

**DESARROLLO DE UN TRANSMISOR DE PRESIÓN CON CAPACIDAD DE  
COMUNICARSE EN UNA RED PROFIBUS**

**JORGE ENRIQUE FERNANDEZ BARONA**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA.  
INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
SANTIAGO DE CALI  
2015**

**DESARROLLO DE UN TRANSMISOR DE PRESIÓN CON CAPACIDAD DE  
COMUNICARSE EN UNA RED PROFIBUS**

**JORGE ENRIQUE FERNANDEZ BARONA**  
*(jefb1989@hotmail.com)*

Trabajo de grado presentado como requisito  
para optar por el título de Ingeniero Electrónico

**DIRECTOR:**

**ING. ASFUR BARANDICA LÓPEZ M.SC.**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA.  
INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
SANTIAGO DE CALI**

**2015**

## Nota de aceptación

---

---

---

---

---

---

---

**Director: Ing. Asfur Barandica López M.Sc.**

---

Jurado:

---

Jurado:

## Contenido

|                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| INTRODUCCION .....                                                                                  | 1  |
| OBJETIVOS .....                                                                                     | 2  |
| Objetivo general.....                                                                               | 2  |
| Objetivos específicos .....                                                                         | 2  |
| MARCO TEÓRICO.....                                                                                  | 3  |
| 1.    COMPENSACION DEL SENSOR PIEZORRESISTIVO .....                                                 | 3  |
| 1.1    El Sensor Piezorestivo .....                                                                 | 3  |
| 1.2    Procesamiento digital de señales de sensores (Digital Sensor Signal Processing - DSSP) ..... | 5  |
| 2.    PROFIBUS DP .....                                                                             | 7  |
| 2.1    Funcionamiento de PROFIBUS .....                                                             | 7  |
| 2.2    Versiones de PROFIBUS DP .....                                                               | 8  |
| 2.3    Modelo OSI (Open System Interconnection).....                                                | 9  |
| 2.4    Capa física .....                                                                            | 9  |
| 2.5    Capa de enlace .....                                                                         | 12 |
| 2.6    Campos y tipos de tramas .....                                                               | 16 |
| 2.7    Inicialización.....                                                                          | 21 |
| 2.8    Intercambio de datos .....                                                                   | 27 |
| 2.9    Diferentes Aplicaciones (FREEZE, SYNC, WATCHDOG).....                                        | 27 |
| PROGRAMACION, CONSTRUCCIÓN Y DESARROLLO .....                                                       | 28 |
| 3.    CARACTERIZACIÓN DEL SENSOR .....                                                              | 28 |
| 4.    COMPENSACIÓN DEL SENSOR.....                                                                  | 29 |
| 5.    HARDWARE PARA LA COMPENSACIÓN.....                                                            | 31 |
| 5.1    DSSP .....                                                                                   | 31 |
| 5.2    Amplificador operacional .....                                                               | 32 |
| 5.3    Sensor de presión.....                                                                       | 33 |
| 6.    CIRCUITO DE COMPENSACIÓN.....                                                                 | 33 |
| 7.    PROGRAMA DE TOMA DE DATOS DE PRESIÓN EN EL DSSP .....                                         | 34 |
| 8.    HARDWARE PROFIBUS .....                                                                       | 35 |
| 9.    ESQUEMA DE TRANSMISIÓN DE PRESIÓN .....                                                       | 37 |

|      |                                                      |    |
|------|------------------------------------------------------|----|
| 10.  | SECUENCIA DE TRAMAS DEL PROTOCOLO PROFIBUS .....     | 38 |
| 11.  | PROCESAMIENTO Y RESPUESTA DE TRAMAS PROFIBUS.....    | 39 |
| 12.  | ACOPLE DE COMPENSACIÓN Y COMUNICACIÓN PROFIBUS ..... | 41 |
| 13.  | HARWARE TRANSMISOR DE PRESIÓN .....                  | 42 |
|      | PRUEBAS Y RESULTADOS.....                            | 44 |
| 14.  | PRUEBA DE COMUNICACIÓN .....                         | 44 |
| 14.1 | Trama de solicitud de estatus FDL .....              | 46 |
| 14.2 | Trama diagnóstica 1 .....                            | 46 |
| 14.3 | Trama de Parametrización .....                       | 47 |
| 14.4 | Trama de configuración .....                         | 47 |
| 14.5 | Trama de diagnóstico 2 .....                         | 48 |
| 14.6 | Trama de Intercambio de datos .....                  | 48 |
| 14.7 | Red Profibus con diferentes esclavos .....           | 49 |
| 15.  | PRUEBA DE MEDIDA DE PRESIÓN.....                     | 50 |
| 16.  | PRUEBA DE VELOCIDAD .....                            | 52 |
| 17.  | PRUEBA DE CONSUMO .....                              | 52 |
|      | CONCLUSIONES.....                                    | 53 |
|      | TRABAJOS FUTUROS .....                               | 54 |
|      | REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....                     | 55 |

## INTRODUCCION

La presión es la variable más medida en el mundo después de la temperatura, debido a esto los transmisores de presión son dispositivos ampliamente utilizados en el control y monitoreo de cientos de procesos; además, dichos sensores también pueden ser utilizados para medir de forma indirecta otras magnitudes como la velocidad, el nivel, el caudal, la altura, el flujo de gases y fluidos. Debido a que los sistemas de control son cada vez más grandes y complejos se requiere de un sistema de comunicación rápido, eficaz y confiable que permita conectar y comunicar componentes de automatización como PLC's, PC's, esclavo y actuadores de manera rápida y segura.

Profibus es un protocolo de comunicaciones industriales que optimiza los procesos de automatización facilitando aumentar la capacidad de los equipos conectados en cuanto a configuración y diagnóstico, permitiendo alcanzar altos y confiables niveles de velocidad de comunicación con la gran ventaja de que al ser un protocolo de comunicación industrial libre se puede operar con equipos de diferentes fabricantes.

La medición de la presión se realiza por medio de un material piezoresistivo, altamente utilizado en el control de procesos y automatización industrial por su alta sensibilidad y rápida respuesta, sin embargo se debe tener en cuenta que este puede presentar cambios en su funcionamiento debido a fluctuaciones de temperatura alterando su respuesta de salida, lo que puede dificultar la medición; por ende es necesario realizar un procedimiento de compensación. Una vez compensado el sensor, este posee diferentes cualidades; pues a pesar de que los sensores piezoresistivos son sistemas electromecánicos que reaccionan a la compresión, los elementos sensoriales muestran casi una deflexión nula, lo que convierte a los sensores piezoeléctricos en una herramienta de gran precisión. Este tipo de sensores cuentan con una frecuencia natural extremadamente alta y una excelente linealidad en amplio rango. Además, la tecnología piezoresistiva es insensible a campos electromagnéticos y radiación, lo que facilita realizar mediciones bajo condiciones adversas.

En este trabajo de grado se implementa un método de compensación para el sensor piezoresistivo, para posteriormente realizar la integración y desarrollo del protocolo Profibus en una plataforma electrónica microcontrolada obteniendo en el ensamble un transmisor de presión con capacidad de comunicarse en una red Profibus.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

Desarrollar un transmisor de presión basado en un sensor semiconductor piezoresistivo con capacidad de comunicarse en una red Profibus.

### **Objetivos específicos**

- Seleccionar e implementar un sistema electrónico que permita la compensación y calibración del sensor piezoresistivo en un rango de temperatura específico.
- Diseñar e implementar una plataforma electrónica que permita al transmisor de presión comunicarse en una red Profibus.
- Verificar el funcionamiento básico del transmisor de presión en una red Profibus.

# MARCO TEÓRICO

## 1. COMPENSACION DEL SENSOR PIEZORRESISTIVO

### 1.1 El Sensor Piezorresistivo

En 1954 C.S. Smith descubre el efecto piezorresistivo en materiales semiconductores como el silicio y el germanio, a pesar de que en los metales ya se evidenciaba variación en su resistencia eléctrica cuando eran sometidos a esfuerzos mecánicos. En los materiales semiconductores como el silicio el cambio era mucho más intenso, ya que en los metales la variación de la resistencia obedece principalmente a un origen dimensional mientras que en los semiconductores la variación se debe básicamente a un cambio de resistividad. Un material piezorresistivo se basa en que su resistividad es una función del estrés interno (presión) por lo que el sensor reacciona con un cambio de resistencia ante una presión ejercida, siendo el cambio de resistividad proporcional al cambio en la presión.

$$\frac{\Delta R}{R} = K \times \Delta \varepsilon \quad (1)$$

Donde **R** es la resistencia, **K** es una constante de proporcionalidad, también conocida como factor de galga, y **ε** es la deformación unitaria [5].

Los sensores piezorresistivos de silicio son extremadamente sensibles a los cambios de temperatura, tanto así que se puso en duda su viabilidad debido a que no son solo sensibles a la presión; experimentalmente se ha determinado que el efecto piezoresistivo disminuye con la temperatura, lo que genera algunos comportamientos no deseables como los que se describen a continuación:

- **No linealidad:** es la desviación de una línea recta (Figura 1.) que representa la magnitud de salida en función de la misma entrada. La no linealidad del sensor piezoresistivo es estable en el tiempo por lo que es posible corregirla con un circuito que considere las variaciones por los coeficientes de temperatura, permitiendo compensar al sensor y mejorando notablemente su linealidad.

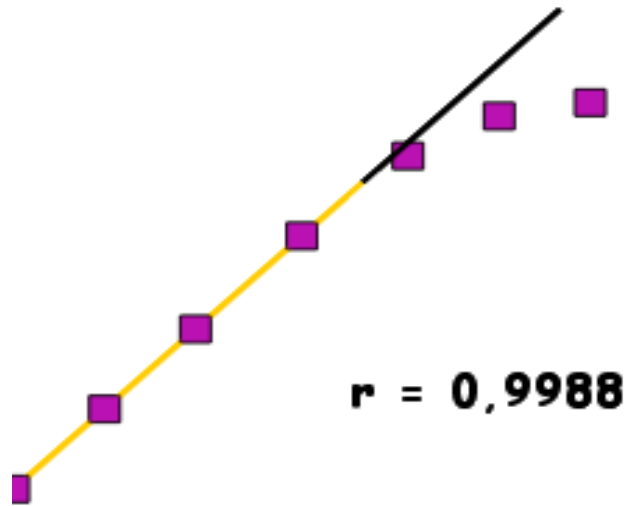


Figura 1. No linealidad

- **Offset:** es el valor que toma la salida del sensor sin recibir un estímulo diferente al de las condiciones del ambiente. El offset es uno de los parámetros del sensor más impredecible, por lo que presenta un error de estabilidad (capacidad de un sensor para mantener la misma función de transferencia durante el periodo de tiempo determinado).
- **Histéresis:** la histéresis es la tendencia de conservar un valor de salida en ausencia del estímulo que lo generó. La histéresis térmica afecta la repetitividad lo que disminuye la confiabilidad del sensor.
- **Repetitividad:** se define como la habilidad de un instrumento para entregar el mismo valor de la señal de salida ante un mismo valor de la señal de entrada en repetidas ocasiones y con las mismas condiciones de operación. Teniendo en cuenta que la temperatura afecta la función de transferencia del sensor, si la temperatura varía este presentaría un valor de salida diferente ante un mismo valor de entrada en diferentes ocasiones.
- **Sensibilidad:** es la razón de cambio entre la respuesta a la salida ante un estímulo en la entrada. La sensibilidad en un sensor piezoresistivo está sujeta al factor de galga  $K$  (1), el cual puede variar dependiendo de la temperatura lo que variaría la sensibilidad del sensor piezoresistivo.

Los sensores piezoresistivos tienen muchas ventajas, sin embargo requieren ser compensados; esta compensación se puede llevar a cabo en el dominio análogo y

en el dominio digital. Para efectos de este trabajo se explorará únicamente el dominio digital.

## 1.2 Procesamiento digital de señales de sensores (Digital Sensor Signal Processing - DSSP)

El DSSP realiza la compensación y calibración de la temperatura en el dominio digital, utilizando tanto la señal de presión como la señal de temperatura del sensor. En este proceso no se dispone de una salida análoga, además el tiempo de respuesta es limitado por la velocidad del procesador. La resolución del DSSP establece los límites de cuantificación tanto para la lectura de la presión como la de temperatura. Los transductores más precisos utilizan conversores análogo-digital con una resolución de hasta 24 bits. [5]

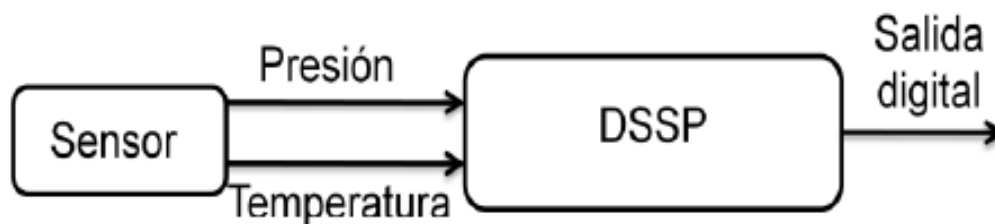


Figura 2. Modelo típico de procesamiento digital de señales de sensores.

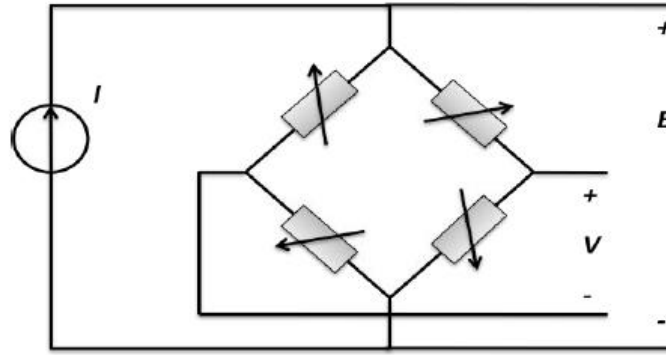
En la Figura 2, se observa que la señal del sensor es corregida y compensada por el DSSP teniendo en cuenta la temperatura. Para realizar la compensación digital se requiere caracterizar el sensor a compensar con el fin de conocer su respuesta ante los cambios de temperatura. El proceso de caracterización mide el valor de la salida en todo el rango de presión y en un rango amplio de temperatura; para lo cual se requieren equipos especializados.

Existen diferentes tipos de algoritmos de compensación, como por ejemplo:

- Aproximación lineal a la presión y a las derivas de temperatura
- Aproximación lineal a la presión y parabólica a las derivas de temperatura
- Aproximación parabólica a la presión y a las derivas de temperatura
- Aproximación polinomial de tercer orden
- Aproximación a la superficie mediante segmentación
- Aproximación mediante redes neuronales artificiales

Con base en investigaciones previas y para efecto de este proyecto se profundizo en la aproximación parabólica a la presión y a las derivas de temperatura ya que es el algoritmo seleccionado para compensar la transmisión de presión.

Para aplicar del siguiente método es necesario tener en cuenta que el sensor de presión es alimentado con corriente y la señal de temperatura es proporcional al voltaje de alimentación, como se observa en la figura.



### 1.2.2 Aproximación parabólica a la presión y a las derivas de temperatura

La aproximación parabólica a la presión y derivas de temperatura reduce significativamente la no linealidad de presión en el sensor usando un polinomio de segundo orden: Donde  $P$  es la presión medida,  $V$  el voltaje de salida del sensor y  $E$  el voltaje de alimentación.

$$P = A_0 + A_1V + A_2V^2 \quad (2)$$

Los coeficientes  $A_0$ ,  $A_1$  y  $A_2$ , tendrán una aproximación parabólica a la temperatura:

$$A_0 = B_{00} + B_{01}E + B_{02}E^2 \quad (3)$$

$$A_1 = B_{10} + B_{11}E + B_{12}E^2 \quad (4)$$

$$A_2 = B_{20} + B_{21}E + B_{22}E^2 \quad (5)$$

Finalmente la ecuación para el cálculo de la presión se define como:

$$P = B_{00} + B_{01}E + B_{02}E^2 + B_{10}V + B_{11}EV + B_{12}E^2V + B_{20}V^2 + B_{21}EV^2 + B_{22}E^2V^2 \quad (6)$$

Donde  $B_{00}, B_{01}, \dots, B_{22}$  son coeficientes desconocidos, por lo que es necesario contar como mínimo con tres medidas de presión y tres medidas de temperaturas diferentes para calcular el valor de cada uno de los coeficientes.

## 2. PROFIBUS DP

Profibus (Process Field Bus) es un estándar para la comunicación de bus de campo en la tecnología de automatización; es un protocolo abierto e independiente del proveedor. Profibus fue promovida inicialmente por el Departamento Alemán de educación e investigación (BMBF) en 1989 y en el año 2000 pasó a formar parte de la norma internacional IEC 61158.

Profibus fue desarrollado por primera vez en el año 1989 y se encuentra normalizado mediante el estándar IEC 61158 e IEC 61784. Es un bus de campo serie que proporciona una conexión descentralizada entre los sensores, actuadores y módulos de E/S. Se caracteriza por una alta velocidad, eficacia y conexión de bajo costo; esta especialmente diseñado para la comunicación entre los sistemas de automatización y el equipo periférico distribuido.

El protocolo es regulado por la Profibus Internacional (PI) de la cual hacen parte alrededor de 800 fabricantes, lo que permite conectar sin problemas dispositivos de los fabricantes más diversos convirtiéndolo en el bus de campo más exitoso del mercado con 43.8 millones de dispositivos instalados al finalizar el 2012 [1].

### 2.1 Funcionamiento de PROFIBUS

Profibus es una red de comunicación basada en la dinámica maestro esclavo, donde el maestro es el encargado de realizar el control del proceso, basándose en los datos que recoge de las estaciones esclavas.

- **Maestro:** Son los dispositivos encargados de mantener el protocolo de comunicación y ejecutar las rutinas de control que hayan sido asignadas y/o programadas, son los encargados de impartir órdenes y de controlar el acceso al medio o también llamado bus de campo.
- **Esclavo:** Son dispositivos tipo sensores, actuadores o controladores que se encargan de transmitir información al maestro, se les llama pasivos porque no son autónomos y solo responden a solicitudes del maestro. Un esclavo nunca comunicara si el maestro no ha hecho una solicitud previa.

La familia Profibus está conformada por tres versiones compatibles (Figura 3):

- **Profibus DP:** Este perfil fue diseñado para la comunicación entre sistemas de control automático, ofrece la funcionalidad de intercambiar datos de forma rápida y cíclicamente, es el perfil más utilizado pues es útil al trabajar con altas velocidades y sus conexiones son de bajo costo.
- **Profibus PA:** Este perfil es una solución para la automatización de procesos y tiene una característica muy importante que es la transmisión con seguridad intrínseca lo que permite que sea utilizado en zonas de alto peligro y ambientes hostiles.
- **Profibus FMS:** Es el perfil que ofrece varias funciones sofisticadas de comunicación entre dispositivos inteligentes como los maestros, pero ha sido discontinuado y está siendo remplazado gradualmente por las redes profinet basadas en Ethernet .

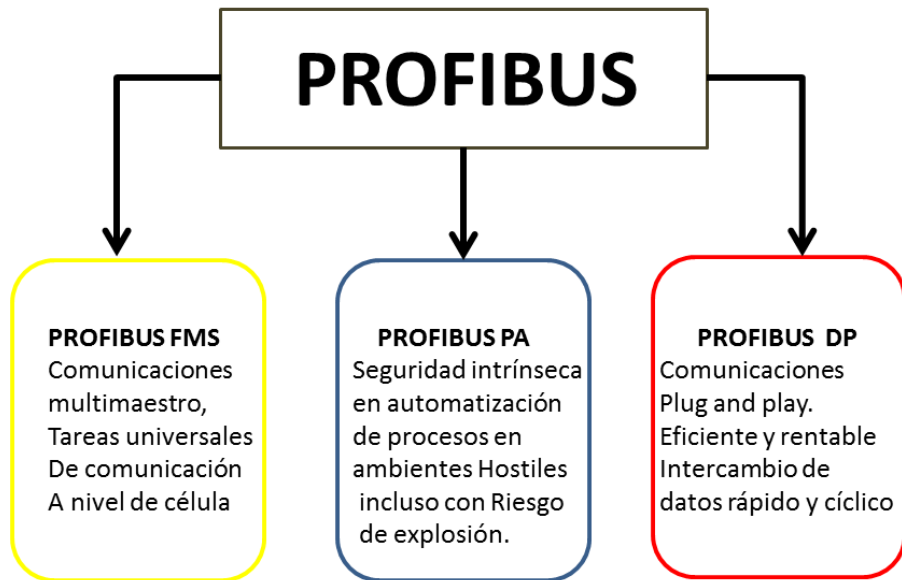


Figura 3. Familia Profibus

## 2.2 Versiones de Profibus DP

Existen 3 versiones de Profibus DP:

- **DP V0:** esta versión comprende intercambio de datos cíclicos, telegramas de diagnóstico, configuración y parametrización. El intercambio de datos es solo Maestro/Esclavo.
- **DP V1:** la versión V1 comprende todo lo de la V0 más la posibilidad de intercambiar datos de forma no cíclica Maestro/Esclavo lo que permite mayor versatilidad.
- **DP V2:** la versión V2 incluye toda la funcionalidad de V1 y adicionalmente permite la comunicación Esclavo/Esclavo lo que permite la sincronización de equipos sobre la marcha mucho más rápidamente y sincronización de reloj.

**Tabla 1. Versiones de Profibus DP.**

| Características de las versiones Profibus DP |                               |                              |             |                                |                           |                               |                              |
|----------------------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------|--------------------------------|---------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| Versiones                                    | Intercambio de datos cíclicos | Comunicación maestro-esclavo | Diagnostico | Intercambio de datos acíclicos | Implementación de alarmas | Intercambio de datos isocrono | Comunicación esclavo-esclavo |
| DP- V0                                       | X                             | X                            | X           |                                |                           |                               |                              |
| DP- V1                                       | X                             | X                            | X           | X                              | X                         |                               |                              |
| DP-V2                                        | X                             | X                            | X           | X                              | X                         | X                             | X                            |

## 2.3 Modelo OSI (Open System Interconnection)

Profibus DP se basa en el modelo OSI (Open System Interconnection). El protocolo PROFIBUS define únicamente las capas 1 (capa física) y 2 (capa de enlace de datos) de las siete capas con las que cuenta el modelo OSI.

**Tabla 2. Equivalencias Modelo OSI - Profibus**

| Modelo OSI  | Profibus DP          |
|-------------|----------------------|
| Capas 3 a 7 | No implementadas     |
| Capa 2      | Capa de enlace o FDL |
| Capa 1      | Capa física          |

## 2.4 Capa física

La capa física es la encargada de la interfaz física entre los dispositivos. La capa 1 realiza la transmisión por RS485.

**RS485:** Es un sistema de transmisión de voltaje diferencial ideal para transmitir a altas velocidades sobre largas distancias. Consta de una instalación sencilla y económica; además cuenta con gran inmunidad al ruido. Pueden conectarse 32 dispositivos al mismo bus. Para el caso de Profibus se utiliza un cable bifilar trenzado y apantallado; el apantallamiento de lámina y de malla lo hace especialmente robusto para el tendido en entornos industriales donde hay fuertes interferencias electromagnéticas. La comunicación es half dúplex, es decir que solo puede haber un dispositivo con acceso al bus los demás estarán en el tercer estado (alta impedancia).

- **Transmisión de datos:**

Profibus utiliza una transmisión de 11 bit (Figura 4), donde:

Bit 1: corresponde al bit de inicio el cual debe tomar el valor 0.

Bit 2 al bit 9: corresponden a los bits de datos, los cuales varían dependiendo del dato a transmitir.

Bit 10: corresponde al bit de paridad, este bit es un bit de seguridad destinado a asegurar que los datos transmitidos y recibidos sean los correctos, Profibus utiliza paridad par.

Bit 11: corresponde al bit de parada, este bit indica que la transmisión del carácter ha terminado y lo indica con este bit el cual siempre debe ir en alto (1).

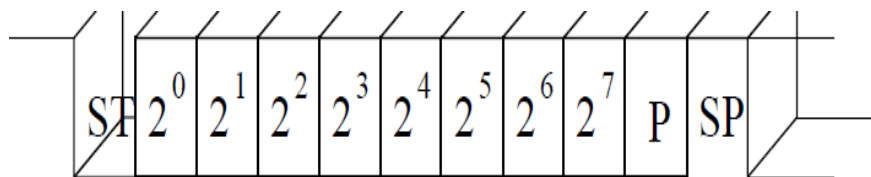


Figura 4. Transmisión de un byte

- **Numero de estación**

La red Profibus permite conectar un máximo de 32 estaciones (maestros o esclavos), en caso de requerir un número mayor de estaciones es posible conectar hasta 9 repetidores lo que permitiría conectar un máximo de 127 estaciones.

- **Parámetros del cable Profibus**

Los parámetros del cable Profibus son especificados en la IEC 61158 y mostrados en la Tabla 3 [1].

**Tabla 3. Parametros del cable Profibus**

| <b>Parámetro</b>                              | <b>Línea PROFIBUS</b> |
|-----------------------------------------------|-----------------------|
| Impedancia en $\Omega$                        | 135 ... 165           |
| Capacitancia por unidad de longitud (pF/m)    | <30                   |
| Resistencia de lazo ( $\Omega$ /km)           | <110                  |
| Diámetro del núcleo (mm)                      | 0,64                  |
| Núcleo sección transversal (mm <sup>2</sup> ) | <0,34                 |

- **Velocidades de transmisión y distancias**

Teniendo en cuenta los parámetros del bus, las distancias máximas alcanzadas se muestran en la Tabla 4. Es posible notar que la velocidad es inversamente proporcional a la distancia, lo que nos indica que a mayor velocidad los tramos o distancias deben ser más cortos. Adicionalmente se evidencia que a velocidades muy altas la distancia máxima de conexión empieza a disminuir; en el caso más crítico a velocidades de 12000 Kbps solo se podrá cablear a un máximo de 100 metros y para velocidades por debajo de los 100 Kbps se podrá utilizar una distancia máxima de 1200 metros.

**Tabla 4. Longitudes del segmento VS velocidades de transmisión**

| <b>Baud rate (Kbps)</b>    | 9,6  | 19,2 | 45,45 | 93,7 | 187,5 | 500 | 1500 | 3000 | 6000 | 12000 |
|----------------------------|------|------|-------|------|-------|-----|------|------|------|-------|
| <b>Distancia máxima(m)</b> | 1200 | 1200 | 1200  | 1200 | 1000  | 400 | 200  | 100  | 100  | 100   |

- **Conector**

Profibus utiliza un conector Db-9 donde los pines conectados se muestran en la Figura 9.

| Pin | Señal           |
|-----|-----------------|
| 1   | Tierra pantalla |
| 3   | B (data-)       |
| 5   | DC(5V)          |
| 8   | A(Data+)        |

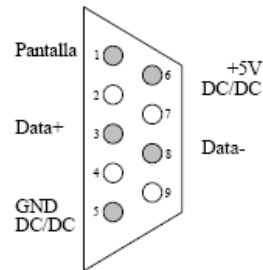


Figura 5. Conector Profibus Db-9

- **Resistencias terminadoras**

Las resistencias terminadoras se instalan al final de la línea de transmisión para ajustar la impedancia de la línea, como también para absorber las señales y evitar rebotes que causen distorsión dentro de la red. En distancias pequeñas a velocidades bajas Profibus puede funcionar sin resistencias terminadoras, pero a distancias grandes y a altas velocidades se recomienda utilizarlas siempre.

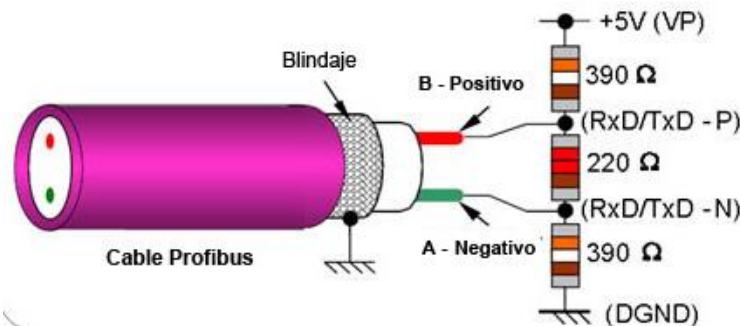


Figura 6. Cable Profibus y resistencias terminadoras

## 2.5 Capa de enlace

La función principal de la capa de enlace de datos es permitir que el enlace físico sea confiable, además de proporcionar los medios para activar, mantener y desactivar el enlace.

### 2.5.1 Dispositivos principales

- **Maestro Clase 1:** son los controladores centrales que intercambian datos con los dispositivos de la red (esclavos u otros maestros). Determinan la velocidad de la red al mismo tiempo que son los encargados de administrar el paso del testigo o token. Puede haber varios maestros clase 1 en la red Profibus.
- **Maestro clase 2:** normalmente utilizado como herramienta de configuración, diagnóstico y arranque. Los maestros clase 2 pueden comunicarse con los maestros clase 1 y el iniciador de la comunicación Maestro – Maestro es siempre el maestro clase 2. No está implementada la comunicación Maestro - Maestro de la misma clase, solo se podrán comunicar entre maestros clase 1 y clase 2.
- **Esclavo:** los esclavos son dispositivos pasivos, en su mayoría son sensores y actuadores; ellos solo tienen acceso al bus de datos cuando el maestro les realiza una petición por lo que solo pueden transmitir cuando el maestro le ha realizado una petición.

### 2.5.2 Acceso al medio

El acceso al medio se realiza de dos formas; la primera es por medio del token o testigo entre maestros y la segunda consiste en la comunicación maestro/esclavo.

La comunicación por token o testigo se realiza entre estaciones principales o maestros, los cuales casi siempre tienen a su cargo otras estaciones pasivas llamadas esclavos. El token rota de estación en estación asignándole un turno a cada estación, lo que permite al maestro que tenga el testigo poder hacer uso del bus por el tiempo que el maestro disponga del testigo; después de este tiempo el maestro entregará el testigo a otro maestro permitiéndole hacer uso del bus y realizar sus tareas. El testigo circula por todos los maestros activos de manera cíclica y con un tiempo de posesión determinado, permitiendo que cada estación tenga la oportunidad de tener acceso a la red en su respectivo turno.

La comunicación Maestro - Esclavo es una comunicación donde el maestro es una estación activa y el esclavo una estación pasiva. Se dice que el maestro es una estación activa porque puede hacer uso de la red Profibus en cualquier momento. El esclavo solo envía sus datos cuando el maestro así lo solicite, por ello se dice que es una estación pasiva o secundaria. En esta dinámica el maestro pregunta a cada estación por medio de una dirección asignada a cada esclavo y cada uno de ellos responderá inmediatamente después de recibir la trama o solicitud; este proceso se realizará de forma cíclica por todos los esclavos

permitiendo actualizar los datos que manipulan estos dispositivos que por lo general son sensores y actuares.

En la Figura 7 se puede observar la comunicación entre el maestro y sus esclavos. El maestro va direccionando peticiones a cada uno de sus esclavos y obteniendo una respuesta de ellos, la cual es guardada por el maestro y procesada por el algoritmo de control implementado en él.

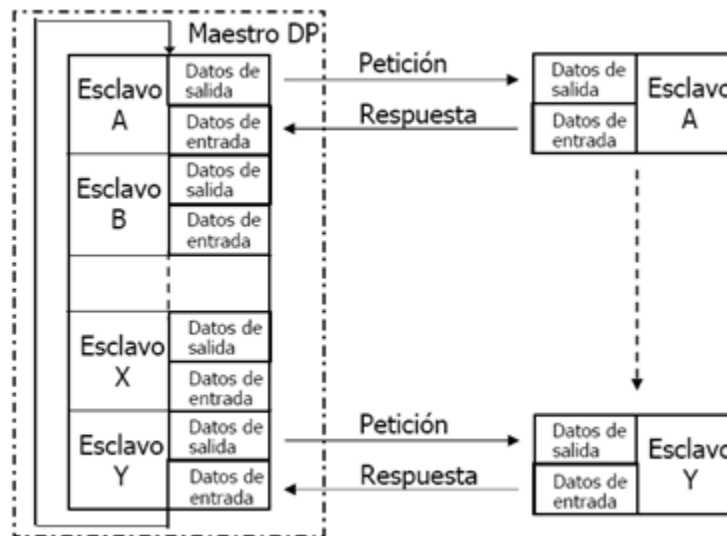
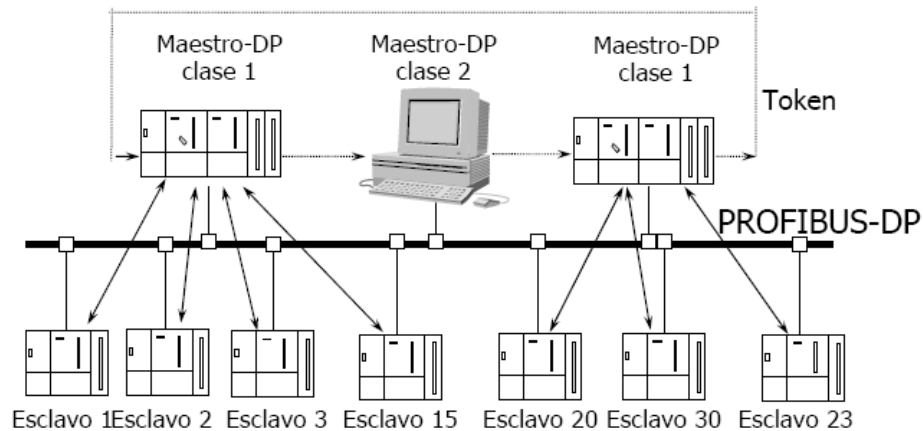


Figura 7. PROFIBUS

En la Figura 8. se muestra un sistema mono maestro, en sistemas de este tipo el token siempre estará en el único maestro ya que no tendrá que compartirlo con ninguna otra estación principal, por lo que el PLC tendrá el bus todo el tiempo a su disposición realizando peticiones cíclicas a sus esclavos asignados.



**Figura 8. Sistema Monomaestro**



**Figura 9. Sistema Multimaestro**

En la Figura 9. se muestra un sistema multimaestro, donde cada maestro tendrá un tiempo definido para hacerle peticiones a sus esclavos asignados, después de haber cumplido el tiempo acordado se entregará el token o testigo a otro maestro para que pueda tener acceso al bus y así este pueda recibir información de sus esclavos. Tanto el token como las peticiones a los esclavos son cíclicas, el token es cíclico entre los maestros y las peticiones son cíclicas entre el maestro y sus esclavos asignados.

## 2.6 Campos y tipos de tramas

Profibus es un protocolo digital que se comunica por paquetes que contienen unos y ceros, los cuales se denominan trama; una trama puede llegar a tener hasta 255 bytes. Una trama Profibus tiene diferentes campos, algunos de ellos se observan en la siguiente tabla:

Tabla 5. Campos de la trama Profibus

| Campo     | Descripción                                                                                               |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| SD        | Es el delimitador de inicio, este byte define el tipo de trama                                            |
| LE        | Define la cantidad de bytes de datos (DU) incluyendo DA, SA, FC, DSAP, SSAP                               |
| LER       | Repite el valor del LE (por seguridad, debido a que él LE no se tiene en cuenta en el FCS)                |
| DA        | Dirección destino, es la dirección a la que debe llegar la trama                                          |
| SA        | Dirección fuente, es la dirección del dispositivo que envía la trama                                      |
| FC        | Código de función que contiene información de control                                                     |
| DSAP-SSAP | Campos adicionales en algunas tramas para reconocer el tipo de datagramas y brindar información adicional |
| DU        | Es el campo de los datos, lo que se desea transmitir por el protocolo de comunicación                     |
| FCS       | Es un byte de verificación donde se suman DA, SA, FC DU para verificación de errores                      |
| ED        | Es el delimitador de fin de trama. Este byte nos indica que la trama ha finalizado, siempre es 0x16.      |

### 2.6.1 Delimitador de inicio (SD)

Existen cuatro tipos de tramas diferentes en Profibus, las cuales se pueden diferenciar con el primer byte de la trama llamado delimitador de inicio (start delimiter SD).

- **Trama de longitud fija sin campo de datos:** tiene como delimitador de inicio el byte *0x10* este tipo de tramas es utilizada durante la inicialización de la red, no tiene campo de datos pues se utiliza para verificar las estaciones activas al inicio del protocolo y para solicitud de datos, como también para buscar nuevas estaciones durante la comunicación con los demás esclavos.

Tabla 6. Trama longitud fija

| SD   | DA | SA | FC | FCS | ED   |
|------|----|----|----|-----|------|
| 0x10 | xx | xx | xx | xx  | 0x16 |

- **Trama de datos con longitud variable:** tiene como delimitador de inicio (SD) *0x68*. Es el tipo de trama más utilizado durante el protocolo de comunicación en el intercambio de datos cíclico; es utilizada para la configuración de diagnóstico, parametrización e intercambio de datos. Esta trama de longitud de datos variable puede llegar a tener hasta 244 byte de datos.

Tabla 7. Trama longitud variable

| SD   | LE | LER | SD   | DA | SA | FC | DU | FCS | ED   |
|------|----|-----|------|----|----|----|----|-----|------|
| 0x68 | X  | X   | 0x68 | X  | X  | X  | X  | X   | 0x16 |

- **Trama de datos con longitud fija:** tiene como delimitador de inicio (SD) *0x0A*. Esta trama tiene un campo de datos fijo que consta de 8 bytes.

Tabla 8. Trama de datos longitud fija

| SD   | DA | SA | FC | DU | FCS | ED   |
|------|----|----|----|----|-----|------|
| 0x0A | X  | X  | X  | X  | X   | 0x16 |

- **Trama token:** Tiene como delimitador de inicio (SD) *0xDC* esta trama es utilizada para el paso del testigo entre maestros; es la más sencilla de todas pues esta compuesta por solo 3 bytes, delimitador de inicio(SD), la

dirección del maestro al que se le da el testigo (DA) y la dirección del maestro que lo tenía (SA). La trama del paso del token es la única trama que no contiene delimitador de fin de trama (ED).

Tabla 9. Trama paso del Token

| SD   | DA | SA |
|------|----|----|
| 0xDC | x  | X  |

### 2.6.2 Campo LE

Es utilizado en la trama de longitud de datos variables, LE define la cantidad de bytes de datos (DU), incluyendo DA, SA, FC, DSAP, SSAP; es muy importante debido a que el dispositivo que recibe la trama debe conocer cuántos bytes corresponden al DU y cuantos a los demás campos de la trama para poder procesarla de manera adecuada, por lo que si se busca conocer cuántos bytes de datos contiene una trama, es necesario aplicar la ecuación 7.

$$BytesDU = BytesLE - (BytesDF + BytesDD + BytesFC + BytesDSAP + BytesSSAP) \quad (7)$$

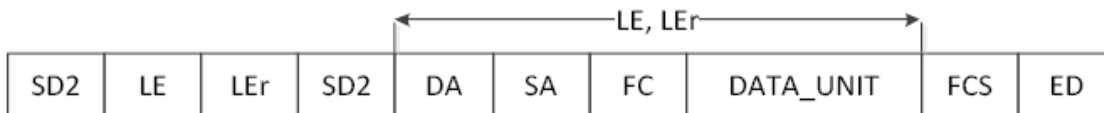


Figura 10. Bytes en LE y LER

### 2.6.6 Código de función FC

Este byte contiene información de control específica del tipo de telegrama (solicitud, respuesta, ack), el tipo de estación (pasiva o activa/ esclavo o maestro), prioridad y telegrama de reconocimiento (Ack positivo o negativo) [2].

Tabla 10. Estructura del bytes del FC [1]

| Bit 2 <sup>7</sup> | Bit 2 <sup>6</sup> | Bit 2 <sup>5</sup> | Bit 2 <sup>4</sup> | Bit 2 <sup>3</sup> | Bit 2 <sup>2</sup> | Bit 2 <sup>1</sup> | Bit 2 <sup>0</sup> |
|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Res                | Tipo de trama      | FCB                | FCV                | Nº de código       |                    |                    |                    |
|                    |                    | Tipo de estación   |                    |                    |                    |                    |                    |

Los elementos descritos en la Tabla 10 corresponden a:

- Res: El remitente fija un “0” binario, el receptor no necesita interpretar.
- Tipo de trama  $\begin{cases} 0 \text{ trama de envio/solicitud} \\ 1 \text{ trama de respuesta ACK} \end{cases}$

**Tabla 11. Tipo de estación**

| FCB | FCV | Tipo de estación                      |
|-----|-----|---------------------------------------|
| 0   | 0   | Estación esclava.                     |
| 0   | 1   | El maestro todavía no está listo.     |
| 1   | 0   | Maestro, listo para el anillo lógico. |
| 1   | 1   | Maestro, está en el anillo lógico.    |

**Tabla 12. Función (Bit de trama en el FC=1)**

| Función (Bit de trama en el FC=1)           | Código N° |
|---------------------------------------------|-----------|
| SDN prioridad baja                          | 4         |
| SDN prioridad alta                          | 6         |
| Reservado/Solicitud de datos de diagnóstico | 7         |
| Solicitud del estado FDL con respuesta      | 9         |
| SRD prioridad baja                          | 0xC       |
| SRD prioridad alta                          | 0xD       |
| Solicitud ID con respuesta                  | 0xE       |
| Solicitud del estado LSAP con respuesta     | 0xF       |

- SDN: es un servicio de control global permite a un maestro transferir datos a una sola estación o a múltiples estaciones (multicast) con una misma trama. Los esclavos no responden las tramas SDN solo reciben los datos que esta le suministra y generalmente utilizado para activar y desactivar.

- SRD: este servicio permite a un maestro transferir datos a una estación remota y a la misma vez solicitar datos. Los esclavos deben responder con una trama al servicio SRD ya sea con la entrega de datos, indicación de que el dato no está disponible o con una confirmación de recibido.

**Tabla 13. Función (Bit de trama en el FC=0)**

| Función (Bit de trama en el FC=0)                                                 | Número del código |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| Ack positivo.                                                                     | 0                 |
| Ack negativo (FDL/FMA1/2 error de usuario (UE), error de interfaz).               | 1                 |
| Ack negativo: Ningún recurso para enviar datos (RR), Ej.: sin espacio de memoria. | 2                 |
| Ack negativo sin servicio activado (RS), SAP no activado.                         | 3                 |
| Respuesta FDL/FMA 1 / 2 a los datos con prioridad baja y envío de datos ok.       | 8                 |
| Ack negativo sin respuesta FDL/FMA 1 / 2 Datos y envío de datos ok.               | 9                 |
| Respuesta FDL datos prioridad alta y envío de datos ok.                           | 0x0A              |
| Respuesta FDL datos prioridad baja sin recurso para enviar datos.                 | 0x0C              |
| Respuesta FDL recursos datos prioridad alta para enviar datos.                    | 0x0D              |

### 2.6.7 SSAPs y DSAPs

Los siguientes DSAPs (Destination Service Access Point) y SSAPs (Source Service Access Point) son definidos y reservados para el intercambio de datos cíclicos en Profibus en el caso en que otros protocolos sean usados de forma simultánea a Profibus DP. Los DSAPs y SSAPs no son considerados en la cabecera de la trama Profibus, ya que solo aparecen en algunas ocasiones para procesos determinados, por lo que cuando una trama tiene SSAPs y DSAPs en la dirección destino y fuente se pone en uno el bit más significativo convirtiendo así una dirección que sería la 0x06 en 0x86 y el valor del SSAPs y DSAPs se ubica en las primeras dos posiciones del campo de datos DU.

**Tabla 14. Trama con DSAP y SSAP**

| SD   | LE | LER | SD   | DA | SA | FC | DU   |      |    | FCS | ED   |
|------|----|-----|------|----|----|----|------|------|----|-----|------|
|      |    |     |      |    |    |    | DSAP | SSAP | DU |     |      |
| 0x68 | X  | X   | 0x68 | X  | X  | X  | X    | X    | X  | X   | 0x16 |

- SAP 0x36: comunicación Maestro-Maestro (M-M)
- SAP 0x37: cambio de dirección de la estación (Set\_Slave\_Add)

- SAP 0X38: leer entradas (Rd\_Inp)
- SAP 0X39: leer salidas (Rd\_Outp)
- SAP 0X3A: control global (Global\_Control)
- SAP 0X3B: leer datos de configuración (Get\_Cfg)
- SAP 0X3C: leer información de diagnóstico (Slave\_Diagnosis)
- SAP 0X3D: enviar datos de parametrización (Set\_Prm)
- SAP 0X3E: verificar datos de configuración (Chk\_Cfg)

### 2.6.8 DU

El campo del DU (Datos), es el campo donde va contenida la información que se desea transmitir. Esta información puede tener desde 1 byte hasta 244 bytes si el DU de alguna manera es afectado por el ruido y contiene un error, el FCS debe detectar el error ya que el FCS garantiza la confiabilidad de los datos en el DU.

### 2.6.9 Byte de verificación (Frame Check Sequence FCS)

El FCS detecta errores en la trama en los campos de DA, SD, FC, Dsap, Ssap y DU es calculado por el emisor de la trama y recalculado por el receptor; en ambos casos el FCS debe ser el mismo si por algún motivo son diferentes indicaría que la trama recibida contiene errores y debe ser desechada.

El FCS se calcula con la siguiente formula teniendo en cuenta que solo tomará los 8 bit menos significativos de la suma y desechara el resto.

$$FCS = DA + SD + FC + DSAP + SSAP + DU \quad (8)$$

### 2.6.10 Final de trama ED

El byte ED es el que advierte que la trama se terminó y que el próximo bytes ya es perteneciente a una trama diferente. El byte ED siempre tiene el valor de 0x16.

## 2.7 Inicialización

### 2.7.1 Telegramas de configuración, diagnóstico y parametrización

Cuando un esclavo es conectado a la red Profibus, este debe pasar por una fase de inicialización donde se configura y se parametriza el esclavo (Figura 11), de acuerdo con los parámetros y condiciones de la red en la que va a operar.

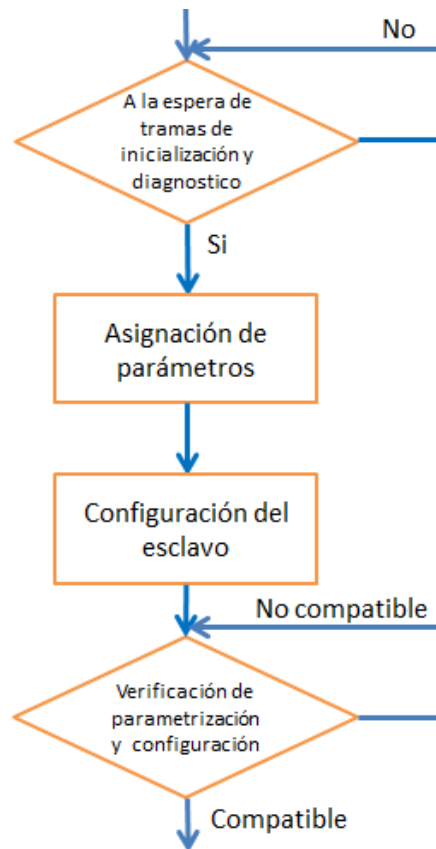


Figura 11. Secuencia de inicialización del esclavo Profibus

Secuencia de comunicación Maestro-Esclavo (Figura 12):

- **Maestro:** envía solicitud de trama diagnóstica (para conocer el estado del esclavo).
- **Esclavo:** responde la solicitud de trama diagnóstica con otra trama de longitud variable donde indica el estado y condición en la que está.
- **Maestro:** envía trama de parametrización con los parámetros de la red.
- **Esclavo:** responde con un ACK al recibir la trama de parametrización.
- **Maestro:** envía trama de configuración al esclavo con los datos y valores de configuración.
- **Esclavo:** responde con un ACK cuando recibe la trama de configuración.
- **Maestro:** vuelve a enviar una solicitud de trama diagnóstica para conocer el estado del esclavo y verificar si está listo para el intercambio de datos.

- **Esclavo:** responde esta trama diagnostica en base a los telegramas de parametrización y configuración si los parámetros y datos de configuración son compatibles con el esclavo, inmediatamente se pasa a intercambio de datos. Si por el contrario en la trama de parametrización o configuración existió alguna incoherencia con el esclavo, este enviara una respuesta negativa al maestro y comenzara de nuevo la fase de inicialización.

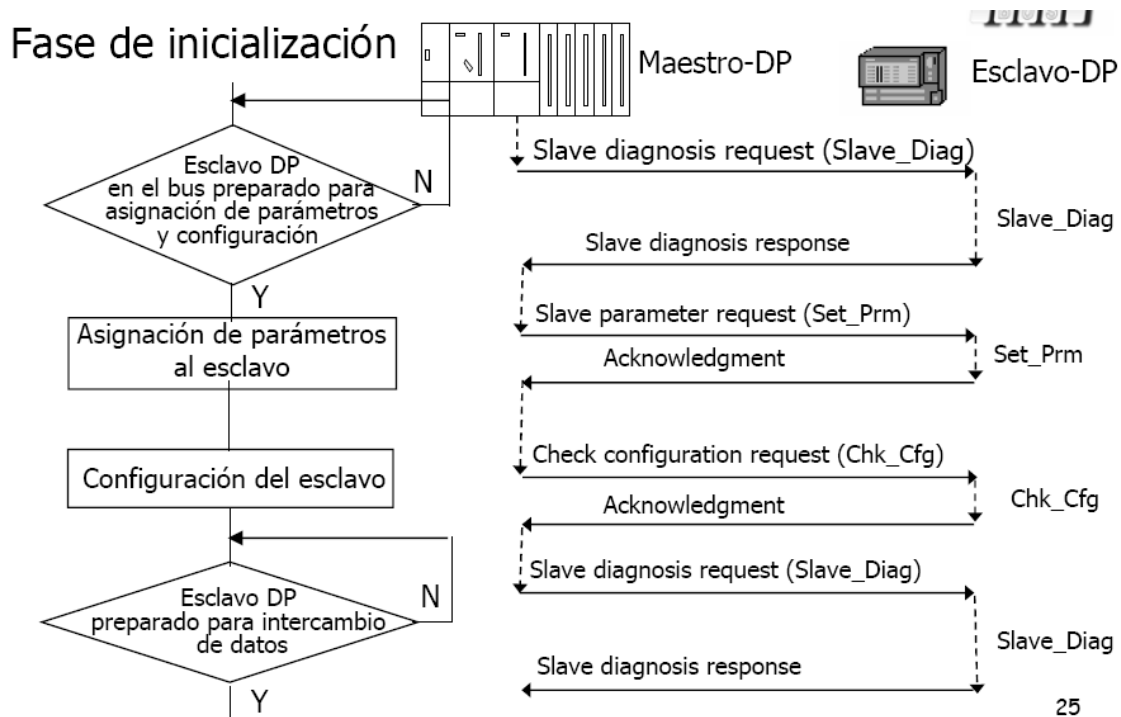


Figura 12. Fase de Inicialización

### 2.7.2 Trama de parametrización

Las siguientes opciones de parametrización están disponibles por defecto (Figura 13):

- El esclavo opera con o sin watchdog; este es necesario por razones de seguridad, para reconocer que un maestro aún está activado.
- Definición del TSDR que es el tiempo que el esclavo requiere para responder una solicitud, el tiempo mínimo y máximo están definidos en el estándar (3).
- El esclavo DP es habilitado o deshabilitado por otros maestros.
- Grupo asignado para telegramas de control global.
- Dirección del maestro para identificación.
- Parámetros de especificación de usuario (comportamiento cuando un maestro está en estado clear).

Tabla 15. Telegrama de parametrización

| SD   | LE | LEr | SD   | DA | SA | FC | DSAP | SSAP | DU  | FCS | ED   |
|------|----|-----|------|----|----|----|------|------|-----|-----|------|
| 0X68 | xx | xx  | 0X68 | 8X | 8X | X  | 0X3D | 0X3E | X.. | X   | 0X16 |

### Campo de datos de parametrización:

|               | Bit 0                                                                                                                                                                           | Bit 1 | Bit 2 | Bit 3                                              | Bit 4                                                           | Bit 5                                                                    | Bit 6         | Bit 7      |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|---------------|------------|
| <b>Byte 1</b> | Reservados                                                                                                                                                                      |       |       | WD_On = 0<br>Umbral de<br>monitoreo<br>desactivado | Habilita el<br>funcionamiento<br>del esclavo en<br>modo freeze. | Habilita el<br>funcionamiento<br>del esclavo en<br>modo<br>sincronizado. | Desbloqueado. | Bloqueado. |
| <b>Byte 2</b> | WD_Fact_1                                                                                                                                                                       |       |       |                                                    |                                                                 |                                                                          |               |            |
| <b>Byte 3</b> | WD_Fact_3: TWD (s) = 10ms*WD_Fact_1*WD_Fact_2                                                                                                                                   |       |       |                                                    |                                                                 |                                                                          |               |            |
| <b>Byte 4</b> | TSDR (tiempo en Tbit indicando cuando el esclavo puede responder lo antes posible. 11 Tbit es lo mínimo definido en el estándar. Este valor debe ser menos que el máximo TSDR). |       |       |                                                    |                                                                 |                                                                          |               |            |
| <b>Byte 5</b> | Parte alta número de identificación                                                                                                                                             |       |       |                                                    |                                                                 |                                                                          |               |            |
| <b>Byte 6</b> | Parte baja número de identificación.                                                                                                                                            |       |       |                                                    |                                                                 |                                                                          |               |            |
| <b>Byte 7</b> | Group_ID.                                                                                                                                                                       |       |       |                                                    |                                                                 |                                                                          |               |            |
| <b>Byte 8</b> | User_Prm_data.                                                                                                                                                                  |       |       |                                                    |                                                                 |                                                                          |               |            |

Figura 13. Bytes en el DU para la parametrización

### 2.7.3 Trama diagnóstica

La trama diagnóstica nos indica en qué estado se encuentra el esclavo, es la encargada de pedirle datos de interés al esclavo para conocer si está listo para operar o necesita datos de configuración y parametrización (Figura 14). Al iniciar el ciclo de inicialización el maestro empieza solicitando una trama diagnóstica para verificar su estado; al conocer el estado se da cuenta que faltan datos de configuración y parametrización por lo que envía las tramas con esta información, a lo cual el esclavo solo responde con un ACK que indica que la trama llegó, más no entrega respuesta sobre si la información recibida de las tramas de configuración y parametrización son o no compatibles con el esclavo; después de enviar la trama de configuración y parametrización el maestro vuelve a enviar una trama diagnóstica donde el esclavo responde si se encuentra listo para el intercambio de datos y si las tramas de configuración y parametrización fueron compatibles y bien aplicadas al esclavo.

**Tabla 16. Telegrama Diagnóstico**

| SD   | LE | LEr | SD   | DA | SA | FC | DSAP | SSAP | FCS | ED   |
|------|----|-----|------|----|----|----|------|------|-----|------|
| 0X68 | xx | Xx  | 0X68 | 8X | 8X | X  | 0X3C | 0X3E | X   | 0X16 |

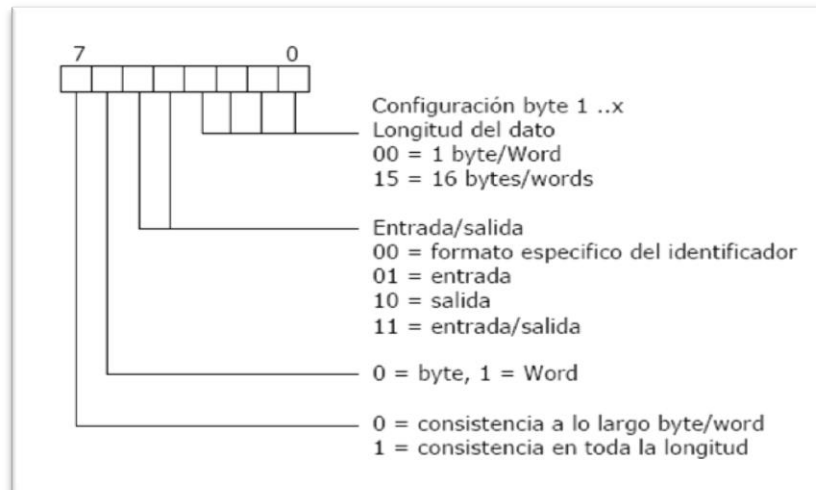
|               | Bit 0                                                                       | Bit 1                                                                          | Bit 2                                                   | Bit 3                                                      | Bit 4                                                                     | Bit 5                                                       | Bit 6                                                                  | Bit 7                                                                   |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| <b>Byte 1</b> | Diag.station, La estación no existe (determinado por el maestro)            | Diag.station_not_ready, El esclavo no está listo para el intercambio de datos. | Diag.cfg_fault, Los datos de configuración no coinciden | DIAG.ext, El esclavo ha extendido los datos de diagnóstico | Diag.not_supported: La función de solicitud no es soportada en el esclavo | Diag.invalid_save_response: establece y fija el esclavo a 0 | Diag.prm_fault: Parametrización incorrecta (número de identidad, etc.) | Diag.master_lock: El esclavo es parametrizado por un maestro diferente. |
| <b>Byte 2</b> | DIAG.prm_req: El esclavo tiene que ser reparametrizado                      | DIAG_stat_diag: Diagnóstico estático                                           | Fijo en 1                                               | Diag.WD_on : Umbral de vigilancia activada                 | Diag.freeze_mode: Comando freeze recibido                                 | Diag.sync_mode : Comando de sincronización recibido         | Reservado                                                              | Diag.deactivated: (sets master)                                         |
| <b>Byte 3</b> | Reservados                                                                  |                                                                                |                                                         |                                                            |                                                                           |                                                             |                                                                        | Diag.ext_overflow                                                       |
| <b>Byte 4</b> | Dirección de maestro después de la parametrización (FF sin parametrización) |                                                                                |                                                         |                                                            |                                                                           |                                                             |                                                                        |                                                                         |
| <b>Byte 5</b> | Parte alta número de identificación parte alta                              |                                                                                |                                                         |                                                            |                                                                           |                                                             |                                                                        |                                                                         |
| <b>Byte 6</b> | Parte baja número de identificación parte baja                              |                                                                                |                                                         |                                                            |                                                                           |                                                             |                                                                        |                                                                         |
| <b>Byte 7</b> | Diagnóstico externo: longitud de la cabecera                                |                                                                                |                                                         |                                                            |                                                                           |                                                             |                                                                        |                                                                         |
| <b>Byte 8</b> | Diagnóstico externo                                                         |                                                                                |                                                         |                                                            |                                                                           |                                                             |                                                                        |                                                                         |

**Figura 14. Bytes en el DU para el diagnóstico**

## 2.7.4 Trama de configuración

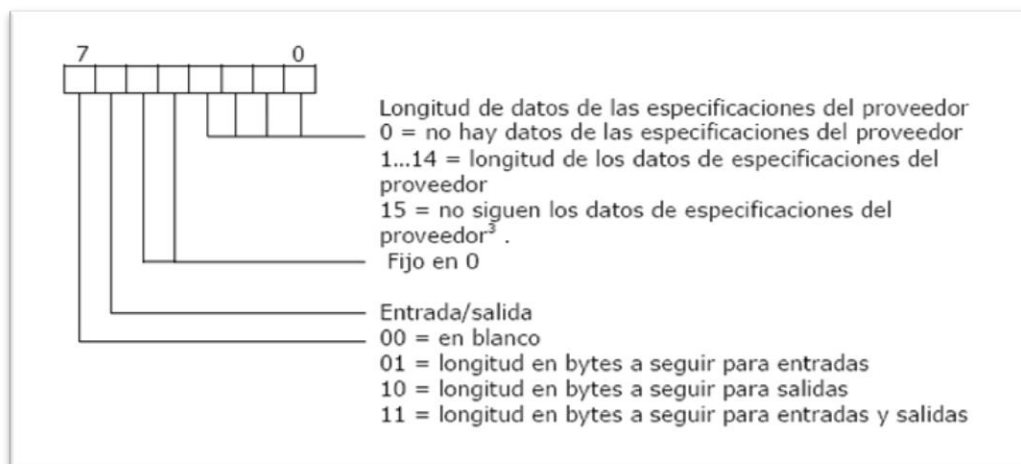
La trama de configuración contiene en el DU la información de cómo se debe configurar el esclavo para poder operar en la red Profibus. Al recibir esta trama el esclavo solo responde con un ACK que indica que la trama fue recibida pero no es posible saber si es compatible o no con el esclavo.

El byte de configuración permite configurar el número de bytes de entrada y salida del esclavo, los primeros 4 bit definen la cantidad de datos el bit 5 y 6 definen si el esclavo maneja datos de entrada, salida o los dos, el séptimo bit nos permite definir si los datos son byte o palabras y el octavo bit define la consistencia. Basado en la Figura 15. si se quiere configurar un esclavo de 16 bytes de salida el byte de configuración debe ser 0x2F.



**Figura 15. Byte de configuración**

Existe otra manera de configurar un esclavo y es por medio de un identificador especial el cual permite elegir la longitud de datos especificada en el GSD del proveedor. Esta configuración especial requiere de 2 bytes que corresponden a la Figura 16 y Figura 17.



**Figura 16. Byte 1 especial de configuración**

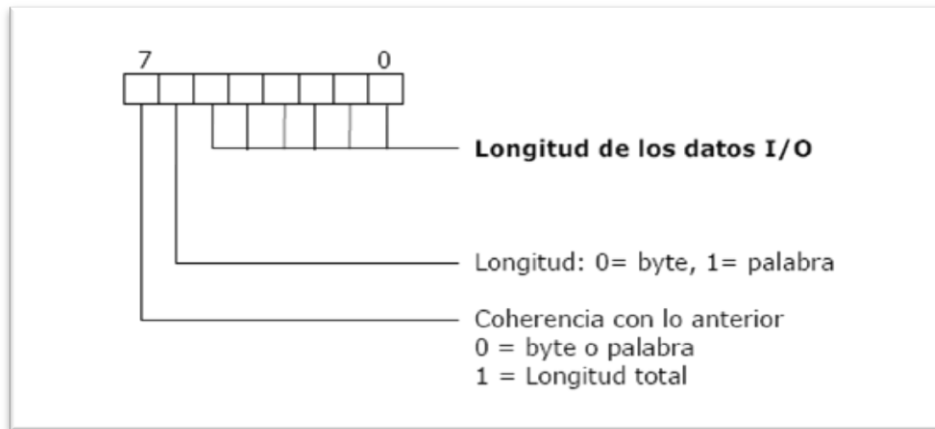


Figura 17. Byte 2 especial de configuración

## 2.8 Intercambio de datos

El proceso de intercambio de datos es el objetivo final del protocolo de comunicación, ya que en este estado es donde el esclavo envía la información por la que ha sido concebido; el esclavo enviará la información que él procesa, por ejemplo si el esclavo es un transmisor de presión en este campo enviará la presión medida y además de la presión podría enviar la temperatura, voltajes de alimentación y cualquier variable que sense el esclavo y que esté dispuesto a compartir con el maestro.

Tabla 17. Telegrama de intercambio de datos

| SD   | LE | LER | SD   | DA | SA | FC | DU | FCS | ED   |
|------|----|-----|------|----|----|----|----|-----|------|
| 0x68 | X  | X   | 0x68 | X  | X  | X  | X  | X   | 0x16 |

El número de bytes que envía el esclavo en el DU está definido por el fabricante en el GSD del dispositivo y confirmado por el maestro con el telegrama de parametrización y configuración. El campo de datos puede llegar a tener hasta 246 bytes.

## 2.9 Diferentes Aplicaciones (FREEZE, SYNC, WATCHDOG)

- **SYNC/UNSYNC:** por medio de un telegrama de control global el maestro puede solicitar a un esclavo o a un grupo de esclavos que entren en estado SYNC. En este modo SYNC las salidas de todos los esclavos direccionados en la trama de control global quedan enclavadas en su estado actual. Durante las siguientes transmisiones de datos, las salidas de datos pueden

ser guardadas por el esclavo, pero los estados de las salidas permanecerá inalterables hasta que el esclavo reciba la instrucción UNSYNC, la cual permitirá retornar al funcionamiento normal del esclavo.

- ***FREEZE/UNFREEZE:*** el modo FREEZE opera del mismo modo que el modo SYNC, solo que el FREEZE aplica para las entradas del esclavo y no sus salidas, por medio de un telegrama de control global el maestro le solicita a un esclavo o un grupo de esclavos entrar en modo FREEZE, desde ese momento los esclavos direccionados congelaran sus entradas y permanecerán inalterables hasta recibir la instrucción UNFREEZE de parte del maestro.
- ***WATCHDOG:*** es un mecanismo de protección para garantizar la seguridad del sistema, si por cualquier razón el esclavo deja de recibir comandos del maestro; el esclavo debe esperar el tiempo del watchdog time (TWD) antes de ir al modo seguro, si no hay una solicitud del maestro durante este tiempo el esclavo se ira a modo seguro y espera una nueva configuración. El valor del TWD es configurado en la trama de parametrización que el maestro envía al esclavo en el proceso de inicialización.

## **PROGRAMACION, CONSTRUCCIÓN Y DESARROLLO**

### **3. CARACTERIZACIÓN DEL SENSOR**

El proceso de caracterización y compensación está basado en los datos y resultados obtenidos en la Tesis realizada por el Ingeniero Electrónico egresado de la Universidad del Valle Erick Mondragón, titulada “Caracterización de un sensor de presión semiconductor y desarrollo de algoritmos de compensación y linealización con circuitos dssp comerciales”.

La caracterización del sensor es un proceso muy importante para realizar una buena compensación, ya que con la caracterización se identifican los cambios de sensibilidad particulares del sensor que se esté caracterizando ante los cambios de temperatura.

En el proceso de caracterización se somete el sensor a diferentes presiones en todo su rango de operación midiendo la respuesta en la salida a diferentes grados de temperatura en un amplio rango.

Para llevar a cabo la caracterización se requiere:

- **Fuente de alimentación:** es la encargada de alimentar el sensor para realizar la caracterización. Es importante que tenga un grado alto de precisión, ya que la respuesta en la salida depende de la alimentación en la entrada sea por corriente o por voltaje.
- **Controlador de presión:** es el equipo encargado de ejercer una presión determinada sobre el sensor de presión. Este equipo debe poder garantizar un rango de presión superior al del sensor con el fin de realizar la caracterización en todo su rango de presión.
- **Cámara climatizada:** es el equipo encargado de realizar y controlar los cambios de temperatura con el fin de caracterizar el sensor en un rango amplio de temperatura.
- **Multímetro:** es el encargado de medir el voltaje o corriente en la salida del sensor.

Dado que la Universidad del Valle no cuenta con los equipos necesarios para realizar este procedimiento, se utilizará una caracterización del sensor de presión *MPX53* utilizado anteriormente en otros trabajos de grado y caracterizado en su momento en la Universidad de Sao Paulo en Brasil.

En el proceso de caracterización se introdujo el sensor en la cámara climatizada *votsch VCL4006*, se alimentó el sensor con una fuente *Keithley 2400*, se controló la presión ejercida con un controlador *PPC3* y se leyó el valor de la salida y entrada con el multímetro *Agilent 34401A*.

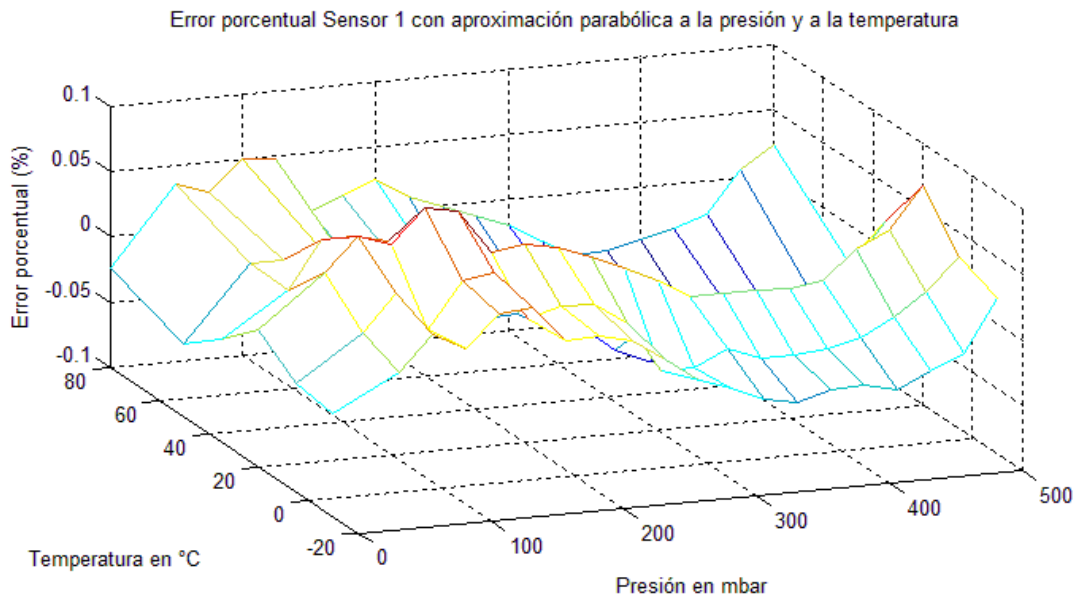
En el proceso de caracterización se estabilizó el primer punto de temperatura a  $-10^{\circ}\text{C}$  y con el controlador de presión *PPC3* se aplicó presión en un rango desde 0 hasta  $500\text{mbar}$  aumentando la presión en  $25\text{ mbar}$  por cada dato tomado. Cuando llega a  $500\text{ mbar}$  se repite el proceso de manera descendente restándole  $25\text{ mbar}$  hasta llegar a 0 en cada dato de presión, después se eleva la temperatura en  $15^{\circ}\text{C}$  y se repite el proceso hasta llegar a los  $80^{\circ}\text{C}$  (para mayor detalle sobre este tema ver referencia [5]).

#### 4. COMPENSACIÓN DEL SENSOR

Se aplica la fórmula (9) correspondiente al método de compensación de aproximación parabólica a la presión y a las derivas de temperatura. Donde  $P$  es la presión medida,  $V$  el voltaje de salida del sensor y  $E$  el voltaje de alimentación.

$$P = B_{00} + B_{01}E + B_{02}E^2 + B_{10}V + B_{11}EV + B_{12}E^2V + B_{20}V^2 + B_{21}EV^2 + B_{22}E^2V^2 \quad (9)$$

La ecuación contiene nueve coeficientes, por lo que son necesarias nueve ecuaciones para encontrar los coeficientes ( $B$ ) característicos del sensor; debido a esto se seleccionan de los datos de la caracterización tres valores de presión diferentes por cada valor de temperatura y tres valores de temperatura para completar las nueve ecuaciones, los resultados se muestran en la Figura 18.



**Figura 18. Grafica del error porcentual del sensor**

Como se puede observar el rango del error porcentual se encuentra entre -0,1% y 0,1%, lo que es bastante aceptable para un instrumento de medición. Si se eligiera un método de compensación con más coeficientes y de un mayor orden el factor de error se reduciría pero el proceso matemático que debe realizar el DSSP sería más complejo y requeriría una mayor memoria Flash. El método de compensación de aproximación parabólica a la presión y a las derivas de temperatura es un método que reduce significativamente el error y es de fácil implementación por lo que es el más indicado para este tipo de transmisor de presión.

Los coeficientes encontrados fueron:

$$\begin{aligned}
 B_{00} &= -6.7933 & B_{01} &= -118.5869 & B_{02} &= 10.3366 \\
 B_{10} &= 22.9685 & B_{11} &= -5.8844 & B_{12} &= 0.7605 \\
 B_{20} &= 0.0056 & B_{21} &= -0.00938 & B_{22} &= 0.0021
 \end{aligned}$$

Fórmula final:

Donde  $E=V_{IN}$  y  $V = V_{OUT}$

$$\begin{aligned}
 Presion &= B_{00} + B_{01}V_{IN} + B_{02}V_{IN}^2 + B_{10}V_{OUT} + B_{11}V_{IN}V_{OUT} + B_{12}V_{IN}^2V_{OUT} \\
 &\quad + B_{20}V_{OUT}^2 + B_{21}V_{OUT}^2V_{IN} + B_{22}V_{OUT}^2V_{IN}^2 + 1,891
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Presion &= -6.7933 \pm 118.5869V_{IN} + 10.3366V_{IN}^2 + 22.9685V_{OUT} \\
 &\quad -5.8844V_{IN}V_{OUT} + 0.7605V_{IN}^2V_{OUT} + 0.0056V_{OUT}^2 \\
 &\quad -0.0093V_{OUT}^2V_{IN} + 0.0021V_{OUT}^2V_{IN}^2 + 1,891
 \end{aligned}$$

Donde  $V_{IN}$  es el voltaje de entrada y  $V_{OUT}$  el voltaje de salida del sensor.

## 5. HARDWARE PARA LA COMPENSACIÓN

### 5.1 DSSP

El *Aduc845* es un DSSP que contiene un sistema de acondicionamiento de señal que incorpora un microcontrolador 8052, el cual es de 8 bits; también incorpora un multiplexor de 10 pines de entrada que pueden configurarse como entradas simples o diferenciales, incorpora un sensor de temperatura, dos ADCs de 24 bits y memoria FLASH de 66KB de los cuales 62KB son para programación y 4KB son para almacenamiento de datos. La señal de salida puede ser entregada a través de un DAC de 12 bits y también cuenta con UART, SPI entre otros módulos.

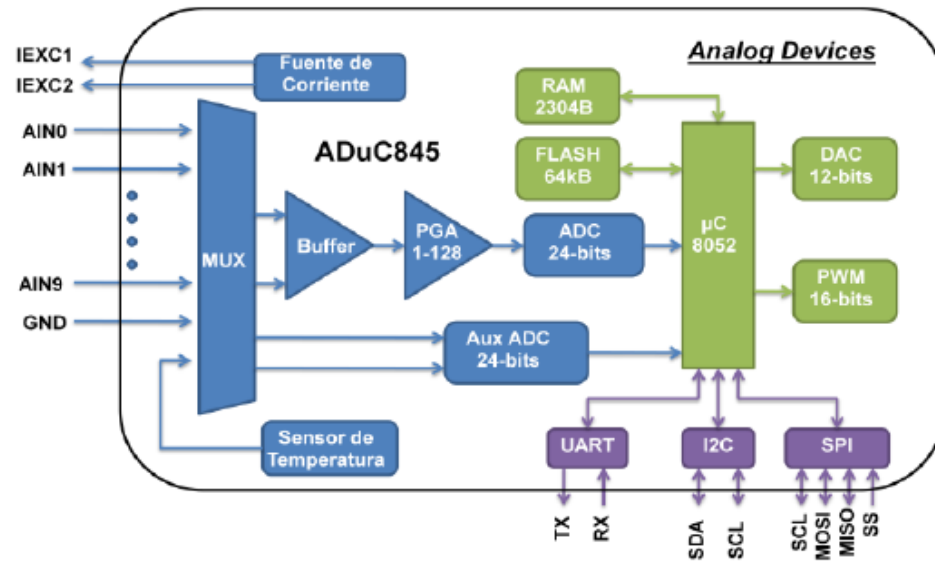


Figura 19. Diagrama de bloques del Aduc845

## 5.2 Amplificador operacional

OPA2379 es un amplificador operacional de bajo consumo de potencia y es el encargado de alimentar el sensor por medio de una señal de control del DSSP la cual es amplificada y controlada por el Amplificador operacional. El OPA2379 puede ser alimentado desde 1,8V hasta 5,5V y puede entregar hasta 10mA en la salida.

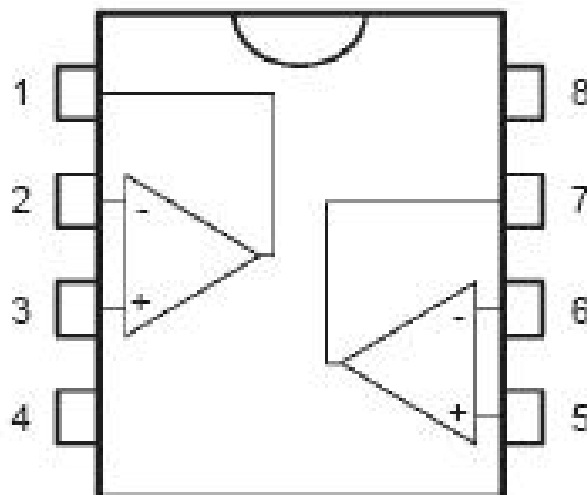


Figura 20. OPA2379

### 5.3 Sensor de presión

*MPX53* es un sensor de presión semiconductor que actúa bajo el efecto piezoresistivo, diseñado por la empresa Freescale Semiconductor. Tiene un rango de medida de 0 a 50 *kPa* o 7,25 *psi*, opera en un rango de temperatura entre menos 40°C hasta 125°C, no posee compensación de ningún tipo y es de bajo costo.

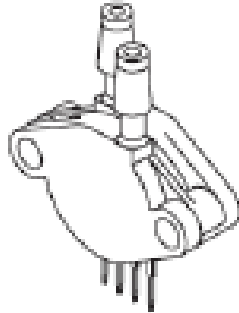


Figura 21. Sensor MPX53DP

## 6. CIRCUITO DE COMPENSACIÓN

El *DSSP* es el encargado de controlar la alimentación y sensar los voltajes de alimentación y de salida para poder así aplicar el método de compensación de aproximación parabólica a la presión y a las derivas de temperatura. El circuito diseñado permite alimentar el sensor desde dos fuentes diferentes, una de ellas es una fuente de voltaje controlada directamente por el *DAC*, la otra es una fuente de corriente calculada con una resistencia de 240 *Ohm* (Figura 22).



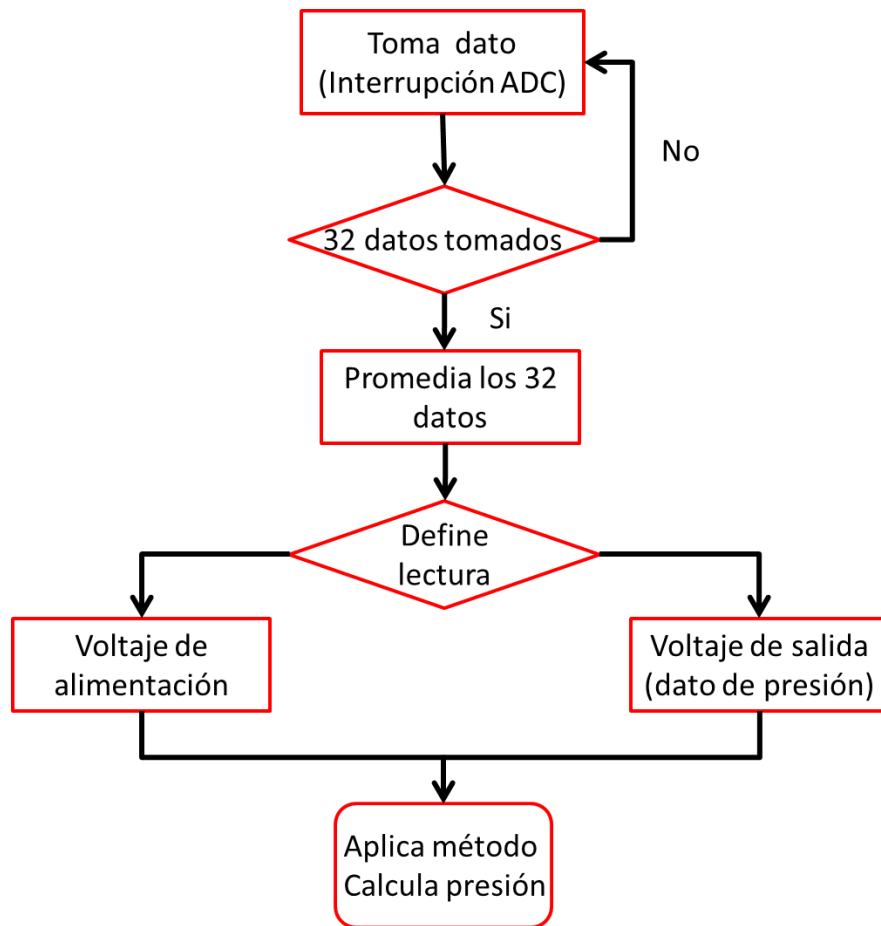


Figura 23. Programa de compensación

## 8. HARDWARE PROFIBUS

- **ADM 2486:** es el integrado encargado de recibir las tramas en niveles *TTL* que provienen de la *UART* del microcontrolador y convertirlos en *RS-485*. El *ADM* permite alcanzar altas velocidades y tiene un control de lectura y escritura que permite activar o desactivar cada una de estas funciones.

## FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM

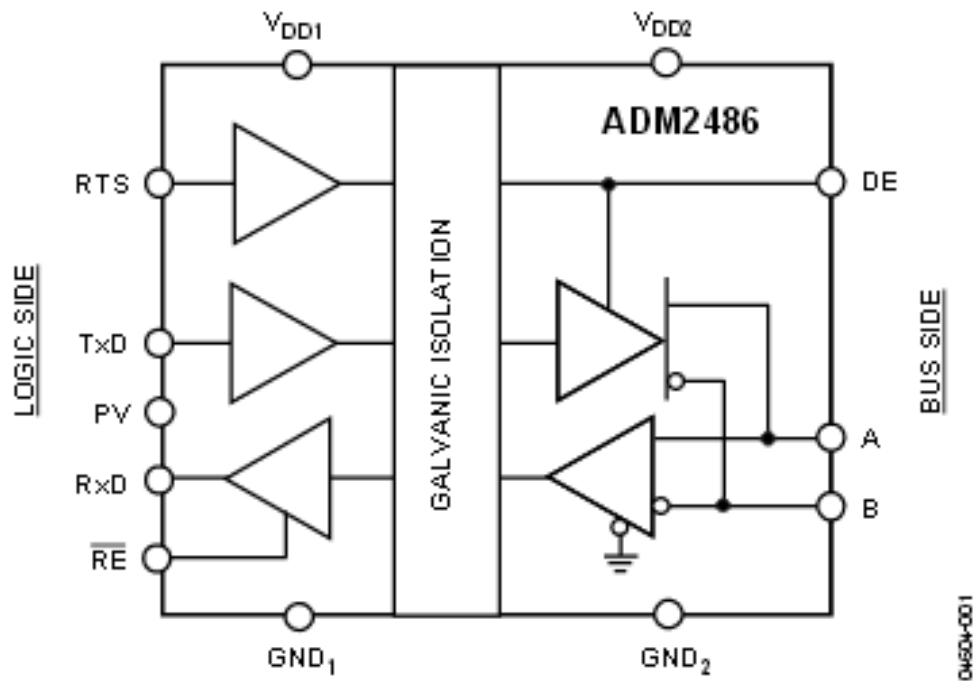


Figura 24. Diagrama de bloques del ADM2486

El hardware para comunicarse en una red Profibus es sencillo, solo es necesario un ADM 2486 y un microcontrolador para realizar la comunicación Profibus.

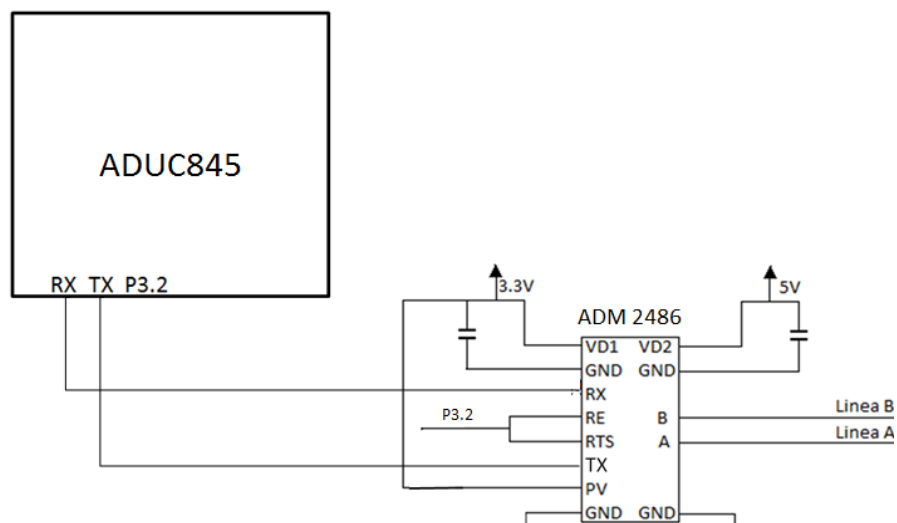


Figura 25. Hardware Profibus

## 9. ESQUEMA DE TRANSMISIÓN DE PRESIÓN

Los transmisores de presión comerciales cuentan con un procesador (DSSP) para la etapa de compensación, y un procesador (microcontrolador) para realizar la comunicación Profibus. El DSSP y el microcontrolador trabajan al mismo tiempo ya que en la mayoría de sus tareas uno no depende del otro y pueden ir realizando procesamiento paralelo.

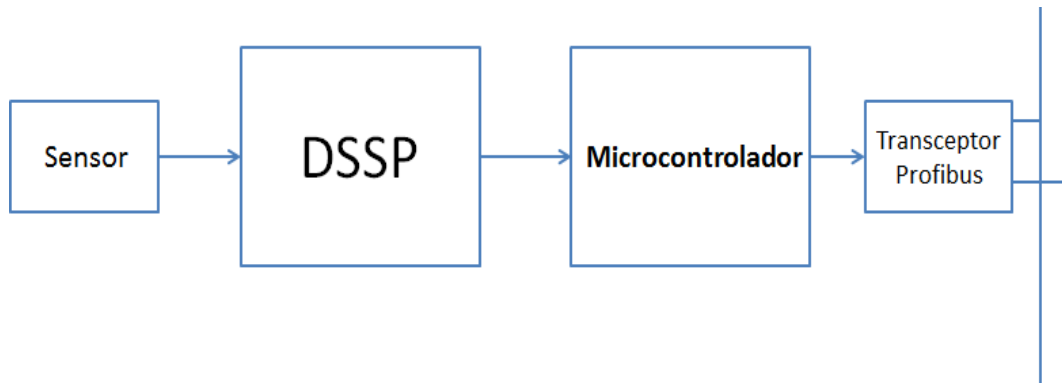


Figura 26. Esquema tradicional

En la figura 26 el sensor toma el valor de presión y lo transmite al DSSP el cual compensa el dato y posteriormente lo envía al microcontrolador, por medio del cual es encapsula la lectura de presión ya compensada en una trama Profibus, que es enviada al transceptor y este a su vez se encarga de transmitirla en la red Profibus en los niveles de voltaje adecuados.

En el transmisor construido se prescindió del microcontrolador. El transmisor de presión se diseñó de tal manera que tanto la compensación del sensor como la implementación del protocolo fuera realizada por el DSSP, minimizando el hardware requerido.

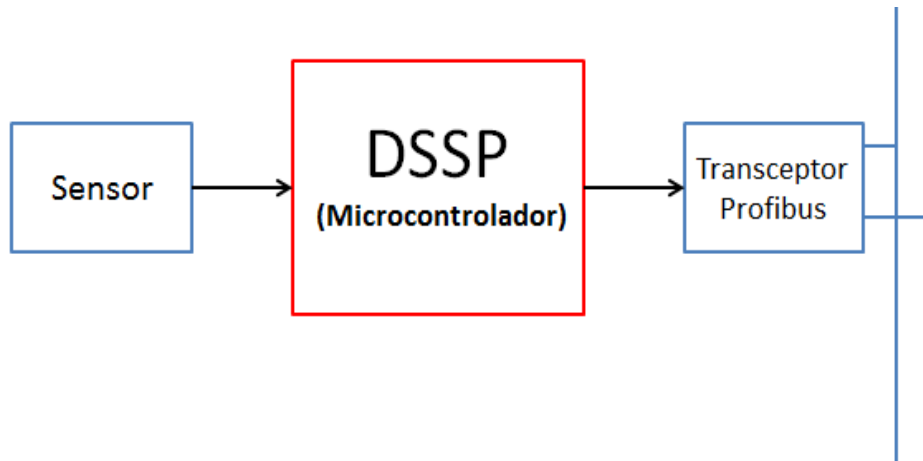


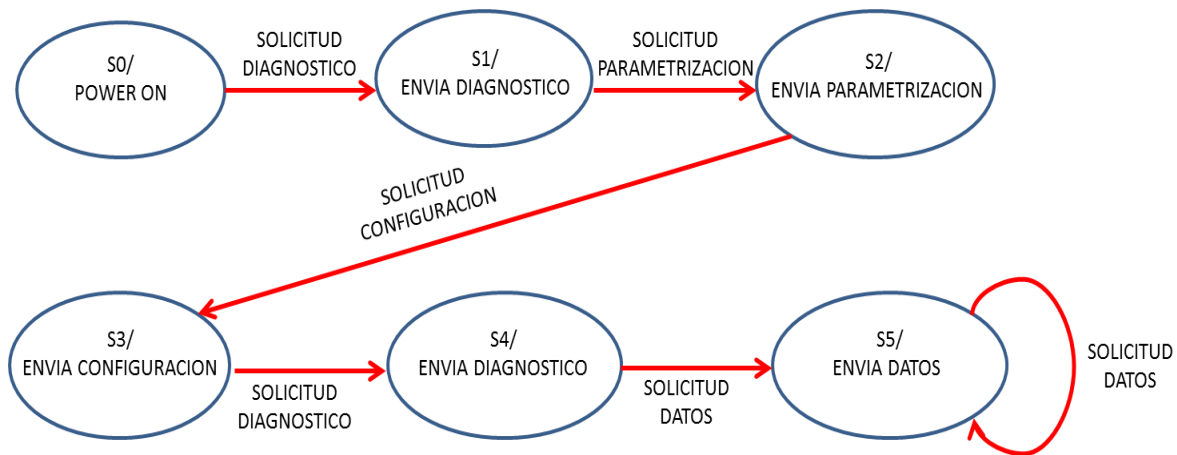
Figura 27. Esquema implementado

Como se observa en la figura 27 el sensor toma el valor de presión y se lo envía al DSSP, el cual lo compensa y lo encapsula en una trama Profibus, la cual es enviada al transceptor y este a su vez la adecua y la envía en los niveles de voltaje adecuados para la red Profibus.

Realizar la compensación y la implementación del protocolo Profibus en el mismo circuito integrado, requiere programar el DSSP de tal manera que pueda realizar las dos tareas de manera simultánea sin que una afecte a la otra (multitarea), sin embargo esto no es posible sin que se afecte su velocidad de comunicación máxima, pero como ventaja se obtiene un transmisor de presión con menos hardware, menos costoso y quizás al disminuir un integrado se pueda disminuir el consumo de potencia del transmisor de presión.

## 10. SECUENCIA DE TRAMAS DEL PROTOCOLO PROFIBUS

El transmisor de presión debe pasar por dos fases para lograr la comunicación Profibus; la primera fase es la de inicialización, que contiene la información diagnóstica, la parametrización, y su respectiva configuración. Al superar la fase de inicialización de manera satisfactoria inmediatamente avanza a la fase de intercambio de datos, que es donde intercambia los datos obtenidos con el maestro o controlador. La siguiente máquina de estados muestra cómo se encuentra programado el transmisor para lograr la comunicación Profibus.



**Figura 28. Máquina de estados de la secuencia de tramas del protocolo**

- S0: se conecta el dispositivo a la red Profibus y queda a la espera de la trama de solicitud de diagnóstico.
- S1: responde la solicitud de diagnóstico y queda a la espera de la trama de solicitud de parametrización.
- S2: responde la solicitud de parametrización y queda a la espera de la trama de solicitud de configuración.
- S3: responde la trama de configuración y queda a la espera de la trama de solicitud de diagnóstico.
- S4: responde la trama de diagnóstico y queda a la espera de la trama de intercambio de datos.
- S5: envía los datos de presión obtenidos y se queda alerta de cuando el maestro solicite datos del dispositivo, para este caso los datos de presión.

## **11. PROCESAMIENTO Y RESPUESTA DE TRAMAS PROFIBUS**

Para el reconocimiento y respuesta de cada una de las tramas el dispositivo siempre se encuentra monitoreando el bus de comunicación Profibus a la espera de alguna trama que esté dirigida al transmisor de presión. Después de verificar que está dirigida al esclavo y verificar que la trama se encuentra en buenas condiciones (sin errores) el transmisor de presión responde con una de las tramas previamente programadas y guardadas en él. En la siguiente máquina de estados se observa cómo se comprueba si la trama recibida es dirigida al dispositivo y si está libre de errores. Para esta máquina de estados se tomará como ejemplo una trama de longitud variable dado que es la trama más utilizada y la que contiene más cantidad de campos diferentes.

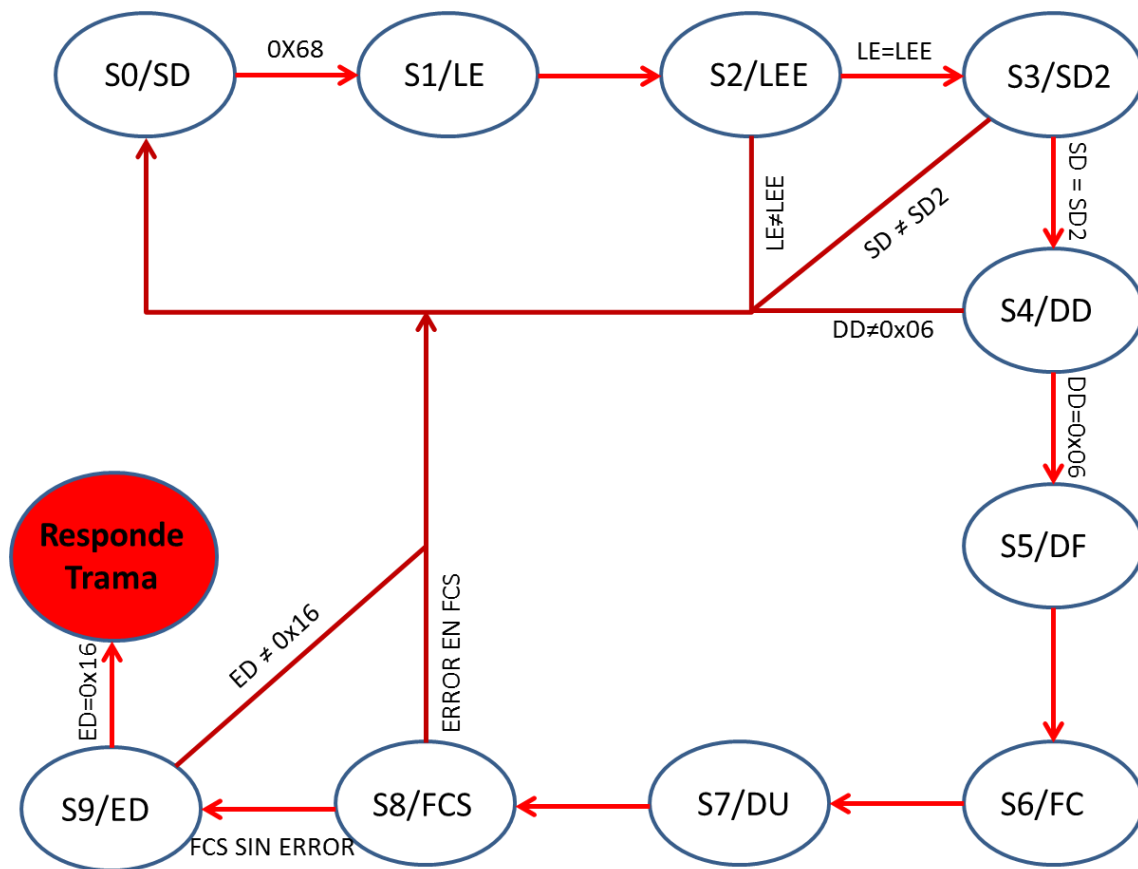


Figura 29. Máquina de estado de procesamiento de una trama Profibus

- S0: espera recibir el SD en este caso 0x68
- S1: el siguiente valor que recibe es el LE no importa el valor que reciba
- S2: recibe el valor de LEE compara si es igual a LE (LE=LEE)
- S3: recibe la confirmación del SD en este caso debe ser 0x68
- S4: recibe la dirección destino debe ser igual a la asignada al esclavo. Para este ejemplo igual a 0x06.
- S5: recibe la dirección fuente y la almacena
- S6: recibe el código FC y lo almacena.
- S7: recibe el DU. Extrae el SSAP y DSAP y los almacena al igual que los datos.
- S8: recibe el FCS y lo compara con el FCS calculado si es diferente rechaza la trama.
- S9: recibe el ED que debe ser 0x16 si es diferente rechaza la trama.
- S10: analiza los datos recibidos y responde con la trama correspondiente.

## 12. ACOUPLE DE COMPENSACIÓN Y COMUNICACIÓN PROFIBUS

El programa acoplado realiza tanto la compensación del sensor como la comunicación Profibus y cada una de estas tareas debe interferir lo menos posible en el desarrollo de la otra; con el fin de lograr dicho propósito, el programa acoplado se ejecuta en base a dos interrupciones; una de ellas es la interrupción del ADC, la cual ejecuta el programa de compensación del sensor de presión y la otra es la interrupción del puerto UART, la cual se encarga de ejecutar el código del protocolo de comunicación Profibus.

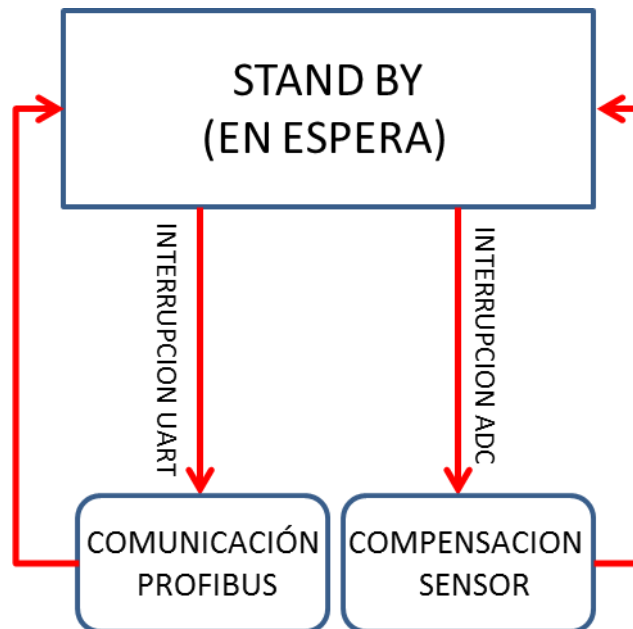


Figura 30. Profibus y compensación del sensor acoplados

### Interrupción UART:

```
Void Uart_int () interrupt 4 {  
    If (RI==1){  
        RI=0;  
        DatoRecibido=SBUF;    \\ Guarda el dato recibido en una variable  
        MaquinaDeEstados=1;  
    }  
  
    If (TI==1){  
        TI=0;
```

```

        EnviarTrama=1;
    }

```

Cuando la Uart recibe o envía un dato se activa la interrupción 4. Después de definir por que se activó la interrupción, si es por recibir (RI==1) o por enviar (TI==1) se activa una bandera para que active una subrutina ya sea para procesar una trama o para enviarla.

### **Interrupción ADC:**

```

Void DSSP() interrupt 6 {

    RDYO=0;
    BanderaRDYO=1; }

```

La interrupción 6 se activa cuando el ADC realiza la conversión Análoga-Digital, por lo que se activa la bandera (BanderaRDYO=1) para que realice el proceso de compensación con el dato obtenido.

### **Función principal:**

```

Void main(){

    If (MaquinaDeEstados=1){
        ProcesarTrama(); }

    If (EnviarTrama=1){
        ResponderTrama(); }

    If (BanderaRDYO =1){
        CompensacionPresion(); }

}

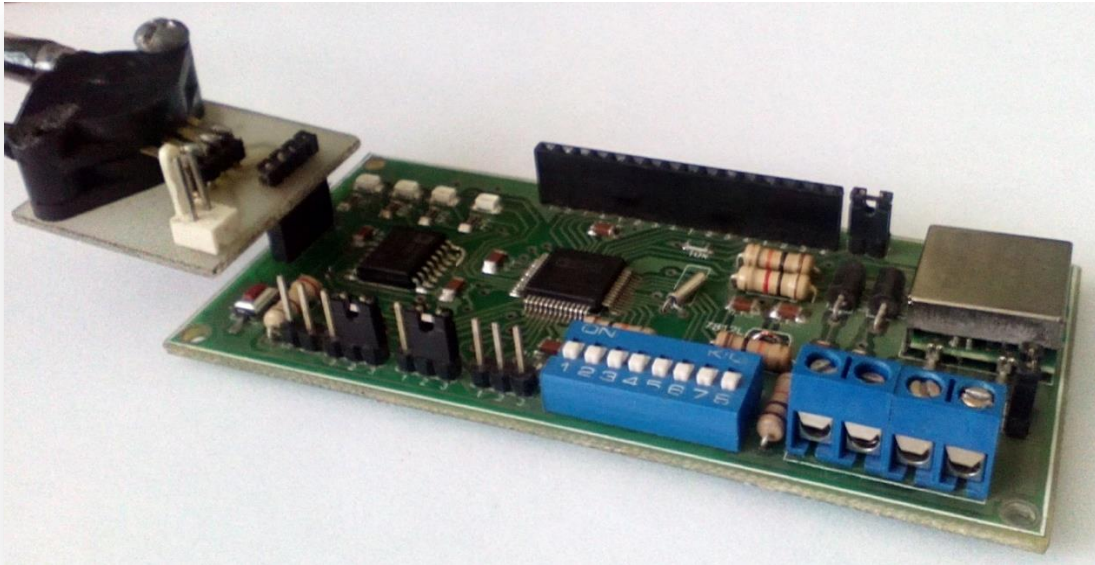
```

La función principal se encuentra a la espera que se active cada bandera para direccionarla a la subrutina adecuada de esta manera podemos atender el protocolo de comunicación y la compensación de manera eficiente en un solo circuito integrado.

## **13.HARWARE TRANSMISOR DE PRESIÓN**

El hardware diseñado permite la compensación y la comunicación Profibus desde un solo integrado, el ADUC845; cuenta con un ADM 2486 encargado de convertir

los datos en niveles TTL a RS485 utilizado por la red Profibus, también cuenta con un amplificador de propósito general opa2379 para la alimentación del sensor de presión MPX53DP; adicionalmente tiene la posibilidad de conectarle un LCD si es requerido y posee un dip switch para ingresar la dirección Profibus del esclavo. El transmisor de presión fue programado con el lenguaje de programación C utilizando el software Keil Uvision.



**Figura 31.** Tarjeta electrónica diseñada para medir presión y transmitirla por medio de Profibus.

## PRUEBAS Y RESULTADOS

### 14. PRUEBA DE COMUNICACIÓN

Para configurar la red Profibus se utilizó:

1. PLC Simatic 300 con comunicación Profibus al cual se le asignó la dirección N° 2.
2. El transmisor de presión a probar al cual se le asignó la dirección N° 6.

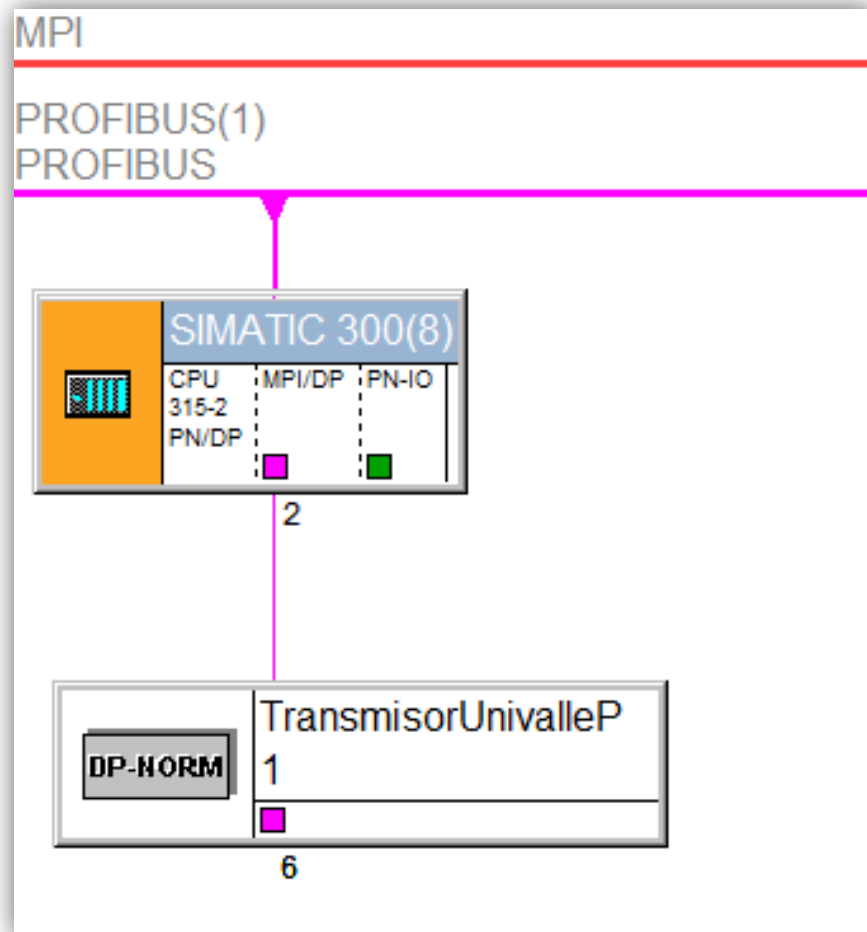


Figura 32. Topología de la Red Profibus

Se utilizó el sniffer Ulinx para observar cada uno de los bytes de comunicación entre el PLC y el esclavo.

La Figura N° 33 muestra lo obtenido por el sniffer, donde se puede observar todas las fases de comunicación del protocolo Profibus pasando por el reconocimiento

de los esclavos, posteriormente la etapa de inicialización y por último el intercambio de datos; el cual es el objetivo final del protocolo de comunicación.

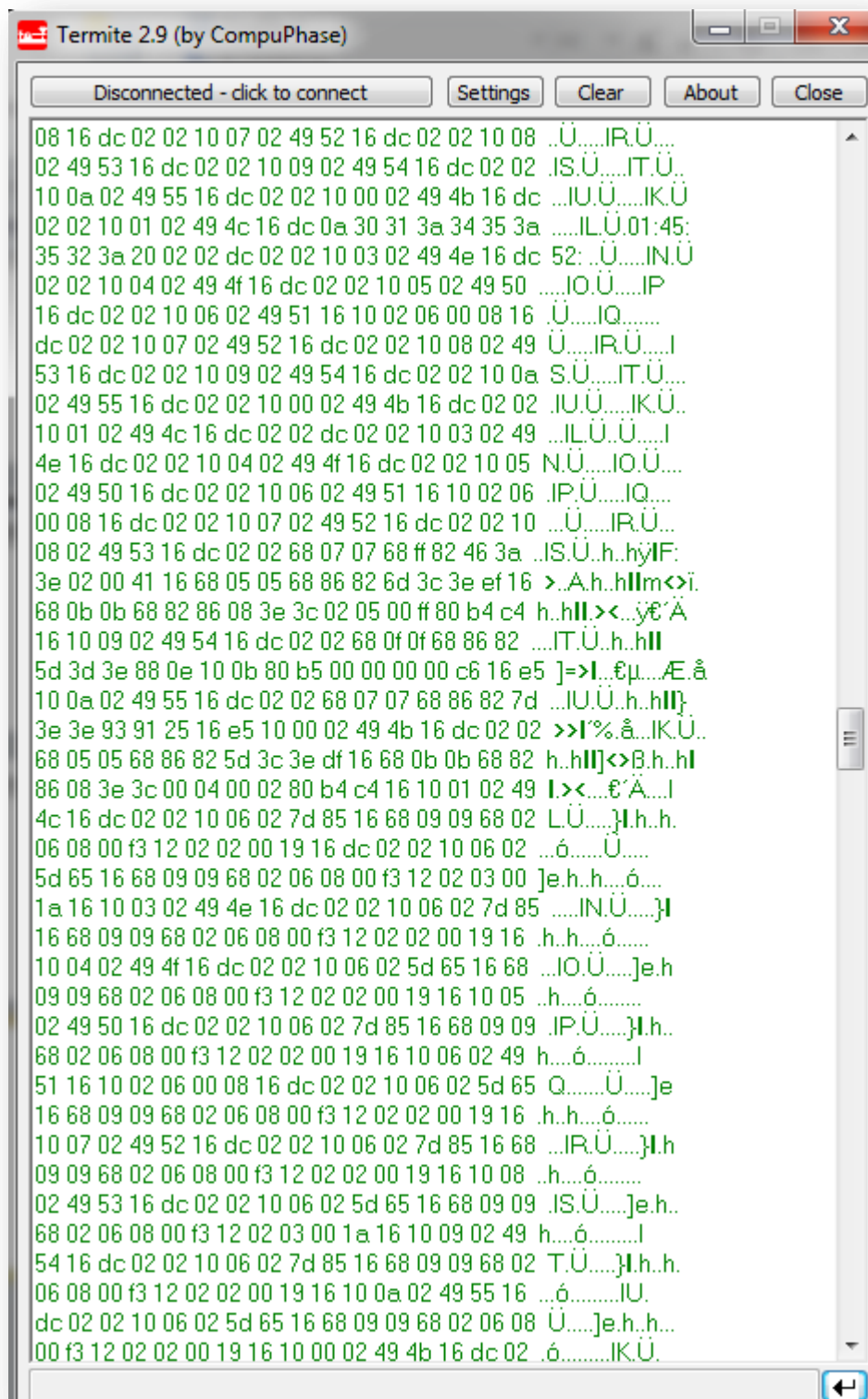


Figura 33. Captura de Bytes del protocolo Profibus

A continuación se detallará cada una de las tramas que solicita el maestro (en amarillo) y que contesta el esclavo (en rojo).

#### 14.1 Trama de solicitud de estatus FDL

```

35 32 3a 20 02 02 dc 02 02 10 03 02 49 4e 16 dc 52: ..Ü.....IN.Ü
02 02 10 04 02 49 4f 16 dc 02 02 10 05 02 49 50 .....IO.Ü.....IP
16 dc 02 02 10 06 02 49 51 16 10 02 06 00 08 16 ..Ü.....IQ.....
dc 02 02 10 07 02 49 52 16 dc 02 02 10 08 02 49 ..Ü.....IR.Ü.....I
53 16 dc 02 02 10 09 02 49 54 16 dc 02 02 10 0a S.Ü.....IT.Ü...

```

Figura 34. Captura trama solicitud de estatus FDL

En la Figura 34. se observa la primera trama que envió el maestro para establecer comunicación Profibus. La solicitud de estatus FDL es utilizada para la búsqueda de nuevas estaciones y estaciones activas. El maestro realiza un barrido enviando una trama a todas las direcciones posibles en búsqueda de los esclavos.

#### 14.2 Trama diagnóstica 1

```

00 08 16 dc 02 02 10 07 02 49 52 16 dc 02 02 10 ...Ü.....IR.Ü...
08 02 49 53 16 dc 02 02 68 07 07 68 ff 82 46 3a ..IS.Ü..h..hYIF:
3e 02 00 41 16 68 05 05 68 86 82 6d 3c 3e ef 16 >..A.h..hllm<>i.
68 0b 0b 68 82 86 08 3e 3c 02 05 00 ff 80 b4 c4 ..hll><..y€'Ä
16 10 09 02 49 54 16 dc 02 02 68 0f 0f 68 86 82 ....IT.Ü..h..hll
5d 3d 3e 88 0e 10 0b 80 b5 00 00 00 00 c6 16 e5 ]=>I...€µ...Æ.â
10 0a 02 49 55 16 dc 02 02 68 07 07 68 86 82 7d ...IU.Ü..h..hll

```

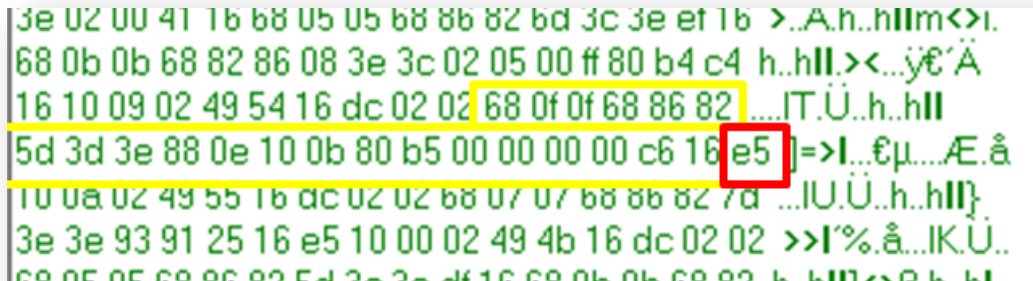
Figura 35. Captura trama diagnostica

En la Figura N° 35 se observa la primera trama de la etapa de inicialización, donde el maestro envía una trama solicitando una trama diagnóstica (color amarillo) a la cual el esclavo responde con la trama donde el campo de datos de la trama lleva los bytes 02 05 00 80 b4 (color rojo), los cuales indican:

- 02: Expresa que el esclavo no está listo para el intercambio de datos.

- 05: Expresa que el esclavo debe ser parametrizado
- 00: no tiene significado (campo reservado)
- 80 b4: es el número de identificación del esclavo.

### 14.3 Trama de Parametrización



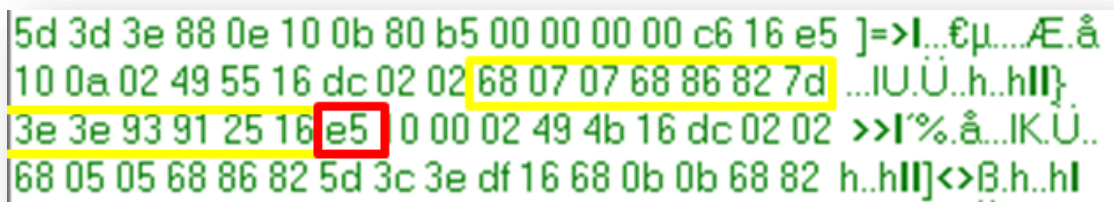
```

3e 02 00 41 16 b8 05 05 b8 86 82 bd 3c 3e ef 16 >..A.h..hllm<>I.
68 0b 0b 68 82 86 08 3e 3c 02 05 00 ff 80 b4 c4 h..hll.><...ÿË'Ä
16 10 09 02 49 54 16 dc 02 02 68 0f 0f 68 86 82 ....IT.Ü..h..hll
5d 3d 3e 88 0e 10 0b 80 b5 00 00 00 00 c6 16 e5 ]=>I...€µ...Æ.â
10 0a 02 49 55 16 dc 02 02 68 07 07 68 86 82 7d ...IU.Ü..h..hll}
3e 3e 93 91 25 16 e5 10 00 02 49 4b 16 dc 02 02 >>I'%.â...IK.Ü..
68 05 05 68 86 82 5d 3c 3e df 16 68 0b 0b 68 82 h..hll]<>B.h..hl
  
```

Figura 36.Captura trama de Parametrización

El maestro envía la trama de parametrización al recibir la información de que el esclavo no había sido parametrizado. La trama contiene información para habilitar o deshabilitar el Whatchdog, Freeze y el modo sincronizado, como también define el TSDR; el esclavo responde con un ACK (e5) que indica que recibió y guardó los datos de la trama recibida (Figura N° 36).

### 14.4 Trama de configuración



```

5d 3d 3e 88 0e 10 0b 80 b5 00 00 00 00 c6 16 e5 ]=>I...€µ...Æ.â
10 0a 02 49 55 16 dc 02 02 68 07 07 68 86 82 7d ...IU.Ü..h..hll}
3e 3e 93 91 25 16 e5 0 00 02 49 4b 16 dc 02 02 >>I'%.â...IK.Ü..
68 05 05 68 86 82 5d 3c 3e df 16 68 0b 0b 68 82 h..hll]<>B.h..hl
  
```

Figura 37 Captura trama de Configuración

Inmediatamente después de enviar la trama de parametrización el maestro envía la trama de configuración, la cual contiene el número de datos que llevara la trama de intercambio de datos a la cual el esclavo responde con un ACK (e5) (Figura N°37).

## 14.5 Trama de diagnóstico 2

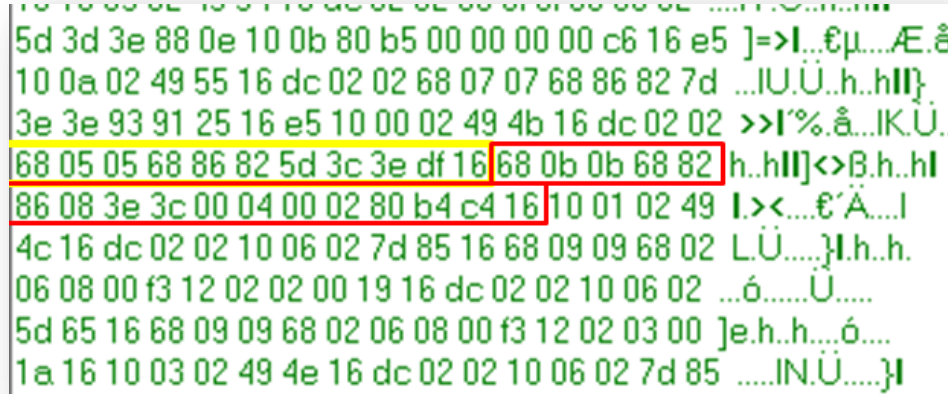


Figura 38. Captura trama Diagnóstico

Al enviar las tramas de parametrización y configuración, el maestro vuelve a solicitar una trama diagnostica (color amarillo) para conocer el estado del esclavo, a la cual el esclavo responde con los bytes 00 04 00 02 80 b4 (color rojo) en el campo de datos, los cuales indican:

- 00 El esclavo está listo para intercambio de datos.
- 04 El esclavo tiene desactivado WD, SYNC y FREEZEN.
- 00 No tiene significado (campo reservado).
- 02 Direcciones del maestro después de la parametrización.
- 80 b4 Es el número de identificación del esclavo.

## 14.6 Trama de Intercambio de datos

Cuando el transmisor pasa por la etapa de inicialización empieza el intercambio de datos, donde el PLC realiza una solicitud de datos (color amarillo) y el esclavo responde con una trama en donde contiene los datos medidos por el transmisor (color rojo), en este caso los campos de datos son 00 f3 12 02 02 00 correspondientes a la presión, voltaje de salida y voltaje de entrada (Figura N° 39). El protocolo continua realizando solicitud de datos cíclicamente para obtener un voltaje actualizado de la variable a medir en este caso la presión y poder tomar decisiones de acuerdo al programa de control implementado en el PLC.

```

68 05 05 68 86 82 5d 3c 3e df 16 68 0b 0b 68 82 h..hllj<>B.h..hl
86 08 3e 3c 00 04 00 02 80 b4 c4 16 10 01 02 49 I.><...€'Ä...I
4c 16 dc 02 02 10 06 02 7d 85 16 68 09 09 68 02 L.Ü....}I.h.h.
06 08 00 f3 12 02 02 00 19 16 dc 02 02 10 06 02 ...ó.....Ü....
5d 65 16 68 09 09 68 02 06 08 00 f3 12 02 03 00 ]e.h.h...ó...
1a 16 10 03 02 49 4e 16 dc 02 02 10 06 02 7d 85 .....IN.Ü....}I
16 68 09 09 68 02 06 08 00 f3 12 02 02 00 19 16 .h..h...ó.....

```

Figura 39. Captura de intercambio de datos

#### 14.7 Red Profibus con diferentes esclavos

Se configura una red Profibus en el laboratorio de accionamiento de la universidad del Valle utilizando un PLC Siemens S7 300, dos variadores de velocidad micromaster 440 y el transmisor de presión (Figura 40). Se configuró a una velocidad de comunicación de 9600 baudios y con las siguientes direcciones Profibus: micromaster 1 (4), micromaster 2 (5) y el transmisor con la dirección 6. El transmisor de presión y los micromaster se logran comunicar en la red Profibus sin ningún problema.

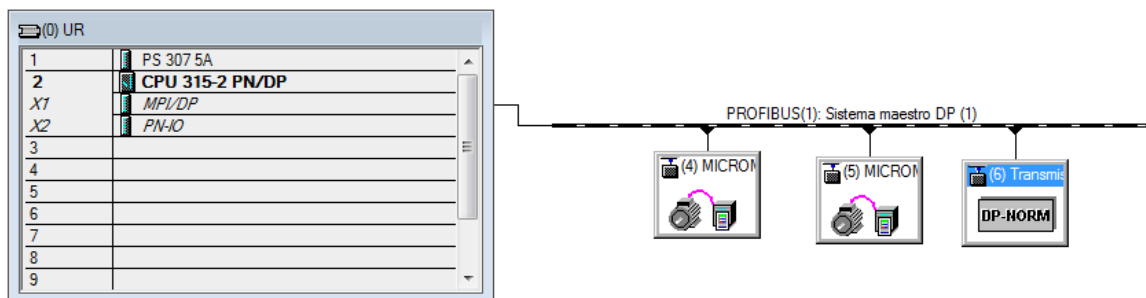


Figura 39. Red Profibus con micromaster 440

## 15. PRUEBA DE MEDIDA DE PRESIÓN

Se realizó una prueba de presión con el fin de verificar los valores compensados por el transmisor de presión desarrollado, la cual consiste en conectar el transmisor a una columna de agua en un rango de 0 a 80 centímetros en forma ascendente con intervalos de 5 cm, posteriormente se repite el proceso de forma descendente de 80 a 0 centímetros con el mismo intervalo. Para esta prueba se utiliza el equipo del laboratorio de automatización de la universidad del valle que nos permite generar la columna de agua (Figura 41).

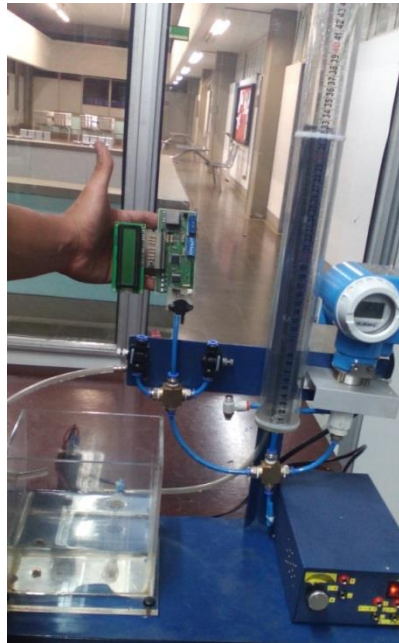
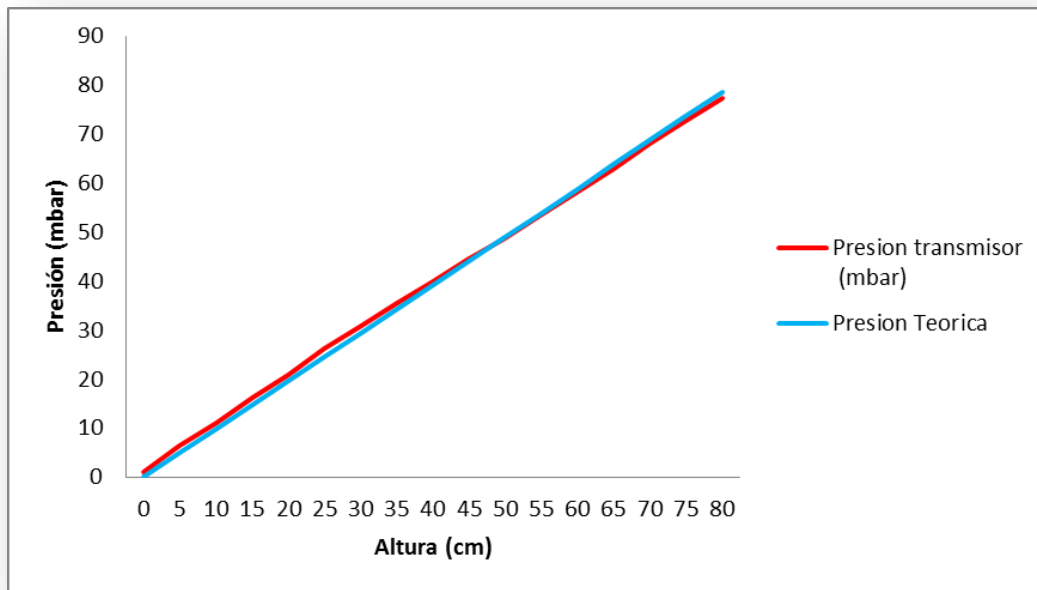


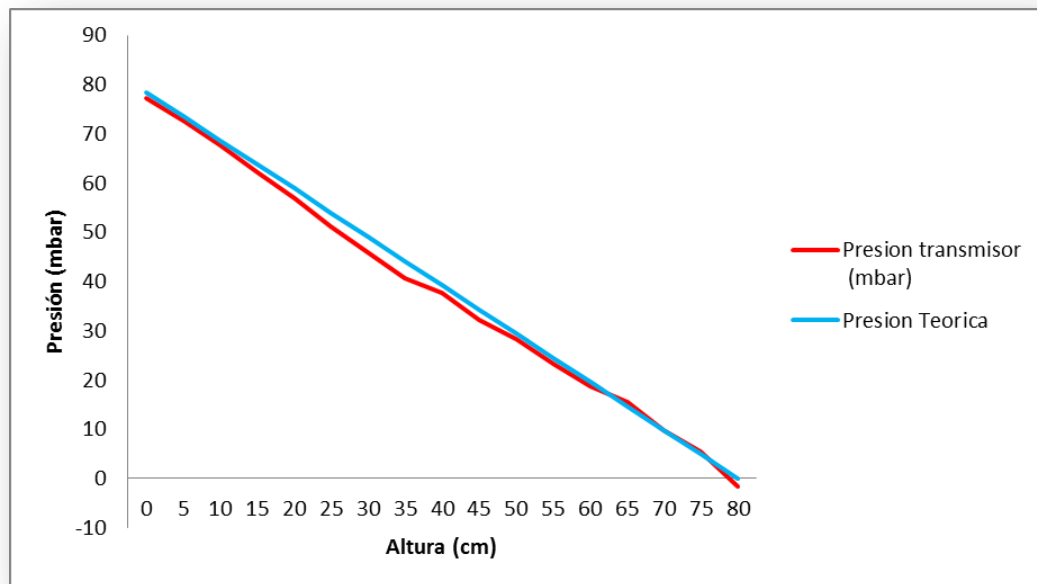
Figura 41. Montaje columna de agua

En la Figura 42 se observa la presión (mbar) vs altura (cm). La respuesta del dispositivo se grafica en rojo y la presión teórica en azul.



**Figura 42. Valores ascendentes**

En la Figura 43 se muestran los datos tomados descendentemente de 80 a 0 centímetros.



**Figura 43. Valores decedentes**

Como resultado se obtiene un error promedio de 0,256% equivalente a 1,28 mbar, un error máximo del 0,7% equivalente a 3,53 mbar, un error ECM (error cuadrático medio) de 0,3% mbar equivalente a 1,5 mbar y una histéresis de 0,8%, la cual es

obtenida calculando la máxima diferencia entre los datos obtenidos de forma ascendente contra los datos obtenidos de forma descendente. Todos los datos y porcentajes obtenidos se calcularon con la escala completa del sensor de presión (500mbar).

## 16. PRUEBA DE VELOCIDAD

Se realizó una prueba de velocidad al transmisor con el fin conocer que velocidades de comunicación Profibus soporta el transmisor de presión.

El DSSP donde se encuentra programado el algoritmo de compensación y el protocolo de comunicación Profibus, alcanza una velocidad máxima de transmisión por la UART de 230400 baudios por tal motivo las velocidades Profibus por encima de los 93.700 baudios no serán alcanzadas ya que el DSSP no podrá comunicar a velocidades mayores.

Tabla 18. Velocidad de comunicación

| Baud rate (bps) | Comunicación |
|-----------------|--------------|
| 9.600           | Alcanzada    |
| 19.200          | Alcanzada    |
| 45.450          | Alcanzada    |
| 93.700          | Alcanzada    |
| 187.500         | No alcanzada |

Como se observa en la Tabla 18, el transmisor de presión alcanza cuatro (4) velocidades de comunicación Profibus.

## 17. PRUEBA DE CONSUMO

Se midió la potencia consumida por el transmisor de presión el cual presenta un consumo entre 79 mA y 96 mA para velocidades entre 9600 y 93750 baudios respectivamente, se encontró que a medida que se va aumentando la velocidad también se aumenta el consumo, esto debido a que el DSSP es cada vez más exigido, ya que aumenta la cantidad de datos que debe transmitir por segundo lo que conlleva a que aumente su tiempo de activo y por ende su consumo de energía.

Tabla 19. Consumo

| Dispositivo o integrado | Consumo (mA) |
|-------------------------|--------------|
| Tarjeta con ADUC845     | 51 a 70 mA   |
| Tranceiver ADM2086      | 19 mA        |
| Sensor                  | 8 mA         |

## CONCLUSIONES

Se desarrolló un transmisor de presión con capacidad de comunicarse en una red Profibus en un rango de velocidades entre 9600 y 93.700 Baudios cumpliendo con los requerimientos de Profibus DP V0. Al utilizar un sensor piezorresistivo fue necesario implementar un sistema electrónico que permitiera la compensación del sensor piezorresistivo, dando como resultado un error cuadrático medio del 0.3%.

El protocolo Profibus fue implementado dentro de un DSSP el cual también contiene el algoritmo de compensación, lo que nos demuestra que es posible sintetizar tanto el algoritmo de compensación como el protocolo de comunicación en un solo integrado utilizando técnicas de programación multitareas. Al realizar el transmisor con un solo integrado en vez de dos se disminuyen los costos de fabricación y se podrían disminuir el consumo de potencia.

EL transmisor de presión fue probado en diferentes redes Profibus con el fin de verificar su funcionamiento. Se verifico en una red donde el único esclavo era el transmisor exigiendo su velocidad de respuesta y en otra red con diferentes esclavos verificando su comunicación con un bus compartido.

Este trabajo de grado permite avanzar un poco más en el conocimiento de las comunicaciones industriales y la implementación del protocolo Profibus en la universidad del valle, ya que se logró un transmisor de presión que compensa las derivas de temperatura y a la vez comunica dentro de una red Profibus. Lo cual es un buen punto de partida para desarrollar cualquier tipo de transmisor con comunicación Profibus.

## **TRABAJOS FUTUROS**

Se propone abordar los siguientes temas con el fin de ampliar la investigación en este campo y mejorar el transmisor construido:

- Realizar un transmisor de presión utilizando un integrado de procesamiento de mayor velocidad que permita compensar el sensor y comunicar mediante Profibus en los niveles de velocidad que no se alcanzaron en este transmisor.
- Realizar un transmisor que permita comunicarse en una red Profibus PA.
- Investigar y desarrollar un dispositivo para comunicarse mediante comunicación Profibus sobre Ethernet y Wireless

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Popp, Manfred. *The New Rapid Way to Profibus DP*. Alemania: Profibus Nutzerorganisation e. V, 2003.
- [2] Ramírez, Carlos Julio. Viveros, Melanie. *Estudio e implementación del protocolo de comunicaciones industriales Profibus DP, en un sistema basado en microcontrolador*. Santiago de Cali, 2011.103p. Trabajo de grado (ingenieros electrónicos). Universidad del valle.
- [3] Pineda Andrés. *Herramienta de diagnóstico de redes profibus DP sobre la interfaz RS 485*. Santiago de Cali, 2013. Trabajo de grado (ingeniero electrónico). Universidad del valle.
- [4] Mossin Eduardo. *Diagnostico automático de redes Profibus*. Sao Carlos 2012. Trabajo de grado doctoral. Universidad de Sao Paulo.
- [5] Eick Mondragón. *Caracterización de un sensor de presión semiconductor y desarrollo de algoritmos de compensación y linealización con circuitos DSSP comerciales*. Santiago de Cali 2012. Trabajo de grado (ingeniero electrónico). Universidad del Valle.
- [6] DATASHEET. ADuC845/ADuC847/ADuC848 MicroConverter® Multichannel, 24-/16-Bit ADCs with Embedded 62 kB, Flash and Single-Cycle MCU. ANALOG DEVICES, 2005.
- [7] DATASHEET. OPA379/OPA2379/OPA4379 1.8V, 2.9mA, 90kHz, Rail-to-Rail I/O OPERATIONAL AMPLIFIERS. TEXAS Instruments, 2008.
- [8] SOLOMAN Sabrie. *Sensors Handbook*, Second Edition. Mc Graw Hill, 2010.
- [9] Stalling, William. *Comunicaciones y redes de computadores*. Ed. Prentice Hall. Séptima Edición. 2004.

## ANEXOS

### ANEXO A: Datos tomados sobre una columna de agua para la prueba de presión realizada en la universidad del valle.

| Altura(cm) | Presión transmisor (mbar) | Presión Teórica | Error   |
|------------|---------------------------|-----------------|---------|
| 0          | 1                         | 0               | 1       |
| 5          | 6,5                       | 4,9035          | 1,5965  |
| 10         | 11,1                      | 9,807           | 1,293   |
| 15         | 16,2                      | 14,7105         | 1,4895  |
| 20         | 20,9                      | 19,614          | 1,286   |
| 25         | 26,2                      | 24,5175         | 1,6825  |
| 30         | 30,9                      | 29,421          | 1,479   |
| 35         | 35,5                      | 34,3245         | 1,1755  |
| 40         | 40                        | 39,228          | 0,772   |
| 45         | 44,6                      | 44,1315         | 0,4685  |
| 50         | 48,8                      | 49,035          | -0,235  |
| 55         | 53,5                      | 53,9385         | -0,4385 |
| 60         | 58,2                      | 58,842          | -0,642  |
| 65         | 63                        | 63,7455         | -0,7455 |
| 70         | 67,9                      | 68,649          | -0,749  |
| 75         | 72,6                      | 73,5525         | -0,9525 |
| 80         | 77,2                      | 78,456          | -1,256  |
| 75         | 72,7                      | 73,5525         | -0,8525 |
| 70         | 67,7                      | 68,649          | -0,949  |
| 65         | 62,1                      | 63,7455         | -1,6455 |
| 60         | 56,9                      | 58,842          | -1,942  |
| 55         | 51,1                      | 53,9385         | -2,8385 |
| 50         | 45,8                      | 49,035          | -3,235  |
| 45         | 40,6                      | 44,1315         | -3,5315 |
| 40         | 37,7                      | 39,228          | -1,528  |
| 35         | 32,1                      | 34,3245         | -2,2245 |
| 30         | 28,4                      | 29,421          | -1,021  |
| 25         | 23,3                      | 24,5175         | -1,2175 |
| 20         | 18,7                      | 19,614          | -0,914  |
| 15         | 15,6                      | 14,7105         | 0,8895  |
| 10         | 9,9                       | 9,807           | 0,093   |
| 5          | 5,5                       | 4,9035          | 0,5965  |
| 0          | -1,6                      | 0               | -1,6    |

## Anexo B: muestra de un Archivo GSD para un esclavo Profibus

```
; UNIVERSIDAD DEL VALLE

; ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRONICA

; PROGRAMA DE INGENIERIA ELECTRONICA

; TRABAJO DE GRADO: DESARROLLO DE UN TRANSMISOR DE PRESION
CON PROTOCOLO PROFIBUS

; AUTOR: JORGE ENRIQUE FERNANDEZ BARONA

;=====
;=====
;=====

; GENERAL

#Profibus_DP
GSD_revision           =4 ;numero de revision
Vendor_Name           = "Transmisor Univalle"
Model_Name            = "TransmisorUnivalle1"
Revision              = "2014"
Ident_Number          = 0x80B5 ;numero de identidad el mismo del micromaster
Protocol_Ident        = 0
Station_Type          = 0
FMS_supp              = 0
Hardware_Release      = "B07/08"
Software_Release      = "V1.0"
;
9.6_supp              = 1
19.2_supp             = 1
45.45_supp            = 1
93.75_supp            = 1
187.5_supp            = 0
500_supp              = 0
1.5M_supp             = 0
3M_supp               = 0
6M_supp               = 0
12M_supp              = 0
;
MaxTsdr_9.6           = 40
MaxTsdr_19.2          = 40
MaxTsdr_45.45         = 40
MaxTsdr_93.75         = 40
MaxTsdr_187.5         = 40
```

```

MaxTsdr_500      = 40
MaxTsdr_1.5M    = 40
MaxTsdr_3M      = 50
MaxTsdr_6M      = 100
MaxTsdr_12M     = 200
;
;
;
Redundancy       = 0 ;no acepta redundancia
Repeater_Ctrl_Sig = 2
24V_Pins         = 0
Implementation_Type = "ADUC845"
Bitmap_Device    = "univalle" ;grafica del dispositivo
;
;
;--- slave basic ---
;
Freeze_Mode_supp = 0 ;0 para negar, 1 para afirmar
Sync_Mode_supp   = 0
Auto_Baud_supp   = 0
Set_Slave_Add_supp = 0
User_Prm_Data_Len = 3
User_Prm_Data     = 0x00,0x00,0x00
Min_Slave_Intervall = 1
;
;
Modular_Station  = 0 ; no tiene modulos
;Max_Module      = 1
;Max_Input_Len   = 28
;Max_Output_Len  = 28
;Max_Data_Len    = 56
;
;
Fail_Safe        = 0 ; no soporta modo seguro
Max_Diag_Data_Len = 6
Modul_Offset     = 0
Slave_Family     = 1@TdF@UNIVALLE
;Max_User_Prm_Data_Len = 0
;--- slave extensions (GSD R3) ---
;
;
;Info_Text       = "ESCLAVO PROFIBUS DP"
;DPV1_Slave      = 1 ;soporta las funciones DP-V1
;C1_Read_Write_supp = 1 ;canales aciclicos no definidos, se evita la
parametrizacion DP-V1, el dispositivo de campo soporta MS1 acíclico, servicios
DS_Read y DS_Write.
;C2_Read_Write_supp = 1 ;el dispositivo de campo soporta MS2 acíclico,
servicios DS_Read y DS_Write/Data_Transport.
;C1_Max_Data_Len  = 240 ;especifica la longitud máxima de datos de datos
de usuario de un canal MS1 sin Function_Num, Slot_number, Index, Length (min.
48 octetos).

```

```

;C2_Max_Data_Len      = 240 ;especifica la longitud máxima de datos de datos
de usuario de un canal MS2 sin Function_Num, Slot_number, Index, Length (min.
48 octetos).
;C1_Response_Timeout  = 1 ;especifica el máximo tiempo desde el inicio de un
servicio MS1 acíclicos hasta el suministro de los datos.
;C2_Response_Timeout  = 1 ;especifica el máximo tiempo desde el inicio de un
servicio MS2 acíclicos hasta el suministro de los datos.
;C1_Read_Write_required = 0 ;el esclavo DP requiere los servicios MS1 acíclicos
DS_Read y DS_Write.
;C2_Read_Write_required = 0 ;el esclavo DP requiere los servicios MS2 acíclicos
DS_Read y DS_Write con e fin de que sea capaz de operar.
;C2_Max_Count_Channels = 2 ;define el número máximo de canales MS2
activos.
;Max_Initiate_PDU_Length = 52 ;especifica el máximo tamaño de petición inicial
PDU incluyendo el Function_Num del administrador de recursos (min 52 octetos).
;DPV1_Data_Types      = 0 ;El esclavo soporta un nuevo tipo de datos.
;WD_Base_1ms_supp     = 1 ;El esclavo soporta ajustes del watchdog con base
de 1ms.heck_Cfg_Mode  = 0 ;durante la configuración el esclavo acepta
deferentes configuraciones (input/output data length) de la que se encontró en la
expansión.
;Publisher_supp       = 0 ;esta palabra clave pertenece a los servicios DP-V2 y
estados para que este esclavo pueda funcionar como un Publisher.

;
;
;--- module definitions ---
;
;

Module = "4 PKW, 2 PZD (PPO 1)      " 0xF3, 0xF1
21
;Text_Item = "PPO according to PROFIDrive V2"
EndModule

```