y recepción son controladas por el microcontrolador en el puerto PTB0 o el mismo pin INRTS del módem HT2012, se utilizó esta misma señal para controlar la apertura y cierre de los switches del TC4066.

El puerto PTB0 toma un valor bajo cuando el dispositivo quiere transmitir. Es por esto que debe negarse esta señal utilizando el integrado 74HC04 para que al final tome un valor alto y pueda controlar el cierre del switch de transmisión. Mientras tanto el switch de recepción se encontrará abierto debido a que es controlado por la señal de PTB0. Lo contrario sucede cuando el dispositivo quiere recibir, el switch de recepción se cerrará mientras que el de transmisión se abrirá.

Al final la unión entre el integrado TC4066 y el acoplamiento capacitivo es lo que forman la Etapa Hart Interface mostrada en la figura 23.

Figura 23. Etapa Hart Interface

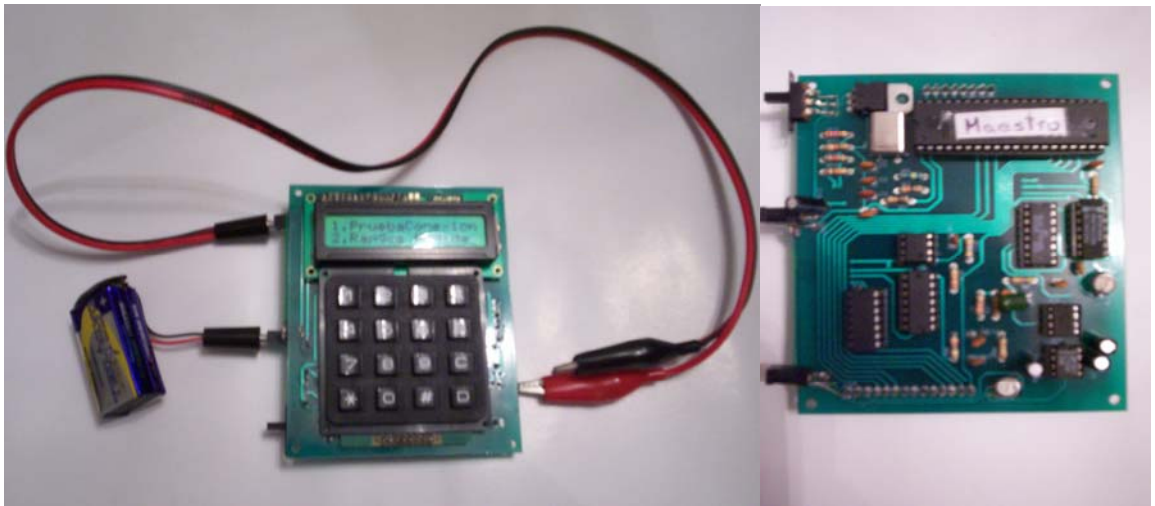


Fuente: Autor del proyecto

4.6 *Dispositivo final*

Ya una vez diseñado y acoplado todas las etapas, se tiene el dispositivo final. Este dispositivo tiene como fin el ensamblar, enviar y recibir señales Hart. El circuito se puede observar en la figura 25 y el dispositivo como tal en la figura 24.

Figura 24. Foto del dispositivo por ambas caras



Fuente: Autor del proyecto

5. IMPLEMENTACIÓN Y PRUEBA DEL DISPOSITIVO

En este capítulo se muestra la culminación del proceso y la presentación de los resultados obtenidos incluyendo la evaluación y corrección de los errores en cada una de las etapas del dispositivo. Al final se plantea una solución para obtener una conexión exitosa entre el dispositivo y un dispositivo opcional, diseñado para simular el transmisor de presión.⁵

Existe un procedimiento que debe efectuarse para verificar la conexión entre un dispositivo de comunicación Hart y el esclavo, o para nuestro caso el transmisor de presión.

Lo primero que debe hacerse es verificar el cableado y la alimentación del esclavo. El transmisor de presión debe estar conectado a través de la fuente de poder y la resistencia de carga. El transmisor debe tener mínimo una tensión de 16V. La resistencia de carga debe ser como mínimo de 250 Ω . Una vez conectado el dispositivo es necesario verificar si este induce una cantidad de ruido que puede ser nocivo para el sistema. Cuando no se establece comunicación (ni el maestro ni el esclavo están transmitiendo), el ruido debe ser de más o menos 20mVp-p. Una interferencia mayor entre los 50 y 60 Hz puede ser aceptada. Si existe una interferencia mayor de 20mVp-p en la región de los 900Hz a los 2.5KHz, esto puede representar un problema, debido a que incluye las frecuencias de operación.⁶

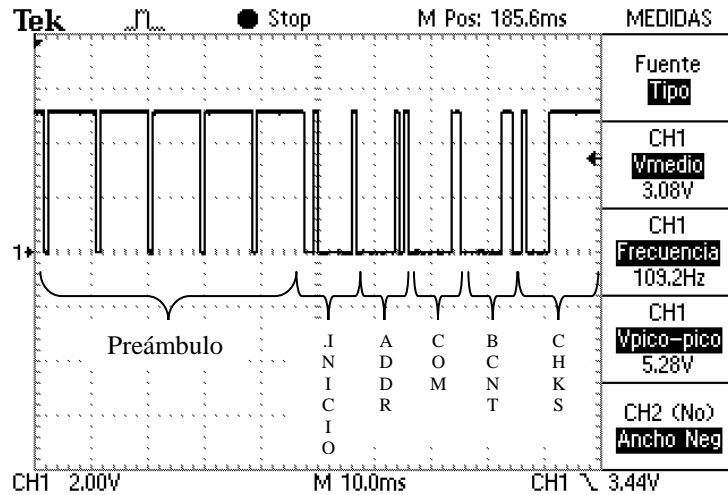
⁵ Esto se hizo necesario debido a que no se pudo conseguir un comunicador Hart para poder contrastar el mensaje del dispositivo con el del comunicador Honeywell.

⁶ Esta información proviene de la página de Internet www.analogservices.com/about_part2.htm consultada en Diciembre de 2006.

Con el osciloscopio conectado en la red se puede visualizar la transmisión del maestro. La señal transmitida no puede interrumpir la señal analógica de 4-20mA sino que se superpone en ella. La primera señal que se transmite es el comando 0, el inicio de esta señal debe contener como mínimo 5 preámbulos, si esto no es así puede que se esté cambiando el puerto PTB0 de un valor alto a uno bajo demasiado tarde. Una vez verificado los preámbulos con sus respectivos bits de inicio, se identifica el resto del mensaje. Para cada campo, en la estructura del mensaje Hart, la secuencia de bits es la siguiente: Bit de inicio, Bit menos significativo,..., Bit mas significativo, Bit de paridad impar y Bit de fin. Un total de once bits por cada campo. La duración de cada bit es alrededor de $833.33\mu\text{s}$ lo cual equivale a una transmisión de 1200bps. Si al final de señal, parte de la suma de comprobación no aparece, quiere decir que el puerto PTB0 está cambiando de un valor bajo a un valor alto demasiado rápido. En la red deben aparecer dos mensajes Hart: el mensaje del maestro y el mensaje que proviene del esclavo. El primero debe tener una amplitud típica entre los 300-500mVp-p y el segundo, una amplitud de más o menos 250mVp-p.

Ya teniendo el dispositivo y verificado los 4-20mA sobre el lazo, este se conectó al transmisor de presión y se tecleó el número uno, obteniendo una pantalla con Error en Conexión. Esto significaba que existía un error en el mensaje o que el dispositivo no estaba bien conectado. Para verificar la conexión se siguieron los pasos ya mencionados y se verificó el mensaje Hart enviado, se pudo visualizar que éste estaba incompleto: faltaba una última parte del campo correspondiente a la suma de comprobación, esto indicaba que el pin INRTS o el puerto PTB0 estaba cambiando a un valor alto muy rápido haciendo que el Módem HT2012 cambiara de su modo modulación a demodulación sin haber transmitido todo el mensaje. Este problema se corrigió empleando un tiempo mayor en el cambio de valor bajo a valor alto del pin INRTS. El siguiente paso fue visualizar las señales etapa por etapa. En las siguientes figuras se muestran las señales obtenidas.

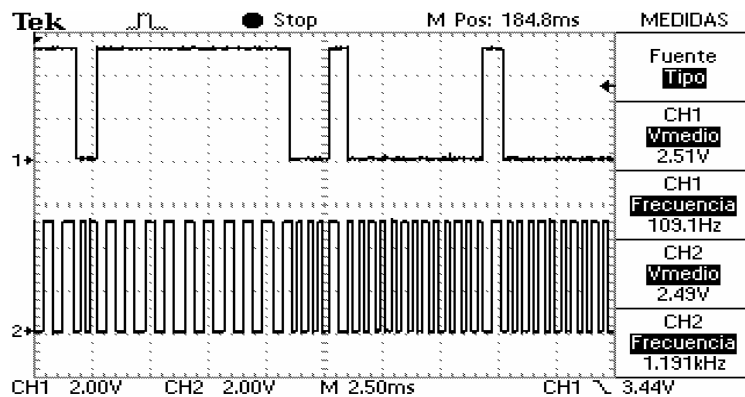
Figura 26. Señal Etapa Control y visualización



Fuente: Autor del Proyecto. Osciloscopio Tektronix

En la figura 26 se puede observar un mensaje Hart ensamblado por el microcontrolador que se envía al Módem HT2012 y corresponde al comando 0. Se puede distinguir los cinco bytes de preámbulo (FF hex) con sus respectivos bits de inicio en cero. Después de los bytes de preámbulo vienen el byte de INICIO (02 hex: 00100000001), ADDR (80 hex: 00000000101), COM (00 hex: 00000000011), BCNT (00 hex: 00000000011) y CHKS (82 hex: 00100000111).

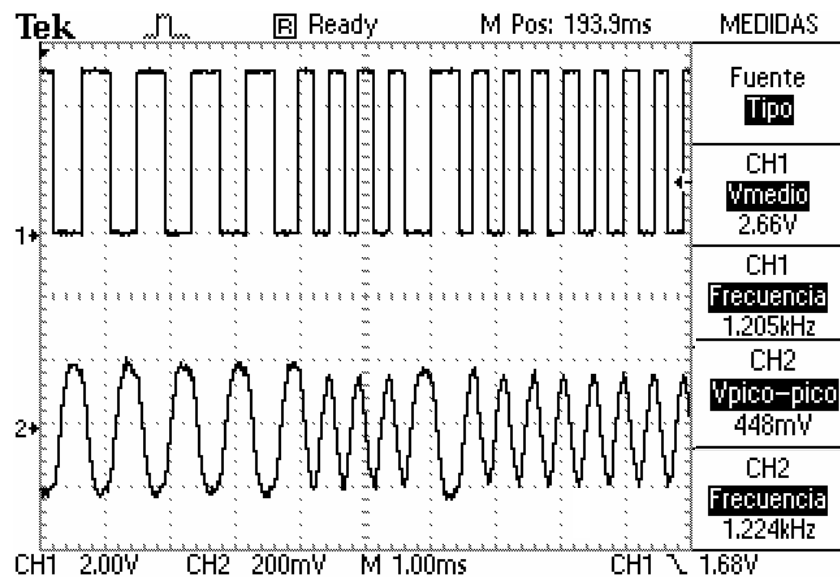
Figura 27. Señal Etapa de codificación



Fuente: Autor del Proyecto. Osciloscopio Tektronix

En la figura 27 se observa la modulación que lleva a cabo el Módem HT2012 con respecto a la señal del microcontrolador. En el canal uno se visualiza un fragmento de la señal del GP32 y en el canal dos la señal generada por el Módem, la cual contiene una señal cuadrada de 1200 y 2200 Hz para los unos y ceros respectivamente.

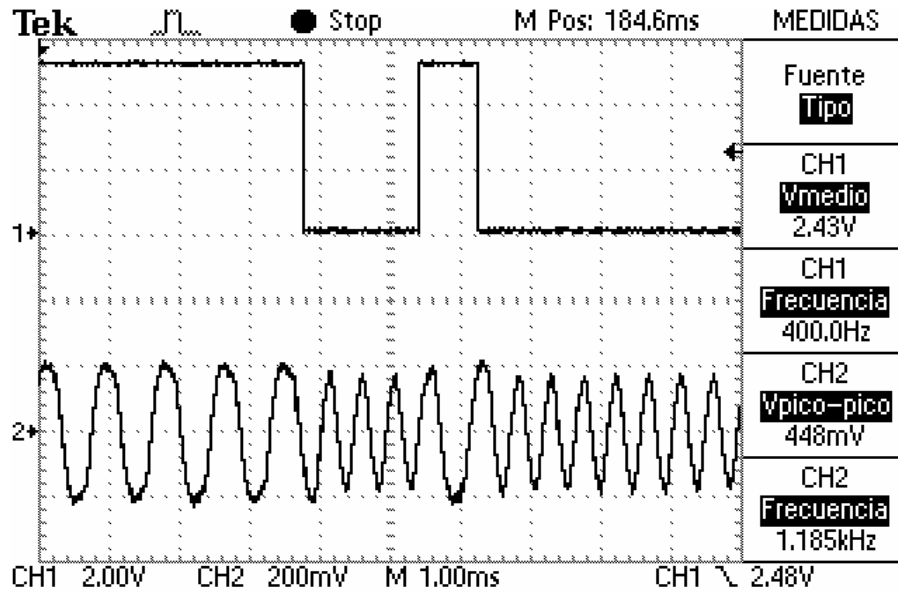
Figura 28. Señal Etapa Acondicionamiento Onda Cuadrada



Fuente: Autor del Proyecto. Osciloscopio Tektronix

En la figura 28 se observa la señal de la etapa Waveshape filter. En el canal uno se encuentra la señal generada por el Módem y en el canal dos la señal senoidal de 1200 y 2200 Hz.

Figura 29. Señal HART



Fuente: Autor del Proyecto. Osciloscopio Tektronix

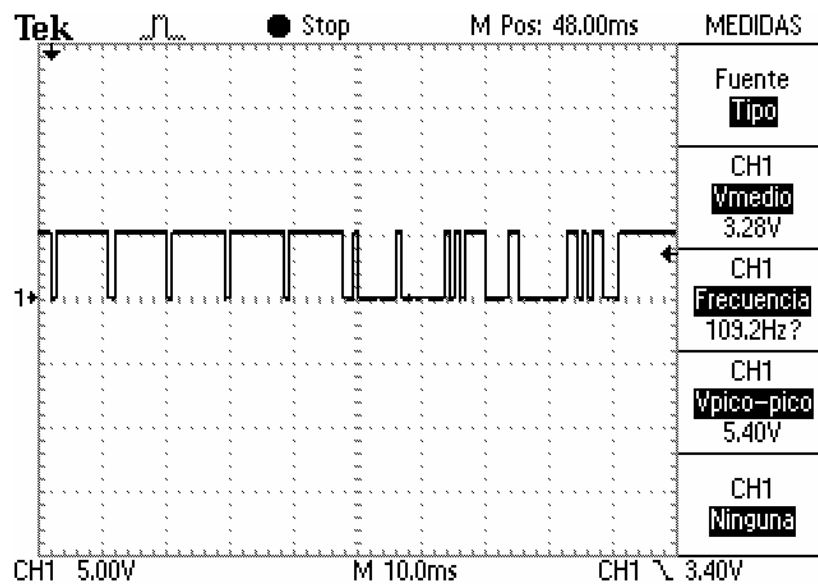
En la figura 29 se observa una comparación entre la señal del microcontrolador, canal uno, y la señal que se envía al transmisor de presión, canal dos. Esta señal cumple con los requerimientos dados por el protocolo de comunicación Hart. Es una señal senoidal con una amplitud entre los 300 - 500mV p-p, con una frecuencia de 1200 y 2200 Hz para los unos y ceros respectivamente y con una velocidad de transmisión de 1200 bps.

Aún teniendo una señal Hart que cumple con todas las especificaciones del protocolo, no se obtuvo una conexión exitosa entre el dispositivo y el transmisor de presión. Por lo tanto se planteó la idea de diseñar un dispositivo que presentara las mismas características del maestro pero que cumpliera con la función de esclavo. Para este nuevo dispositivo, llamado esclavo, se le diseñó un nuevo programa que entendiera los comandos enviados por el maestro y diera una respuesta adecuada. El programa del esclavo tiene capacidad para responder a los comandos 0, 15 y 35. Esto con el fin de entablar comunicación entre los dos

dispositivos con capacidad de protocolo Hart y descartar la idea de un supuesto error en la señal.

El dispositivo del esclavo es similar al del maestro pero con la diferencia de que en vez de tener un menú con dos opciones, este muestra en su LCD una petición para ingresar por medio del teclado un valor para la presión. Este valor simula la presión que está leyendo el transmisor de presión en ese instante. Una vez tecleada la presión, el esclavo queda en modo de recepción esperando a que le llegue una petición o comando para así dar la respuesta adecuada. La respuesta al comando 0 tiene una modificación con tal de enviar en dicha respuesta la información de presión que en ese momento se le esta dando. Las respuestas a los comandos 15 y 35 tienen el mismo formato dado por el protocolo de comunicación Hart.

Figura 30. Comando 15



Fuente: Autor del Proyecto. Osciloscopio Tektronix

En la figura 30 se muestra la señal correspondiente al comando 15, adquirida de la etapa del microcontrolador. En ella se puede observar los cinco bytes de preámbulo (FF hex) con sus respectivos bits de inicio en cero, el byte de INICIO (02 hex: 00100000001), ADDR (80 hex: 00000000101), COM (0F hex: 01111000011), BCNT (00 hex: 00000000011) y CHKS (8D hex: 01011000111).

El dispositivo diseñado para simular el esclavo o transmisor de presión, no tiene capacidad de manejar señales de corriente por lo cual las señales que envía son de tensión. Estas señales equivalen a las señales de corriente del transmisor de presión convertidas en tensión debido a la resistencia de carga del lazo de conexión visto en la figura 5 del primer capítulo.

Los dos dispositivos tienen su propia alimentación y son conectados directamente ya que los dos manejan señales de tensión, haciendo innecesaria la conexión de la resistencia de carga y la fuente de 24 volts.

Una vez los dispositivos fueron conectados y encendidos, se introdujo la presión deseada para el esclavo y después se accedió a la opción uno del maestro teniendo una conexión exitosa y visualizando en su LCD la presión del esclavo. Luego se accedió a la opción dos del maestro obteniendo una pantalla que pide el valor inferior. Una vez ingresado se obtiene otra pantalla que pide el valor superior. Al teclear los dos valores se obtuvo una pantalla con conexión exitosa y los respectivos valores ingresados.

Esto demuestra que la operación de envío de los comandos 0, 15 y 35 y la recepción de sus respectivas respuestas es exitosa. La comunicación entre estos dos dispositivos comprueba la no existencia de errores en el manejo de señales Hart y la buena codificación y decodificación de las mismas.

Aunque no se pudo establecer comunicación con el transmisor de presión, existe la seguridad de que el dispositivo es capaz de enviar, recibir y entender señales establecidas por el protocolo de comunicación Hart.

Puede existir un posible error para la no comunicación con el transmisor de presión. Esta teoría se basa en que la compañía Honeywell puede haber implementado un código de seguridad para controlar la programación de sus dispositivos y por lo tanto se requiera enviar una trama de bits antes de remitir la información establecida para los comandos basados en el protocolo Hart. La compañía Honeywell siempre recomienda la revisión de los software de sus comunicadores. Este software solo son despachados por Honeywell. Cabe la posibilidad de que la información de la trama de bits de seguridad pueda venir incluida en tal software.

CONCLUSIONES

- ◆ El protocolo Hart es de vital importancia para el conocimiento de los estudiantes ya que es un protocolo de comunicación que se usa ampliamente en la industria, debido a que permite un manejo de señales con información, codificadas en frecuencias de 1200 Hz y 2200 Hz, montadas en el lazo de corriente de 4 a 20 mA, el cual es el estándar para la transmisión industrial.
- ◆ El diseño del dispositivo no se pudo haber logrado sin la implementación del microcontrolador MC68HC908GP32, ya que su fácil programación permitió la generación y envío de comandos Hart, usando los módulos de comunicación serial (SCI) y de timer (TIM), así como el uso de sus puertos para la interfaz con el usuario.
- ◆ Se concluyó que la utilidad que brinda el módem HT2012 de *Smar Company*, es su capacidad de acondicionar las señales digitales que provienen del microcontrolador para convertirlas en señales análogas con frecuencias de 1200 o 2200 Hz, esto lo hace a gran velocidad de respuesta, sin introducir ruido y no requiere, como ocurre con el microcontrolador, tanta circuitería externa.
- ◆ El diseño de la etapa de interfaz del dispositivo con el transmisor de presión es óptima, debido a que las reglas del protocolo Hart indican que la señal de

4-20mA no debe ser interrumpida y la señal del dispositivo debe ser superpuesta a esta señal.

- ◆ El funcionamiento del dispositivo se resume en la generación, acondicionamiento y manejo que se le da a las frecuencias de 1200 y 2200 Hz, porque en ellas va estar la información de los comandos y respuestas que se están transmitiendo entre el microcontrolador y el esclavo.

- ◆ Aunque no se pudo establecer comunicación con el transmisor de presión, existe la seguridad de que el dispositivo es capaz de enviar, recibir y entender señales implantadas por el protocolo de comunicación Hart, debido a la exitosa comunicación establecida con un nuevo diseño que simula las respuestas del esclavo.

- ◆ El haber diseñado y construido un programador en base en el protocolo Hart, permitió que se adquirieran amplios conocimientos sobre este importante protocolo de comunicación industrial.

RECOMENDACIONES

- ◆ Un factor que influye en el funcionamiento de las frecuencias de operación es el reloj de 460.8 kHz que controla el módem HT2012, por lo tanto se recomienda verificar dicha frecuencia con regularidad tal como se muestra en la figura C2 del anexo C.

- ◆ El dispositivo tiene la capacidad para manejar los comandos 0, 15 y 35, si se llegase a necesitar otras funciones implementando otros comandos, solo se hace necesario la reprogramación del microcontrolador.

- ◆ Este estudio representa el primer proyecto realizado en la escuela sobre el protocolo Hart, por esto se recomienda continuar el estudio y motivar la realización de proyectos que involucren este importante protocolo industrial.

- ◆ La recomendación para próximos trabajos sobre el tema de Hart, es la de utilizar circuitos integrados que agrupen las diferentes etapas de acondicionamiento de la señal, como por ejemplo, el integrado HT3012 de *Smar Company*.

- ◆ La próxima generación, en lo respecto a sistemas de comunicación Hart, es el protocolo Hart inalámbrico; por lo tanto se recomienda que los próximos estudios involucren este nuevo protocolo.

- ◆ Se le recomienda a la escuela gestionar la inversión en dispositivos que puedan complementar el estudio de protocolos industriales, y así ampliar el uso y funcionalidad del laboratorio de instrumentación electrónica.

BIBLIOGRAFÍA

AMIS. Using the AMIS A5191 HART™ Modem. Application Note. Rev 1.4. May 2006

BARRÓN RUIZ, Mariano. Visualización de números reales en los Microcontroladores de 8 bits, Universidad del País Vasco. España.

FEBRES URDANETA, Erika. Protocolo de comunicación Hart para los instrumentos de Flotech S.A. Tesis de grado para obtener el título de Ingeniero Electrónico. Universidad Simón Bolívar. Venezuela. Febrero de 2001.

FREESCALE. MC68HC908GP32 Datasheet. Rev 7. 2006

HART COMMUNICATION FOUNDATION. Hart Application Guide. Austin Texas, USA 1999

----- . Hart Field Communication Protocol An Introduction for Users and Manufacturers. Rev. 1995. Texas, USA.

HELSON, Ron. Hart Tutorial, Hart Communication Foundation. Austin Texas, USA.

HONEYWELL. ST3000 Smart Transmitter. Release 300 with HART Communications Option. User Manual. Phoenix, USA. October 2005

PHILLIPS. 74HC/HCT04 Hex Inverter. Datasheet. September 1993.

----- . 74HC4066 Quad bilateral switches. Datasheet. Rev. June 2003

SAMSON AG MESS UND REGELTECHNIK. Hart Communications (Technical Information). Frankfurt, Alemania.

SMARRESEARCH. Hart Modem HT2012 Datasheet. New York, USA.

----- . Full Featured Hart Modem HT3012 Datasheet. New York, USA.

SEIXAS FILHO, Constantino. Introducción al Protocolo HART. UFMG. Departamento de Ingeniería Electrónica. Brasil 2004

TEXAS INSTRUMENTS. LT1054 Switched – Capacitor Voltage Converters with Regulators. Datasheet. Rev. 2004.

----- . TLC3702 Dual Micropower LinCMOS Voltage Comparators. Datasheet. Rev. 1998.

-----, TLC1079 LinCMOS μ power Precision. Operational Amplifiers. Datasheet.
Rev. March 2001.

REFERENCIAS

<http://www.thehartbook.com/technical.htm>

<http://www.hartcomm.org/>

<http://www.smarresearch.com>

<http://www.smar.com/products>

<http://www.hartcomm2.org/index.html>

<http://www.amis.com>

http://www.analogservices.com/about_part0.htm

<http://www.ti.com>

<http://www.analog.com>

<http://www.emersonprocess.com>

<http://www.samson.de>

ANEXOS

ANEXO A Formato IEEE 754

Básicamente, este formato representa los números reales en notación científica, lo que le permite escribir números muy grandes y muy pequeños con el menor número posible de dígitos, por ejemplo el número 0.0000009876 se representa como 9.876×10^{-7} .

Los números en coma flotante IEEE 754 tienen cuatro componentes básicos: el signo S, la mantisa M, la base que siempre es 2 y no se representa y el exponente E. El primer bit es el bit de signo S que vale 0 para los números positivos y 1 para los números negativos. El estándar contempla varios formatos para representar números con distintos grados de precisión, sin embargo, los microcontroladores de 8 bits usan casi exclusivamente el formato de simple precisión. La figura A1 muestra los formatos IEEE 754 de simple precisión (32 bits).

Figura A1. Formato IEEE 754. Simple precisión



Fuente: Visualización de números reales en los microcontroladores de 8 bits

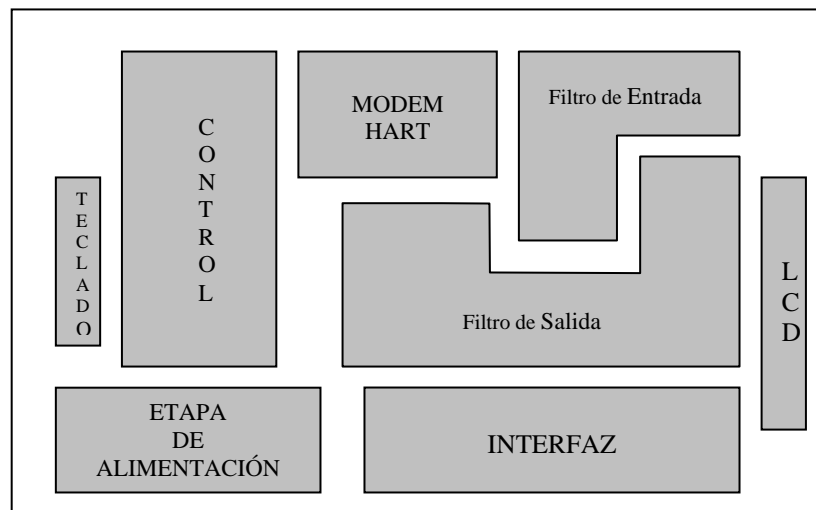
La representación IEEE 754 supone que el número siempre está normalizado, lo que significa que el valor de la mantisa se encuentra comprendido entre 1 y 2. Como el bit más significativo de la mantisa siempre vale 1, no necesita ser escrito de forma explícita, de esta forma se consigue representar una mantisa de 24 (o 53) bits utilizando sólo 23 (o 52) bits. Una mantisa de 24 bits proporciona 7 dígitos decimales de precisión ($2^{24} \approx 1.68 \times 10^7$) y una mantisa de 53 bits supone 15 dígitos decimales de precisión ($2^{53} \approx 9 \times 10^{15}$).

Es muy fácil convertir números reales a formato IEEE 754 y viceversa. El número decimal -21,25 se convierte en primer lugar a su equivalente en base dos: -10101,01. El bit de signo debe ser 1 por tratarse de un número negativo. A continuación debe desplazarse la coma para conseguir que la mantisa se encuentre comprendida entre 1 y 2, lo cual conduce al valor $1,010101 \times 2^4$. Si se utiliza el formato de simple precisión se obtiene el campo del exponente añadiendo al verdadero exponente, 4, el desplazamiento, 127, obteniéndose el valor $131 = 10000011b$. Si se unen todos los campos en una palabra de 32 bits se obtiene $[1][10000011][0101010000000000000000] = 0xC1AA0000$, obsérvese que se ha omitido el bit más significativo (1) de la mantisa.

ANEXO B Diseño del PCB

El diseño del PCB, por sus siglas en ingles (*Printed Circuit Board*), se hizo con un programa libre de edición limitada conocido como *EAGLE Layout Editor*. El PCB se diseño de tal manera que quedaran las etapas mencionadas en el capítulo 4 y que fueran reconocidas cada una. El diseño final tiene la siguiente estructura con cada una de las etapas:

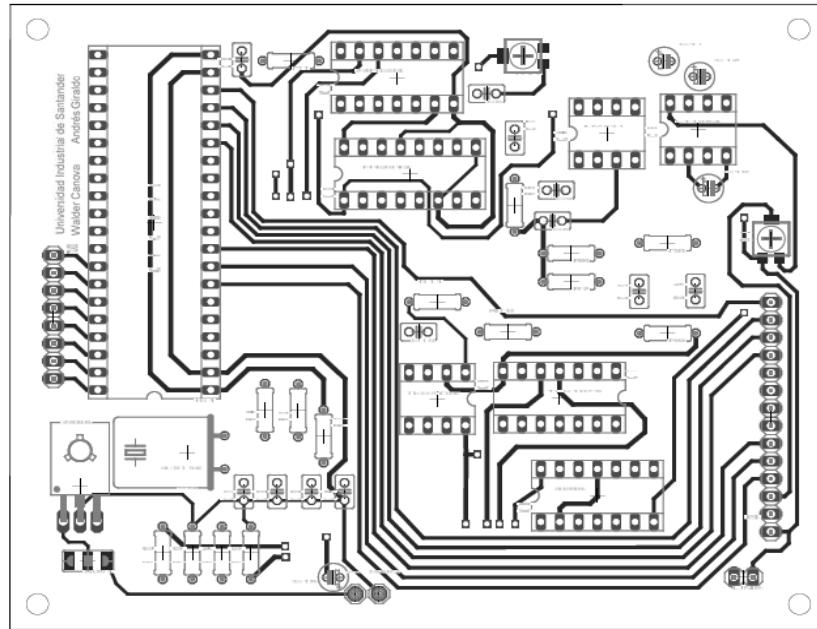
Figura B1. Secciones del PCB



Fuente: Autor del proyecto

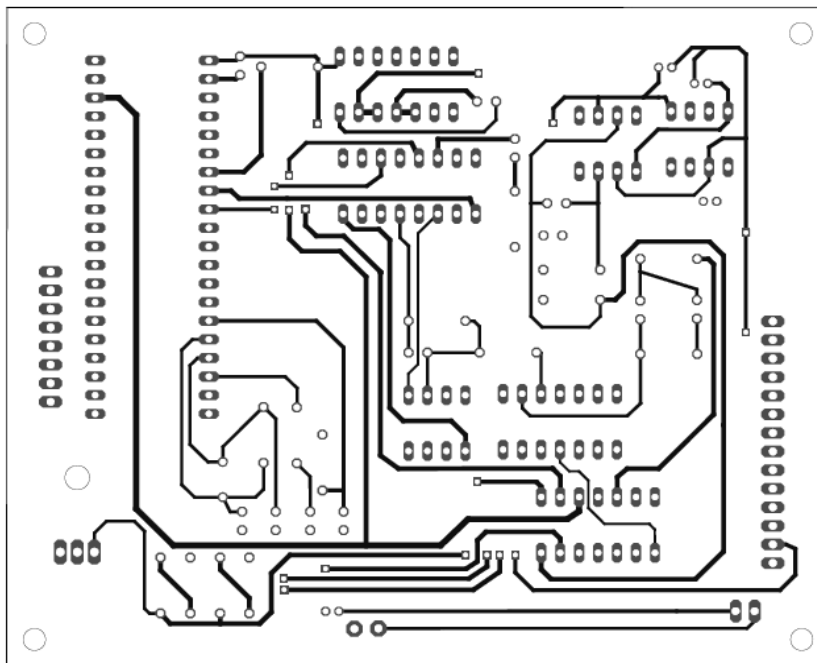
Siguiendo esta distribución, las caras superior (*top*) e inferior (*bottom*) del PCB quedaron de la siguiente manera:

Figura B2. Cara superior del diseño del PCB



Fuente: Autor del proyecto

Figura B3. Cara superior del diseño del PCB



Fuente: Autor del proyecto

Recomendaciones y Características

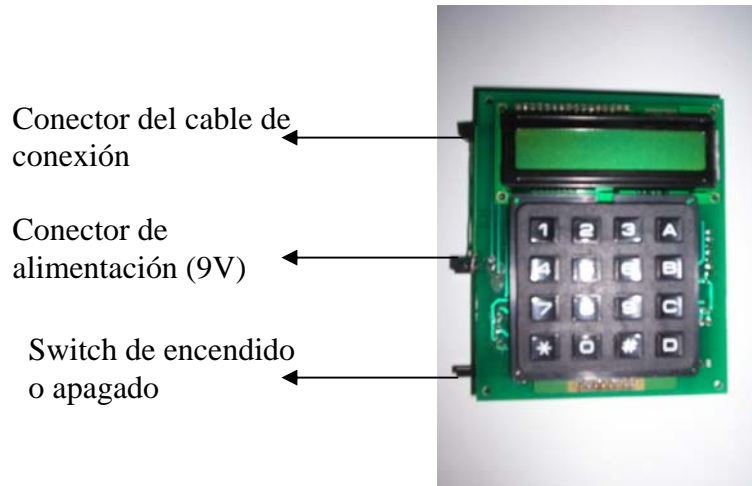
El diseño de la PCB del dispositivo tiene las siguientes características:

- El tamaño de la tarjeta es de 90 cm. de ancho y 110 cm. de largo.
- La cara superior del PCB esta destinada para colocar los elementos de la tarjeta. Por otra parte, en la cara inferior se ubico el LCD y el teclado.
- El ancho de las pistas depende de la longitud de la misma y de la cantidad de corriente eléctrica que fluya en ella. Para nuestro caso, el ancho varió de 0.3 a 0.6mm, según la disposición y la longitud que se necesitaba para la pista.
- La separación para pistas depende de la diferencia de tensión entre ellas, según *Matsuchita Electric Works*, para un diferencial de 0 a 50 V solo es necesario una separación mínima de 0.3 mm, pero se utilizaron separaciones entre pistas mayores de 0.5 mm.
- Cabe mencionar que no es recomendable que los ángulos de las pistas sean de 90° sino que cambien con ángulos de 135°. Esto es debido a la impedancia que se forma.

ANEXO C Manual del Dispositivo

Este dispositivo fue diseñado con el fin de cambiar los rangos superior e inferior de un transmisor de presión Honeywell y funciona de una forma sencilla. La alimentación es de 9V y puede ser de una pila o de un adaptador. Una vez conectada la alimentación se conecta el cable de conexión el cual enlaza el dispositivo con el transmisor de presión. Esto se puede visualizar en la siguiente figura.

Figura C1. Conectores y switch del dispositivo



Fuente: Autor del proyecto

El cable de conexión tiene dos terminales, uno de color rojo y el otro negro. El de color rojo ira a la terminal con signo + del transmisor de presión mientras que el de color negro ira a la terminal con signo -.

Al encender el dispositivo en el LCD se muestra un menú con dos opciones:

1. Prueba Conexión
2. Rangos Medida

Con la tecla del número uno se accederá a la opción de “*Prueba Conexión*” y este determinará si existe una correcta conexión entre el dispositivo y el transmisor de presión. Si luego de teclear el número uno el LCD muestra una pantalla con “*Error Conexión*”, se debe revisar la conexión del dispositivo, de lo contrario aparecerá una pantalla con “*Conexión exitosa*”.

Con la tecla del número dos se accederá a la opción “*Rangos Medida*”, si existe una correcta conexión entre el dispositivo y el transmisor de presión se visualizará en el LCD un mensaje con “*Valor Inferior*”. Aquí se debe introducir el rango inferior que se desea.

Una vez ingresado el valor inferior aparecerá una nueva pantalla con “*Valor Superior*” Aquí se debe introducir el rango superior deseado. Cuando se termina la operación el LCD muestra una pantalla con “*Conexión Exitosa*” y los respectivos valores superior e inferior.

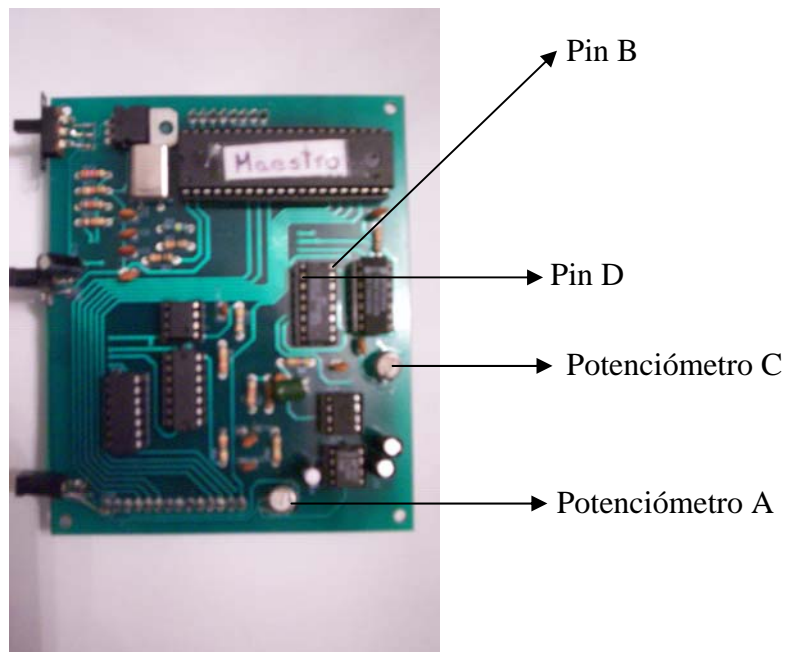
Hay que tener en cuenta que el valor superior debe ser mayor al valor inferior y que los valores no pueden exceder 100psi. Las teclas A,B,C, D, * y # no tienen ninguna función.

Recomendaciones:

El contraste del LCD se puede variar con el potenciómetro A, el cual se indica en la figura C2.

Hay que mantener una frecuencia igual a 460.8 KHz en la señal del pin B, mostrado en la figura C2, la cual puede ser corregida por el potenciómetro C. Una vez corregida la señal de 460.8 KHz se debe revisar la señal del pin D, la cual debe ser igual a 19.2KHz.

Figura C2. Pines y potenciómetros del PCB



Fuente: Autor del proyecto