

# **Transmisor electrónico universal, inteligente y adaptativo orientado a un rango extenso de aplicaciones industriales**

**Autor: Alberto José Leira Rejas**

**Tesis doctoral UDC/2017**

**Directores:**

**Dr. José Luis Calvo Rolle**

**Dr. Francisco Javier Pérez Castelo**

**Departamento de Energía y Propulsión Marina**

**Programa de Ingeniería Marítima**



**UNIVERSIDADE DA CORUÑA**



Dr. D. José Luis Calvo Rolle y Dr. D. Francisco Javier Pérez Castelo, profesores del Departamento de Ingeniería Industrial de la Universidade da Coruña

AUTORIZAN

A la defensa de la Tesis Doctoral titulada “*Transmisor electrónico universal, inteligente y adaptativo orientado a un rango extenso de aplicaciones industriales*”, realizada por *D. Alberto José Leira Rejas* bajo nuestra dirección y supervisión, y que presenta para la obtención del grado de Doctor por la Universidade da Coruña.

En Ferrol, a 24 de enero de 2017.

Dr. D. José Luis Calvo Rolle

Dr. D. Francisco Javier Pérez Castelo



A mis padres y mi hermana.

A mis hijos Alberto, Beatriz e Iván.

A Aurora.

Sin vosotros no habría sido posible.



## AGRADECIMIENTOS

Si bien es moralmente necesario y obligado glosar los agradecimientos a aquellas personas que han hecho posible la elaboración de la presente, es cierto también que es factible dejarse a alguien en el tintero. Si ello ocurriese, que las personas afectadas sepan disculparme.

En primer lugar, a mis compañeros y directores de la tesis doctoral, D. Francisco Javier Pérez Castelo y D. José Luis Calvo Rolle, por todo su apoyo, consejos y contribuciones para la elaboración de la misma.

Al grupo de Ciencia y Técnica Cibernética de la Universidade da Coruña y muy especialmente a su director, D. Ramón Ferreiro García, por haberme admitido en el mismo y haberme proporcionado unas directrices maestras de vital importancia.

A mis compañeros -activos y jubilados- del área de Ingeniería de Sistemas y Automática del departamento de Ingeniería Industrial de la Universidade da Coruña, entre ellos los citados anteriormente, con los que he compartido veinte años de singladura docente y que en muchos casos, además de sus aportaciones académicas, profesionales y científicas, me han honrado con su amistad.

A la dirección y equipo docente de la ETS de Náutica y Máquinas de la Universidade da Coruña, por haberme admitido en su programa de doctorado.

A la dirección de la EUP de Ferrol, de la Universidade da Coruña, por las facilidades ofrecidas para la elaboración y defensa de la tesis.

Y creo obligado hacer una referencia a todos los profesores que he tenido en mi vida, desde aquella Srta Ofelia, que me enseñó a leer en el parvulario, hasta los profesores del Máster en Ingeniería Marítima, sin olvidar a todos aquellos, que en alguna etapa de mi vida me han enseñado algo y que han dejado su impronta en mi forma de aprender, de enseñar, de escribir, y en suma, de interpretar la realidad.



## RESUMEN

El presente trabajo de investigación muestra un modelo de transmisor industrial, electrónico, universal e inteligente, que pretende abarcar un alto espectro dentro del campo de las comunicaciones industriales digitales.

El modelo se implementa físicamente en base a un microcontrolador, un módulo de comunicaciones y un amplificador de instrumentación programable -entre otros elementos- que lo convierten en un transmisor versátil y flexible , adaptado a todo tipo de medidas físicas, en base a un software abierto y un hardware enfocado al correcto acondicionamiento de las señales de entrada.

Las ventajas de este transmisor, respecto a otros de la misma naturaleza radican en su naturaleza multivariable, su universalidad, capacidad de adaptación y escalabilidad.



## RESUMO

O presente traballo de investigación, mostra un modelo de transmisor industrial, electrónico, universal e intelixente, que pretende abarcar un amplo espectro no ámbito das comunicacións dixitais industriais.

O modelo impleméntase en base a un microcontrolador, un módulo de comunicación e un amplificador de instrumentación programable, entre outros elementos, que fan del un transmisor versátil e flexible, adaptado a todo tipo de medidas físicas, en base a un software aberto e un hardware centrado no condicionamento correcta dos sinais de entrada.

As vantaxes deste transmisor con respecto aos outros da mesma natureza radican na súa natureza multivariante e a súa universalidade, adaptabilidade e escalabilidade.



## ABSTRACT

This research shows a model of industrial, electronic, universal and intelligent transmitter, which intended to encompass a wide spectrum in the field of industrial digital communications.

The model to a microcontroller, a communications module and programmable instrumentation amplifier, among other elements- that make it a versatile and flexible transmitter, adapted to all types of physical measurements, based on an open software is physically implemented on the basis and hardware focused on the correct conditioning of the input signals.

The advantages of this transmitter with respect to others of the same nature multivariable lie in its nature, its universality, adaptability and scalability.



# ÍNDICE

## Capítulo 1. Introducción

1.1 Antecedentes	Página 2
1.2 Motivación	Página 4
1.3 Objetivos	Página 5
1.4 Metodología	Página 6
1.4.1 Documentación	Página 6
1.4.2 Plan de trabajo	Página 7
1.5 Estructura	Página 8

## Capítulo 2. Estado de la Técnica

2.1 Introducción	Página 10
2.2 Sensores y transductores	Página 10
2.2.1 Clasificación y características generales de los sensores	Página 12
2.2.2 Sensores virtuales	Página 13
2.3 Transmisores industriales	Página 16
2.3.1 Tipos de transmisores electrónicos industriales	Página 17
2.3.2 El transmisor universal inteligente	Página 18
2.3.2.1 Transmisores comerciales	Página 20
2.4 Comunicaciones	Página 20

## Capítulo 3. Análisis de Requisitos para el Transmisor Universal Inteligente

3.1 Introducción	Página 26
3.2 Necesidad de un transmisor industrial	Página 26
3.3 Requisitos del transmisor universal e inteligente	Página 27
3.4 Otros transmisores inteligentes comerciales	Página 28

## Capítulo 4. Arquitectura del Transmisor Universal Inteligente : Nivel Hardware

4.1 Introducción	Página 30
4.2 Unidades funcionales	Página 30
4.3 Descripción detallada del módulo PCC	Página 32
4.3.1 Módulo PCC	Página 32
4.3.1.1 Amplificador de Instrumentación de Ganancia Variable (PGIA)	Página 34
4.3.1.1.1 Potenciómetro digital	Página 36
4.3.1.1.2 Implementación del PGIA con el potenciómetro digital	Página 38
4.3.1.1.3 Filtro activo	Página 42
4.4 Unidad Microcontroladora (MCU) y Módulo de Comunicaciones (CM): La tarjeta Anybus® Evaluation	Página 44
4.4.1 Introducción	Página 44
4.4.2 Microcontrolador SAB 80C517A	Página 46
4.5 Esquemas hardware del transmisor	Página 47
4.5.1 Introducción	Página 47

4.5.2 Multiplexor analógico	Página 48
4.5.3 Amplificador de ganancia programable, filtro y sensor de temperatura	Página 49
4.5.4 Potenciómetros digitales	Página 50
4.5.5 Alimentación de la placa	Página 51
4.5.6 Tensiones de referencia	Página 53
4.5.7 Conector de interface con la tarjeta Anybus® Evaluation Board	Página 53
4.5.8 Convertidor D/A	Página 54
4.5.9 Convertidor tensión/corriente	Página 54
4.6 Prototipo final	Página 57

## Capítulo 5. El Módulo de Comunicaciones en Detalle

5.1 Introducción	Página 60
5.2 El módulo de comunicaciones en detalle	Página 60
5.2.1 Tarjeta AnyBus®-S Slave&Master. Introducción	Página 62
5.2.2 Arquitectura básica	Página 63
5.2.2.1 Interfaz de Aplicación	Página 64
5.2.2.2 Microprocesador, memoria interna y periféricos E/S	Página 67
5.2.2.3 Interfaz de Fieldbus y gestión de memoria	Página 67
5.2.2.4 Interfaz Mailbox	Página 68
5.2.3 Modos de comunicación	Página 72

# Capítulo 6. Arquitectura del Transmisor Universal Inteligente : Nivel Software

6.1 Introducción	Página 76
6.2 Flujogramas del sistema y explicación de las principales subrutinas	Página 77
6.2.1 modulo main()	Página 79
6.2.2 subrutinas	Página 80
6.2.2.1 obtencion_ganancia_offset()	Página 80
6.2.2.2 serie()	Página 85
6.2.2.3 calibrar_termopar_k()	Página 86
6.2.2.4 termopar_k()	Página 88
6.2.2.5 calibrar_pt100()	Página 92
6.2.2.6 pt100()	Página 93
6.2.2.7 presion_4_20mA()	Página 97
6.2.2.8 DS1620()	Página 99
6.2.2.9 ExchangeData()	Página 102

## Capítulo 7. Mejoras del Prototipo

7.1 Introducción	Página 106
7.2 Mejoras en el prototipo	Página 106
7.2.1 Filtro programable	Página 107
7.2.2 Utilización del DAC en modo bipolar	Página 109
7.2.3 Utilización de una EEPROM externa	Página 109

## Capítulo 8. Caso de Estudio

8.1	Introducción	Página 112
8.2	Caso de estudio	Página 112
8.2.1	Explicación del supuesto	Página 112
8.2.2	Diseño del sistema	Página 113
8.2.3	Programación del PGIA	Página 118
8.2.3.1	Ajuste de ganancia	Página 119
8.2.3.2	Cálculo de la tensión de salida y valor digital del DAC	Página 120
8.2.3.3	Operatoria del sistema	Página 124
8.3	Aspectos relativos a la configuración y Calibración del dispositivo	Página 131
8.4	Comportamiento de salida y recapitulación	Página 132

## Capítulo 9. Campos de Aplicación, Trabajos Futuros y Conclusiones

9.1	Introducción	Página 136
9.2	Campos de aplicación	Página 136
9.3	Conclusiones y posibilidades	Página 139

## Capítulo 10. Referencias

Referencias y fuentes de información	Página 144
--------------------------------------	------------

## Anexo 1: Diccionario de Acrónimos, Abreviaturas y siglas

Página 154

## Anexo 2: Producción Científica y Resultados Prácticos

Página 158

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de bloques de un sensor virtual	Página 15
Figura 2. Transmisor Universal Inteligente	Página 19
Figura 3. Modelo de una red en bus de campo	Página 23
Figura 4. Modelo de una red en bus de campo	Página 24
Figura 5. Diagrama de bloques del UST	Página 32
Figura 6. Diagrama de bloques del PCC	Página 33
Figura 7. Amplificador de Instrumentación	Página 35
Figura 8. Potenciómetro convencional	Página 36
Figura 9. Diagrama de bloques del DS1868	Página 37
Figura 10. Amplificador programable	Página 38
Figura 11. Arquitectura detallada del PGIA	Página 42
Figura 12. Mapa de Ganancia del PGIA	Página 42
Figura 13. Filtro Activo	Página 43
Figura 14. Tarjeta de Evaluación	Página 45
Figura 15. Microcontrolador 80C517A	Página 46
Figura 16. Multiplexor Analógico MAX397	Página 48
Figura 17. Esquema del bloque de acondicionamiento y sensor térmico	Página 50
Figura 18. Potenciómetros digitales	Página 51
Figura 19. Alimentación (tensiones positivas)	Página 51
Figura 20. Tensiones negativas	Página 52
Figura 21. Tensiones de referencia	Página 53
Figura 22. Conector de interface	Página 53
Figura 23. Convertidor D/A	Página 54
Figura 24. Convertidor Tensión-Corriente	Página 55
Figura 25. Imagen del prototipo final	Página 57

Figura 26. Arquitectura básica de la tarjeta	Página 63
Figura 27. Mapa de memoria	Página 64
Figura 28. Interacción entre la aplicación y la tarjeta Anybus a través de la Interfaz Mailbox	Página 68
Figura 29. Modos de comunicación de Mailbox	Página 69
Figura 30. Envío de un mensaje al Mailbox	Página 71
Figura 31. Recepción de un mensaje del Mailbox	Página 73
Figura 32. Flujograma del cuerpo principal	Página 78
Figura 33. Topología del sistema Master-Slave	Página 79
Figura 34. Flujograma principal de Obtencion_ganancia_offset()	Página 81
Figura 35. Flujograma de lectura_datos()	Página 82
Figura 36. Flujograma de saca_ganancia_offset()	Página 82
Figura 37. Flujograma de busca_valores_potenciometro()	Página 83
Figura 38. Flujograma de serie()	Página 85
Figura 39. Flujograma de calibrar_termopar_k()	Página 87
Figura 40. Flujograma de termopar_k()	Página 91
Figura 41. Flujograma de calibrar_PT100()	Página 92
Figura 42. Flujograma de PT_100() (1.2)	Página 95
Figura 43. Flujograma de PT_100() (2.2)	Página 96
Figura 44. Flujograma de presion_4_20mA(void)	Página 98
Figura 45. Flujograma de DS1620() (1.2)	Página 100
Figura 46. Flujograma de DS1620() (2.2)	Página 101
Figura 47. Flujograma de ExchangeData()	Página 103

Figura 48. Flujograma de la generación de la señal de reloj del filtro programable	Página 108
Figura 49. Estructura de medidas a través del UST	Página 113
Figura 50. Esquema del sensor virtual y su interrelación con las magnitudes	Página 114
Figura 51. Configuración bipolar del Max 506	Página 121
Figura 52. Operatoria del sistema	Página 125
Figura 53. Adaptación del código para el caso de estudio	Página 127
Figura 54. Gráfica de resultados del caso de estudio	Página 128
Figura 55. Gráfica de resultados disgregada (1): Presión dinámica - Caudal másico- N.Reynolds	Página 128
Figura 56. Gráfica de resultados disgregada (2): Presión dinámica - Velocidad - C.volumétrico	Página 129
Figura 57. Comportamiento del PCC	Página 133



# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características del Amplificador de Instrumentación	Página 35
Tabla 2. Características principales de los módulos Anybus	Página 62
Tabla 3. Estructura de un mensaje del Mailbox	Página 70
Tabla 4. Cabecera de un mensaje	Página 72
Tabla 5. Explicación del cuerpo principal de Obtencion_ganancia_offset()	Página 81
Tabla 6. Explicación de lectura_datos()	Página 82
Tabla 7. Explicación de saca_ganancia_offset	Página 81
Tabla 8. Explicación de busca_valores_potenciometro()	Página 83
Tabla 9. Explicación de serie()	Página 85
Tabla 10. Explicación de CALIBRAR_TERMOPAR_K	Página 86
Tabla 11. Explicación de termopar_k()	Página 88
Tabla 12. Explicación de CALIBRAR_PT100()	Página 93
Tabla 13. Explicación de PT100()	Página 93
Tabla 14. Explicación de presion_4_20mA()	Página 97
Tabla 15. Explicación de DS1620()	Página 99
Tabla 16. Explicación de ExchangeData()	Página 102
Tabla 17. Especificaciones del PGIA	Página 123
Tabla 18. Valores de programación del PGIA	Página 124
Tabla 19. Relación de medidas directas	Página 129
Tabla 20. Relación de medidas virtuales	Página 130



# ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Intensidades en los seguidores de tensión	Página 39
Ecuación 2. Factor de proporcionalidad	Página 39
Ecuación 3. Función de transferencia del amplificador U2B	Página 40
Ecuación 4. Función de transferencia del amplificador A	Página 40
Ecuación 5. Función de transferencia del amplificador programable	Página 40
Ecuación 6. Ganancia del amplificador programable	Página 41
Ecuación 7. Offset del amplificador programable	Página 41
Ecuación 8. Ganancia del PGIA en función del valor digital	Página 41
Ecuación 9. Tensión de salida del amplificador operacional 1	Página 55
Ecuación 10. Tensión de salida del operacional 1 en función de $V_D/A$ y $V_o(2)$	Página 56
Ecuación 11. Tensión de salida del operacional 2	Página 56
Ecuación 12. Expresión de la corriente de salida	Página 56
Ecuación 13. Temperatura de unión del termopar	Página 89
Ecuación 14. Tensión del termopar	Página 89
Ecuación 15. Temperatura medida por un termopar compensado	Página 90
Ecuación 16. Tensión diferencial en un puente de Wheatstone	Página 94
Ecuación 17. Expresión de la temperatura medida en el puente	Página 94
Ecuación 18. Relación entre el gradiente de presión y la velocidad del fluido	Página 115
Ecuación 19. Expresión de la velocidad del fluido en función del gradiente de presión	Página 115

Ecuación 20. Expresión del flujo volumétrico	Página 115
Ecuación 21. Expresión del flujo de masa	Página 115
Ecuación 22. Número de Reynolds	Página 115
Ecuación 23. Expresión de la viscosidad cinemática	Página 116
Ecuación 24. Ganancia y offset (1)	Página 117
Ecuación 25. Ganancia y offset (2)	Página 117
Ecuación 26. Expresión de la tensión de salida del convertidor digital analógico en función del offset	Página 120
Ecuación 27. Tensión del amplificador conectado a la salida del canal A del convertidor digital-analógico	Página 119
Ecuación 28. Tensión de salida del amplificador conectado a la salida, en función de la tensión de referencia y la tensión de salida del canal	Página 119
Ecuación 29. Tensión de salida del canal A en función del valor digital del convertidor y de la tensión de referencia del mismo	Página 122
Ecuación 30. Valor digital de entrada del convertidor	Página 123

# Capítulo 1

## Introducción

*Cuando puedes medir aquello de lo que estás hablando y expresarlo en números, puede decirse que sabes algo acerca de ello; pero, cuando no puedes medirlo, cuando no puedes expresarlo en números, tu conocimiento es muy deficiente y poco satisfactorio. (Lord Kelvin).*

## 1.1 Antecedentes

El control automático de procesos es una de las características principales del sistema de producción industrial moderno y por ende, una de las señas de identidad del mismo.

Sin lugar a dudas, la brecha que separa la diferencia entre las naciones y sociedades desarrolladas y aquellas que no lo son, puede establecerse en el intensivo uso de las nuevas tecnologías en el ámbito del diseño y desarrollo de productos y servicios que se da en las primeras<sup>1</sup>.

El control automático de procesos, independientemente de la tecnología que emplee, del método de desarrollo y del contexto en que se aplique, siempre va a partir de una premisa fundamental: la captura de los valores de unas magnitudes físicas externas determinadas (presión, temperatura, velocidad, humedad, etc) y de su adaptación o acondicionamiento para su posterior procesamiento. En suma, que se necesitará medir, acondicionar y, posteriormente, transmitir las señales leídas en un formato que permita su manipulación, visualización y almacenamiento.

El proceso que abarca la medida, adecuación y transmisión de la señal es una parte fundamental del sistema de control. Por ello, los principales fabricantes de sistemas de instrumentación a nivel mundial ofertan los llamados transmisores, los cuales permiten la captura de una señal de la planta y su posterior transmisión, en formato de corriente (4 a 20 mA) o de tensión (0 a 5V).<sup>2</sup>

- 
- 1 Es justo decir que la globalización tiende a romper esa brecha en tanto que la deslocalización ha llevado a trasladar empresas completas (con su filosofía, sistema de trabajo, tecnología etc) o en otro caso a levantar organizaciones industriales con formato "llave en mano". No obstante el impacto social positivo que ha dejado este modus operandi en las sociedades desarrolladas no se ha extrapolado a las sociedades receptoras (emergentes).
  - 2 Sólo vamos a tratar los transmisores electrónicos

## Capítulo 1. Introducción.

Una definición más amplia de transmisor lo definiría como un dispositivo, generalmente electrónico, que mide una magnitud física específica (temperatura, presión, nivel, etc) mediante un sensor y produce una señal de salida calibrada que representa el valor medido bajo una norma determinada.

Los llamados transmisores inteligentes, son aquellos que mantienen las principales características de un transmisor convencional, pero que asimismo integran dentro de su arquitectura un microprocesador y un protocolo de comunicación digital que permite capacidades adicionales como configuración y supervisión en línea, medición remota, etc.

Los transmisores tradicionales se utilizan normalmente en entornos industriales con topología centralizada punto a punto. Estos tipos de redes están limitados en la velocidad de transferencia de datos y la posibilidad de implementar tareas complejas (diagnóstico, configuración remota, detección virtual, control distribuido, etc.). Aunque el transmisor tradicional y el modelo punto a punto siguen siendo válidos, los modernos transmisores inteligentes requieren tecnologías de red (buses de campo) para aprovechar sus capacidades.

Ligados a los transmisores inteligentes se encuentran los llamados sensores virtuales [1], conocidos también como *soft sensors*, y que son aquellos mecanismos basados en un modelo matemático, implementado generalmente a través de un sistema microprocesador, y que permiten obtener indirectamente el valor de una magnitud a medir, a partir de otros sensores físicos instalados en la planta.

Las ventajas de este tipo de sensores podrían resumirse en [1]:

- ✓ Permiten medir magnitudes para las que no tenemos sensores disponibles o que son de alto coste y/o mantenimiento.
- ✓ Permiten evitar análisis de laboratorio en aquellos casos en los que no puede hacerse una medida en línea.

- ✓ Permiten simplificar el sistema de medida y/o control.
- ✓ Permiten la captura y procesamiento de magnitudes poco accesibles físicamente.

Los sensores virtuales se implementan sobre un sistema de procesamiento digital que permitirá la manipulación aritmético-lógica de las magnitudes leídas para proporcionarnos el valor de la medida "virtual".

## 1.2 Motivación

Podría establecerse que el fin último de la ingeniería es crear productos y servicios de utilidad, para diferenciar su campo de las llamadas ciencias puras o naturales (por usar una terminología, tal vez arcaica para referirnos a los ámbitos del saber que estudian la naturaleza de los fenómenos físicos). Por ello, un trabajo de investigación en el ámbito de la ingeniería conlleva unas peculiaridades propias, ligadas al carácter pragmático de la misma.

La consecución de un transmisor electrónico universal, inteligente y adaptativo, desligado, dentro de lo posible de restricciones comerciales, de formatos y protocolos, capaz de operar con sensores físicos y virtuales y que sea ergonómico en su configuración e interface con el usuario, amén de realizar un desempeño eficaz y eficiente, es la motivación motriz del presente trabajo, o lo que es lo mismo, la idea de partida. En ese punto de partida, se ha realizado un análisis exhaustivo de los diferentes modelos ya existentes.

Por otra parte, se pretendía que el prototipo final desarrollado pudiese dar lugar a posteriores productos, servicios y sistemas, vinculados al control local y remoto de procesos industriales, especialmente en lo que a la industria 4.0 se refiere, generando así un elemento de base para otras líneas de investigación y desarrollo asociadas.

## Capítulo 1. Introducción.

### 1.3 Objetivos

El objetivo de los miembros del grupo de investigación en Ciencia y Técnica Cibernética de la Universidade da Coruña, era implementar un transmisor electrónico universal que incorporase características "inteligentes" y que tuviese la capacidad de trabajar eficientemente con sensores reales y virtuales.

El trabajo, vinculado al campo del control de procesos, plantea incorporar los conocimientos y la experiencia teórico-práctica del grupo de Ciencia y Técnica Cibernética de la Universidade da Coruña (UDC) en disciplinas relativas a la informática industrial (microprocesadores y microcontroladores), automatización industrial (buses de campo y comunicaciones industriales), electrónica analógica (filtros, sistemas de alimentación), instrumentación electrónica (sensores y actuadores), etc, en aras de desarrollar un equipo real que se vea plasmado en un prototipo final concreto.

El know-how en el campo de la instrumentación electrónica unido al de desarrollo de sistemas basados en microcontroladores, lleva al proyecto de diseño e implementación física de un transmisor que presentará las siguientes características:

- ✓ Utilización de todo tipo de sensores (analógicos, digitales, etc).
- ✓ Incorporación de funciones de autocalibración y autoconfiguración.
- ✓ Posibilidad de elección entre diferentes salidas analógicas y digitales.
- ✓ Capacidad de trabajo en entornos de comunicación industrial heterogéneos.
- ✓ Capacidad de realización de medidas virtuales.

Los apartados anteriores, podrían canalizarse en base a unos objetivos finales más concretos:

- ✓ Funciones de control del módulo de comunicación para la configuración y tx / rx como cliente o servidor en una red Industrial Ethernet / IP.
- ✓ Funciones de control de módulos de comunicación para interoperación de instrumentos con redes de la familia DeviceNet.
- ✓ Procesamiento de mensajes recibidos y ejecución de los comandos asociados (mediciones directas o virtuales, activación / desactivación de salida, activación de controladores, configuración / calibración remota de instrumentos, diagnóstico local y remoto, etc.).
- ✓ Funciones de procesamiento para la medición virtual directa o local.
- ✓ Procedimientos de configuración para la máxima resolución en las mediciones y en función del tipo de sensor, tipo de interfaz y rango de medida.
- ✓ Funciones de interfaz hombre-máquina.

Ello llevará al diseño y realización de un sistema digital en lógica programada versátil, *inteligente* y de utilización universal.

## **1.4 Metodología**

La estrategia metodológica empleada para la consecución de los objetivos planteados ha sido estructurada en las siguientes etapas fundamentales:

### **1.4.1 Documentación**

Se llevará a cabo una búsqueda y análisis de la documentación que permita tener una visión detallada de los antecedentes y estado actual de la materia, conllevando los siguientes pasos:

## Capítulo 1. Introducción.

- ✓ Estudio generalístico de sensores físicos y virtuales.
- ✓ Estudio generalístico de los transmisores electrónicos, sus características y funcionamiento.
- ✓ Análisis de algún transmisor comercial de uso común, haciendo hincapié en sus características, prestaciones, rangos de funcionamiento, interacción con el usuario, etc.
- ✓ Repaso al estado del arte de las redes de comunicación industriales a nivel hardware, software y de protocolos.
- ✓ Evaluación de las principales arquitecturas de microcontroladores y la adecuación de cada una para la implementación del transmisor.
- ✓ Estudio de una posible alternativa o mejora de los modelos clásicos de transmisores.

### 1.4.2 Plan de trabajo.

Se realizará un plan para abordar el trabajo de investigación en el que se trata de alcanzar los objetivos de partida. La planificación se puede desglosar en los siguientes puntos principales:

- ✓ Presentación de un estado del arte en todo lo relativo a sensores físicos y virtuales, así como de los transmisores electrónicos.
- ✓ Realización de un análisis de requisitos de las prestaciones que debe incorporar un transmisor electrónico universal con funciones "inteligentes".
- ✓ Propuesta del modelo conceptual del transmisor basado en las premisas del apartado anterior.
- ✓ Desarrollo del modelo físico del transmisor a nivel hardware.
- ✓ Desarrollo del software de control asociado.
- ✓ Presentación del modelo final.
- ✓ Puesta en marcha del prototipo.
- ✓ Exposición de conclusiones finales.
- ✓ Presentación de posibles trabajos futuros.

**1.5 Estructura**

Capítulo 2. Estado de la Técnica.

Capítulo 3. Análisis de Requisitos para el Transmisor Universal Inteligente.

Capítulo 4. Arquitectura del Transmisor Universal Inteligente: Nivel Hardware.

Capítulo 5. El Módulo de Comunicaciones en Detalle.

Capítulo 6. Arquitectura del Transmisor Universal Inteligente: Nivel Software.

Capítulo 7. Mejoras del Prototipo.

Capítulo 8. Caso de Estudio.

Capítulo 9. Campos de Aplicación, Trabajos Futuros y Conclusiones.

Capítulo 10. Referencias.

Anexo 1. Diccionario de Abreviaturas, Acrónimos y Siglas.

Anexo 2. Producción Científica y Resultados Prácticos.

## Capítulo 2

### Estado de la Técnica

*Admiro la perfección desde que vi el Partenón. Y, en nuestra civilización, esa perfección la aporta automáticamente la máquina, que no es un espanto ni algo horrible, sino un útil extraordinario de perfección. (Le Corbusier).*

## **2.1 Introducción**

En este capítulo se realiza una revisión del estado actual, tanto de la técnica como de la investigación relacionada con los sensores industriales y con los transmisores electrónicos.

El control y monitorización de procesos, así como el diseño e implementación de sistemas automáticos, conlleva en todo caso la captura de magnitudes físicas del mundo exterior tanto eléctricas (corriente, tensión, etc) como no eléctricas (velocidad, aceleración, temperatura, presión, etc).

Sea cual sea la naturaleza de la señal, al final nos vamos a encontrar con una magnitud eléctrica ligada a ese valor físico que debe ser debidamente preparada o acondicionada para su posterior procesamiento (sea analógico o digital) en los términos oportunos.

## **2.2 Sensores y transductores**

Por sensor entendemos aquel dispositivo que ante una entrada física o química, cuya naturaleza no tiene por que ser eléctrica, devuelve una salida, generalmente eléctrica [2].

Por ejemplo, una resistencia fotosensible (LDR) tiene una variación de un parámetro eléctrico (su valor óhmico) como respuesta ante la incidencia de un fenómeno físico, que en este caso es la luz; una resistencia NTC (coeficiente de temperatura negativo) ve disminuido su valor óhmico ante aumentos de la temperatura, etc.

Muchas veces y de forma que se puede considerar desacertada, se aplican de manera indistinta los conceptos de sensor y transductor.

## Capítulo 2. Estado de la Técnica.

Un transductor, en muchos casos, se define como un dispositivo que convierte una clase de energía en otra. Esta definición se muestra un tanto vaga y ambigua en el contexto de los sistemas de instrumentación.

Una acepción más amplia del concepto de transductor podría definirlo como aquel sistema físico capaz de captar una señal físico-química del mundo exterior convirtiéndola en una señal (eléctrica en nuestro caso) procesable por un sistema analógico, digital o híbrido.

De esa forma el transductor sería un sistema que constaría de:

- ✓ Una interfaz de entrada que será el nexo con el entorno del que queremos realizar las medidas.
- ✓ Un elemento captador y cuyo valor físico no suele ser directamente utilizable. Sería el sensor propiamente dicho.
- ✓ Un subsistema de acondicionamiento de señal capaz de proporcionar una señal eléctrica utilizable por el sistema de procesamiento, en términos de magnitud, impedancia, eliminación de señales espúreas, etc. Ahí nos encontraríamos con filtros, amplificadores de instrumentación, rectificadores de precisión, etc.
- ✓ Una interfaz de salida que permita la transmisión y visualización del valor eléctrico ligado a la magnitud leída en la entrada.

2.2.1 Clasificación y características principales de los sensores

La clasificación de los sensores [2] puede realizarse en base a diversos criterios que se pasa a describir brevemente:

- ✓ En base a la magnitud medida o detectada. Así podría hablarse de -entre otros- sensores de temperatura, luminosidad, presencia, contacto, velocidad, aceleración, peso, PH, caudal, presión, etc.
- ✓ En base a su naturaleza. Así podría hablarse de sensores resistivos, inductivos, capacitivos, semiconductores, etc.
- ✓ En base a la señal que generan. Podría distinguirse entre analógicos y digitales.
- ✓ En base a la necesidad de un alimentación externa. Podría distinguirse entre pasivos (por ejemplo un termopar) y activos (por ejemplo una NTC).
- ✓ En base a su modelo de trabajo. Podría así hablarse de sensores reales o físicos y de sensores virtuales.
- ✓ En base a sus valores añadidos. Podría hablarse de sensores convencionales y sensores inteligentes, siendo estos últimos aquellos que incorporan alguna capacidad de procesamiento o control (llevando asociado, generalmente un microcontrolador) o que bien poseen alguna clase de interface con elementos de procesamiento de información.

En lo que respecta a sus características [2,3] podría señalarse:

- ✓ Rango y fondo de escala. Diferencia entre los valores mínimo y máximo a medir.
- ✓ Características eléctricas.
  - Tipo de magnitud de salida (corriente, tensión, etc).
  - Valores de alimentación del sensor.
  - Impedancias de entrada y salida.
  - Etc.

## Capítulo 2. Estado de la Técnica.

- ✓ Características mecánicas.
  - Peso.
  - Configuración e identificación normalizados.
- ✓ Características estáticas.
  - Sensibilidad.
  - Offset.
  - Repetibilidad.
  - Resolución.
  - Valores umbrales.
  - Linealidad.
  - Histéresis.
- ✓ Características dinámicas.
  - Respuesta ante una entrada escalón.
  - Respuesta en frecuencia.

En la actualidad existen en el mercado una más que ingente cantidad de sensores, de diversa naturaleza y características, con una inmensa gama de precios, prestaciones y potenciales posibilidades. Cualquier conocedor del tema de la automatización e instrumentación industrial, es consciente de ello.

### 2.2.2 Sensores virtuales

Exceptuando los nanosensores [4] que parecen estar llamados a encabezar la siguiente revolución científico-social, los llamados sensores virtuales podrían ser el aspecto más vanguardista en innovación en el campo de la instrumentación industrial.

Puede darse el caso en que una medida se haga poco viable en base a tres parámetros fundamentales:

- ✓ Restricciones de tipo técnico. No existen sensores disponibles para la magnitud a medir.

## Tesis doctoral UDC /2017

- ✓ Restricciones de tipo económico. Existe el sensor pero tiene un coste inaceptable.
- ✓ Restricciones de tipo operativo. La medida de la variable se hace compleja o penosa, en la planta a controlar.

El sensor virtual será aquel mecanismo o técnica que permitirá la obtención indirecta de un valor de medida en base a otras magnitudes que si han sido medidos físicamente. De esta forma podríamos diferenciar entre variables primarias (serían las medidas por los sensores físicos) y variables derivadas que serían aquellas determinadas a través de las primarias, en base a un modelo matemático programado en un sistema digital (microprocesador, microcontrolador, etc).

El método de estimación que va a determinar el valor de la variable derivada puede seguir diferentes técnicas en base a la complejidad de la misma y puede ir desde aquellos más simples basados en una ecuación diferencial lineal hasta otros más avanzados y que podrían ser métodos estadísticos, observador de estados, técnicas de inteligencia artificial, etc.

Así, conceptualmente, el sensor virtual podría describirse como un algoritmo o conjunto de algoritmos, capaz de obtener el valor de una variable de un proceso (variable derivada) a través de la lectura física de dos o más variables (variables directas), en base a un modelo matemático predefinido.

Desde un punto de vista teórico, el sensor virtual se basa en los llamados observadores de estado cuyo corpus se encuentra plenamente descrito en la bibliografía básica de los sistemas de control [5]; la aplicación de los observadores de estado se implementa en un lenguaje informático de uso común.

De esa forma y llegando a un nivel de refinamiento conceptual básico, podría esbozarse el siguiente modelo del sensor virtual que se muestra en la figura 1.

## Capítulo 2. Estado de la Técnica.

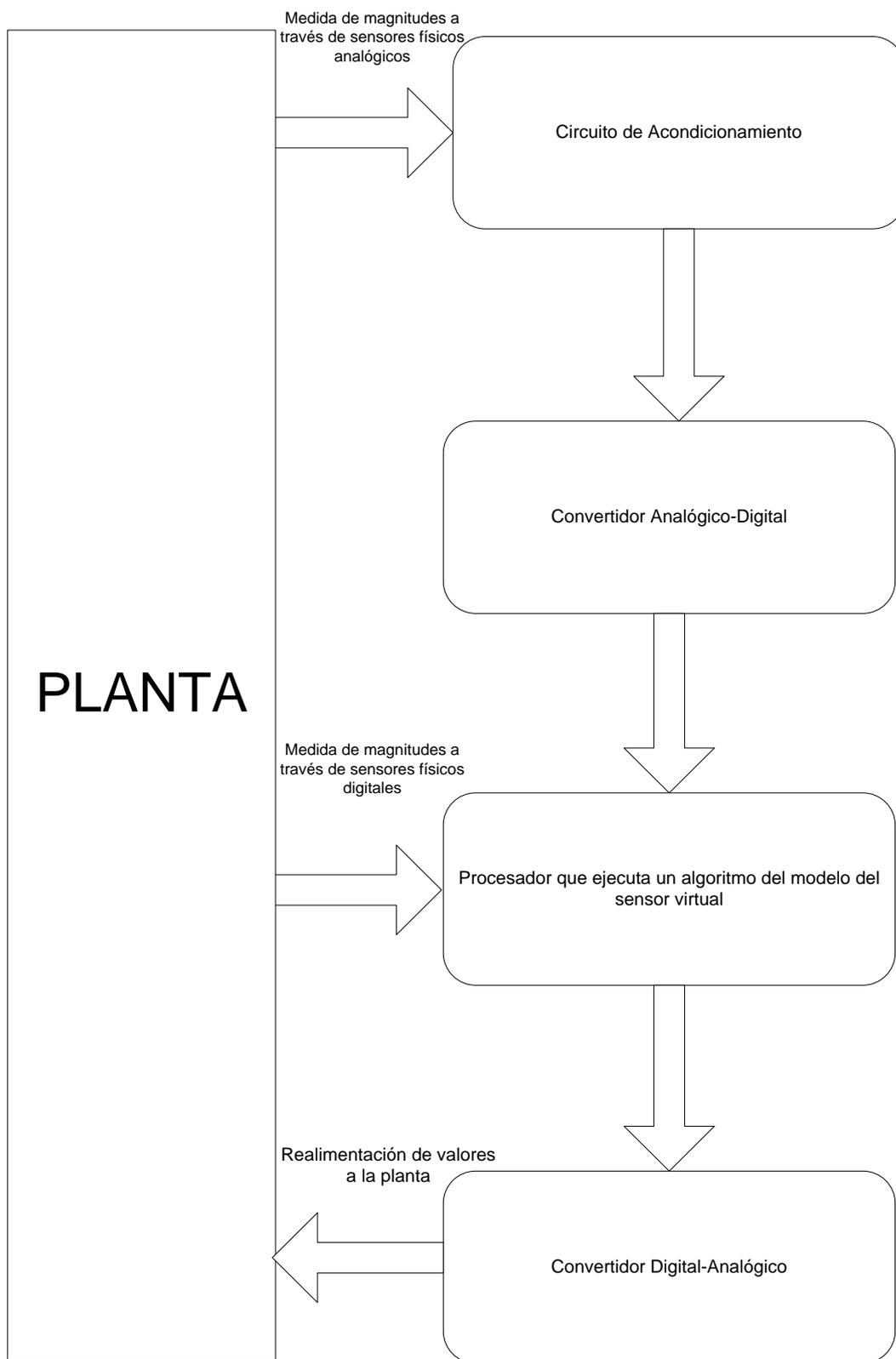


Figura 1. Diagrama de bloques de un sensor virtual

Donde se dice planta, podría hablarse asimismo de una red industrial por la que circularía la información leída, previamente modulada y que se encaminaría en base a un medio físico, protocolo, etc a posibles receptores de diversa índole (controladores, PID's, ordenadores, autómatas programables, etc).

### **2.3 Transmisores industriales**

Un transmisor industrial podría definirse como un sistema capaz de medir una variable de un proceso a través de un elemento primario o sensor y transmitirla a distancia en forma de señal neumática, electrónica o digital<sup>1</sup> [6]. Como señal electrónica se estandariza la salida de 4 a 20 mA de corriente continua (desde ahora, cc) y como salida digital, el conjunto discreto de dígitos binarios {0 1} ligados a una codificación determinada y a unos niveles eléctricos adecuados con la familia lógica correspondiente.

Por ello, podría decirse que su cometido es el de realizar una medida en un punto (en muchos casos remoto) y la transmisión a uno o más receptores, que de forma casi segura se encuentran conectados en el ámbito de una red industrial.

Las ventajas de los transmisores industriales son múltiples y son imprescindibles en los sistemas de control y monitorización actuales.

---

1 Sólo se considerarán en este trabajo, los transmisores de naturaleza electrónica.

## Capítulo 2. Estado de la Técnica.

### 2.3.1 Tipos de transmisores electrónicos industriales

El transmisor electrónico consta internamente de detectores inductivos, transformadores diferenciales o (en muchos casos) son de naturaleza capacitiva o basados en montajes en puente de Wheatstone.

Los dos primeros se basan en un sistema de equilibrio de fuerzas con una barra rígida en la que actúan dos fuerzas en equilibrio. Los segundos están ligados a los transmisores digitales de los que los transmisores inteligentes serán un caso particular.

El transmisor clásico basado en puente de Wheatstone se sustenta en cuatro resistencias enfrentadas, de las cuales alguna (o varias) de ellas puede ver modificado su valor óhmico cuando un determinado fenómeno físico (presión, temperatura, etc) incide sobre las mismas, lo que dará lugar a una tensión diferencial.

Obviamente, si el puente está en equilibrio la tensión será cero, tomando otro valor cuando el puente se desequilibra. La citada tensión en base a un circuito de conversión V-I se convertirá en una corriente de salida del rango 4..20mA.

El transmisor digital será aquel capaz de hacer un procesamiento no analógico de las magnitudes que capta a través del elemento primario. Ello permitirá implementar de forma adecuada y eficiente, funciones tales como:

- ✓ Autocalibración.
- ✓ Autorrango.
- ✓ Autoajuste.
- ✓ Reducción de costes y mantenimiento en el transmisor.
- ✓ Comunicación con diferentes dispositivos de procesamiento de información.
- ✓ Capacidad de almacenamiento en memorias secundarias.
- ✓ Operación remota.

- ✓ Autodiagnóstico.
- ✓ Implementación de cálculos y operaciones (por ejemplo generar un sensor virtual).
- ✓ Implementación de comunicaciones digitales.

Todas estas ventajas indudables frente a un transmisor analógico se sustentan en el uso de sistemas digitales programados. Es decir: la columna vertebral de un transmisor digital será un microprocesador ( $\mu P$ ), un microcontrolador ( $\mu C$ ) o un procesador digital de señal (DSP). Todos ellos son sistemas programables de cálculo y procesamiento con unas peculiaridades que se indicarán en temas posteriores cuando se esboce y desarrolle el modelo del transmisor objeto de la tesis.

Aparte del sistema de procesamiento de información pueden ser necesarios unos elementos añadidos que serían asimismo sistemas digitales complejos, tales como: memorias, FPGA'S, PAL's, potenciómetros digitales, etc. Estaría hablándose de circuitos integrados de propósitos particulares (en muchos casos programados por el ingeniero) y se referenciarán en temas posteriores, al igual que los sistemas de cálculo.

Volviendo a [6], se indicaba que los únicos inconvenientes del transmisor digital radicaban en: a) La no normalización de la comunicación digital y b) La defectuosa respuesta en frecuencia del sistema. Es obvio que lo indicado en la magnífica obra del Dr. Creus Sole se ha resuelto con la estandarización de los protocolos y normas de comunicación industrial, unida a la aparición de procesadores cada vez más rápidos.

### 2.3.2 El Transmisor Universal Inteligente

El término *inteligente* en cualquier aspecto tecnológico, debe ser tomado con suma cautela. Incluso en un campo tan puntero como el de la llamada Inteligencia Artificial, con un corpus riguroso y bien definido, los investigadores suelen ser muy

## Capítulo 2. Estado de la Técnica.

estrictos al definir lo que se considera inteligente y lo que no.

En la concepción clásica del tema, el término inteligente marcaba la diferencia entre los transmisores analógicos y los digitales, en tanto que la CPU correspondiente podría realizar tareas no disponibles en los analógicos, como autorango, autocalibración, etc. Así, podía establecerse una sinonimia entre digital e inteligente, lo cual no parece acertado con una concepción actual de los sistemas de procesamiento de información, en los que la inteligencia se asociaría con capacidades de índole cognitiva que pretenderían emular (hasta cierto punto) las del ser humano: reconocimiento de patrones, razonamiento simbólico, trabajo con bases de conocimiento y experiencia, etc.

El concepto de inteligencia en el transmisor objeto de la tesis iría ligado a una capacidad de adaptarse dinámicamente para la captación (directa o virtual), calibrado, configuración, acondicionamiento, procesamiento y transmisión de magnitudes a través de distintos tipos de sensores cuyas características pueden diferir tanto en el tipo de magnitud medida como en la interface de salida que presentan las medidas. Esto último se liga también al concepto de universalidad y multivariabilidad. La figura 2 muestra el diagrama de un transmisor universal inteligente.

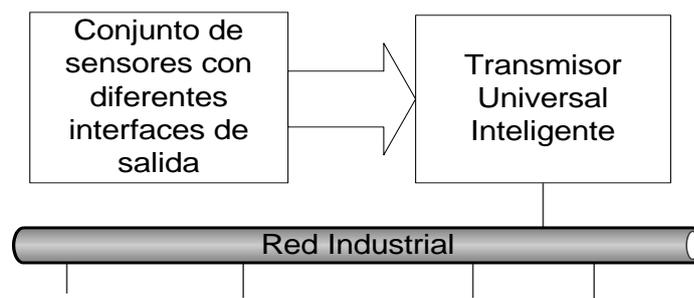


Figura2. Transmisor Universal Inteligente

2.3.2.1 Transmisores Comerciales

Los transmisores comerciales clásicos estaban ligados a redes con topología centralizada punto a punto. Los transmisores inteligentes aprovechando las ventajas de la tecnología digital permiten funciones adicionales a las de los clásicos, haciendo especial hincapié en lo que a las comunicaciones con buses de campo se refiere [6].

Es obvio que existen transmisores inteligentes comerciales. De hecho los primeros modelos aparecen a mediados de la década de los ochenta del pasado siglo y solían ser de tipo multivariable permitiendo la lectura simultánea de varias variables de un proceso, a partir de uno o dos sensores primarios y utilizando modelos matemáticos.

Como ejemplos podría mencionarse: Honeywell SMV3000, ABB 267CS o Yokogawa EJX910A.

**2.4 Comunicaciones**

La realidad de los sistemas de control exige que los procesos puedan gobernarse de forma remota ya sea centralizada, distribuida o rígida, lo que implica que las medidas pueden efectuarse a una distancia física media o grande, con respecto al punto de control. Por otra parte los entornos de fabricación automatizada y los sistemas de supervisión por computador (SCADA) [7,8] implican el uso de redes de comunicaciones por las que circulan múltiples tipos de datos (medidas, información de control, etc) y a las que se conectan diferentes equipos (ordenadores, transmisores, PLC's, reguladores, impresoras, etc) a través de un medio físico (o varios) concreto, sobre un protocolo dado y con el apoyo de diferentes elementos tales como routers, gateways [9], etc. De esa manera podría entenderse que la red es el medio de interconexión entre los instrumentos y los elementos de supervisión, control y gestión de procesos.

## Capítulo 2. Estado de la Técnica.

Los modelos de comunicación podrían clasificarse en:

- Analógicos: El estándar por excelencia sería el clásico de 4-20 mA de corriente continua (desde ahora, c.c). En este modelo [10] se utiliza un lazo de corriente y 4 mA representa el nivel más bajo del rango y 20 mA el más alto. La información es transmitida en un par de hilos. Las impedancias de carga tienen un rango entre 0 y 600 ohmios y la tensión de salida entre 1 y 5 V sobre una carga no superior a 250 ohmios. Suelen tener naturaleza punto a punto. Este estándar todavía tiene cabida en instalaciones industriales debido a:
  - ✓ La transmisión de datos es efectiva a pesar de fluctuaciones en la impedancia de la línea (dentro de unos márgenes).
  - ✓ Independencia de las caídas de tensión en el cableado.
  - ✓ El propio circuito puede alimentar al dispositivo.
  - ✓ Facilidad en el mantenimiento y búsqueda de fallos (un mero polímetro podría bastar).
  
- Digitales: Los datos se representan en formato binario y se aprovecha la potencialidad de los sistemas microprocesadores. Los modelos basados en la tecnología digital son los llamados buses de campo y permiten una integración máxima entre la instrumentación y el sistema de control, supervisión y gestión de procesos. Los instrumentos aportan un determinado nivel de "inteligencia" y ello permite implementar funciones de autodiagnóstico, mantenimiento, comunicaciones, etc [11].

## Tesis doctoral UDC /2017

Las comunicaciones son serie, multipunto, bidireccionales, con un tiempo de respuesta óptimo<sup>2</sup> y con todas las capacidades y potencialidades de las redes informáticas clásicas, pero adaptadas a los entornos industriales.

Dentro de los modelos digitales podríamos diferenciar entre:

- ✓ Sistemas propietarios: Son aquellos ligados a una marca o firma comercial y por lo tanto, cerrados.
- ✓ Sistemas abiertos: Son aquellos en los que participan consorcios de fabricantes, grupos de usuarios y organismos de normalización creando sistemas que pueden trabajar de forma independiente e interoperable.

En la génesis de un sistema abierto intervienen:

- La creación de protocolos ad hoc. Por ejemplo CAN, ISP, Fitbus, etc.
  - La creación de modelos de buses de campo tales como : PROFIBUS, FOUNDATION FIELDBUS, DeviceNET, etc y su vinculación a los modelos de red (OSI).
  - La creación de dispositivos e instrumentos "inteligentes" sujetos al estándar del bus de campo.
  - Normalización y estandarización de todo el proceso por los organismos correspondientes (IEC-ISA).
- Modelos Híbridos: Son modelos mixtos analógico-digitales. El protocolo HART, inicialmente establecido por Rosemount Inc. Y posteriormente adoptado por muchos fabricantes, es el mayor exponente.

---

<sup>2</sup> El término Tiempo Real se utilizará siempre de forma muy cauta, lo mismo que el concepto de inteligencia.

## Capítulo 2. Estado de la Técnica.

Podría pensarse que los modelos ideales serían los abiertos, por aquello de la independencia con fabricantes y normas privadas, y de naturaleza digital (los buses de campo) por el beneficio que estos sistemas aportan (velocidad y seguridad en la comunicación, facilidad de configuración y mantenimiento, opciones de diagnóstico, interacción con sistemas de procesamiento y almacenamiento de información, posibilidad de control distribuido, escalabilidad, etc).

Efectivamente son sistemas ventajosos y su implantación en la industria es un hecho. No obstante, pueden encontrarse aún redes analógicas y en muchos casos, en la misma planta darse una coexistencia de los dos modelos, por cuestiones económicas, de complejidad técnica, etc.

La figura 3 describe el modelo de una red basada en un bus de campo. Podemos ver como a la red (en bus) se conectan dispositivos de diferente naturaleza (transmisores, PLC's, ordenadores, etc) con la posibilidad añadida de conectarse via router, gateway, etc (en base a los modelos de red definidos) a otras redes, no necesariamente industriales (una LAN convencional, por ejemplo; una intranet corporativa, etc).

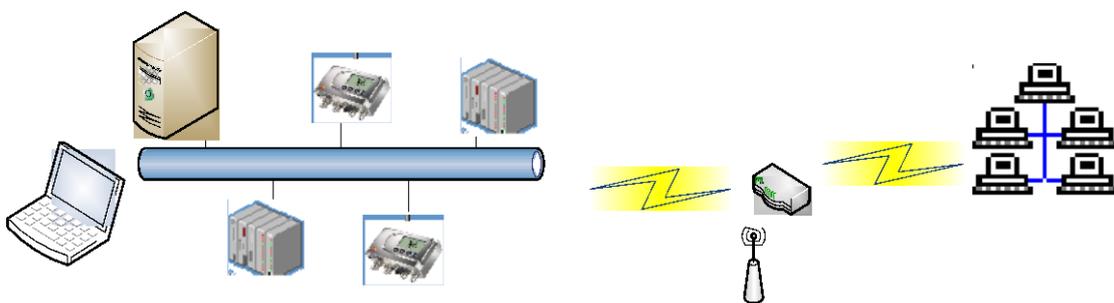


Figura 3. Modelo de una red en bus de campo

La figura 4, por otra parte, nos mostraría una conexión punto a punto entre el transmisor y un dispositivo de control (por ejemplo un PLC). La conectividad es muy limitada y pasaría por la posibilidad de trabajar dentro de una red de PLC's que no tendría las prestaciones de los buses de campo.

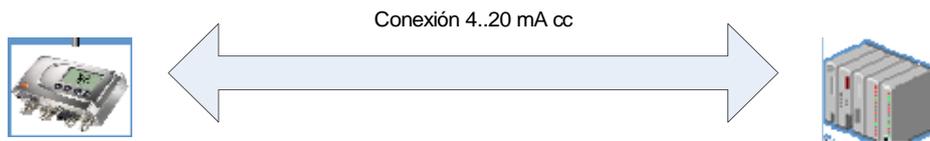


Figura 4. Conexión punto a punto entre transmisor y controlador

Capítulo 3  
Análisis de Requisitos para el Transmisor  
Universal Inteligente

*Una idea es la salvación por medio de la imaginación. (Frank Lloyd Wright)*

### **3.1 Introducción**

En este capítulo se describen los requisitos que debe cumplir el Transmisor Universal. Para ello, se parte de una idea general y conforme a esto, puede decirse que el desarrollo de un producto o de un servicio parte de tres premisas básicas: la primera, determinar la necesidad del mismo; la segunda, establecer los requisitos que debería cumplir y las necesidades a satisfacer, y la tercera, realizar un análisis sobre otros similares que puedan encontrarse en el mercado, o bien en fases avanzadas de desarrollo.

Obviamente una investigación en el campo de la ingeniería traerá en muchos casos la creación de un producto final y tangible (matizando en este término la tangibilidad que puede tener un software, una metodología o un modelo matemático, por citar tres casos tipo). Un producto final y tangible, obviamente, será aquel que resuelva unas necesidades concretas.

El control de plantas y procesos, conlleva la necesidad de realizar medidas, las cuales, en muchos casos, se realizan de manera remota.

Los devenires de la industria actual en el contexto en que se desarrolla, exigen criterios de eficiencia, eficacia, flexibilidad, versatilidad y escalabilidad. Tanto en términos técnicos como económicos, la rigidez y la estaticidad son el camino que lleva al fracaso industrial.

### **3.2 Necesidad de un transmisor industrial**

Por todo lo hablado en el capítulo anterior, la necesidad de los transmisores es algo más que evidente y el reto radica en desarrollar aquellos que cumplan los criterios arriba mencionados y que puedan aportar una singularidad con respecto a lo ya existente.

### 3.3 Requisitos del Transmisor Universal e Inteligente

Se plantea como meta conseguir un transmisor que tenga la posibilidad de gestionar entradas de diferentes sensores y con diferentes tipos de interfaces de entrada/salida, que no obliguen a utilizar varios transmisores sobre la red, por lo que ello implica en costes, mantenimiento, conectividad, etc. Esta flexibilidad conlleva la necesidad de un acondicionamiento dinámico de la señal (como se indicará más tarde).

Por lo tanto, los requisitos que se establecen podrían resumirse en:

- ✓ Captura inteligente de la información proporcionado por sensores de diferente naturaleza en lo que se refiere a la magnitud física medida y en la interface de salida correspondiente (4..20 mA c.c, mV,  $\mu$ V, resistivo).
- ✓ Medidas locales y/o remotas tanto físicas como virtuales. Ellas se emplearán en tareas de control, diagnóstico, supervisión, etc.
- ✓ Configuración local o remota del transmisor ante especificaciones de: tipo de sensor, rango de medida, configuración del circuito de acondicionamiento, estrategias de medidas directas o virtuales, etc.
- ✓ Calibración local o remota del transmisor.
- ✓ Trabajo en red (a nivel de control) bajo Ethernet/IP e interoperatividad con redes a nivel de dispositivo con el estándar DeviceNet.

### 3.4 Otros transmisores inteligentes comerciales

En los tres pasos antes señalados, se citaba la necesidad de determinar qué productos existen ya en el mercado de características similares (o superiores) a la del que se pretende implementar.

Debe indicarse que se ha realizado un análisis bastante exhaustivo de los transmisores inteligentes multivariable que se podían conseguir comercialmente de firmas del sector. El resultado ha sido que ninguno parecía proporcionar todas las prestaciones buscadas<sup>1</sup>.

Si se obvian los transmisores no inteligentes, podrían destacarse los siguientes modelos comerciales, que no llegan a cumplir con todos los requisitos establecidos, aun siendo ofertados por fabricantes de indiscutible solvencia mundial:

- ✓ Honeywell ST 3000. Aporta varias características de un transmisor inteligente [12] tales como: diferentes protocolos de salida (4..20 mA c.c, HART y Fieldbus), herramientas de diagnóstico avanzado o ajuste remoto. Por otra parte, sólo permiten realizar medidas de presión. Con lo cual se hablaría de un transmisor monovariable.
- ✓ Yokokawa EJX910a. Es un transmisor inteligente multisensor/multivariable [13]. Aporta las ventajas inherentes a un transmisor digital clásico, pero es limitado en lo referente al tipo de sensores de entrada (presión y temperatura).
- ✓ Rosemount 3095. Similar al anterior [14], pero con las limitaciones en el tipo de magnitud medible (presión y temperatura) así como en el formato de salida (MODBUS).
- ✓ ABB 267CS. Similar al anterior pero más versátil en lo que al tipo de salida se refiere, soportando Fieldbus [15].

Por lo tanto, el transmisor objeto del trabajo y cuyas características ya han sido glosadas anteriormente, deberá encajar en un nicho de mercado ya existente, pero aportando unas características personales en lo que a flexibilidad, universalidad y heterogeneidad operativa se refiere.

---

<sup>1</sup> De hecho, la originalidad del sistema desarrollado ha dado lugar a la patente con número de solicitud 201300292 publicada el 01-10-2014 por la Oficina Española de Patentes y Marcas.

## Capítulo 4

Arquitectura del Transmisor Universal  
Inteligente: Nivel Hardware

*El diseño no es qué aspecto tiene. Es cómo funciona. (Steve Jobs).*

## **4.1 Introducción**

En este capítulo se describe el Transmisor Universal Inteligente a nivel hardware, haciendo hincapié en cada una de sus unidades funcionales y en la descripción de los elementos electrónicos (componentes, circuito integrados y subsistemas) empleados.

## **4.2 Unidades funcionales del Transmisor Universal Inteligente**

Una vez determinados los requisitos del transmisor universal inteligente es preciso establecer las unidades funcionales que lo conformarán. Es obvio que su anatomía será similar en muchos aspectos a la de cualquier transmisor inteligente tipo, siendo la implementación de detalles puntuales pero críticos, la que marcará la diferencia.

Se busca, como se ha indicado varias veces, un transmisor inteligente universal (UST, de *Universal Smart Transmitter*). El UST permitirá implementar de un modo eficiente las funciones de adquisición, configuración, acondicionamiento, procesamiento y comunicación asociadas a las medidas directas o virtuales de la información proporcionada por sensores de características heterogéneas tanto en lo que se refiere a la magnitud física medida como a la interface de salida.

Esta necesidad de adquirir señales procedentes de diversos dispositivos requiere circuitos electrónicos de acondicionamiento con capacidad de configuración programable, para obtener medidas de alta resolución.

Tal y como se muestra en el diagrama de bloques de la figura 5, el UST se compone de las siguientes unidades funcionales:

## Capítulo 4. Arquitectura del Transmisor Universal Inteligente : Nivel Hardware.

- ✓ Circuito de Acondicionamiento Programable (PCC, de Programmable Conditionig Circuit). Se encarga de proporcionar la adaptación dinámica del transmisor a los diferentes tipos de sensores.
- ✓ Convertidor Analógico/Digital (ADC, de Analogic Digital Converter). Embebido en el microcontrolador, recibe valores del PCC y los digitaliza para que puedan ser usados por aquel.
- ✓ Convertidor Digital/Analógico (DAC, de Digital Analogic Converter). Permitirá introducir valores analógicos en el sistema (PCC) a partir de magnitudes digitales transmitidas por el microcontrolador .
- ✓ Unidad Microcontroladora (MCU, de MicroController Unit). Realiza un conjunto ingente de tareas del UST. De hecho todas las características del transmisor digital se ven implementadas en lógica programable dentro del micro (multiplexación, interacción con el potenciómetro digital, sensorización virtual, comunicaciones en red, etc).
- ✓ Módulo de Comunicaciones (CM, de Communication Module). Se encargará de gestionar las comunicaciones del transmisor (huelga hablar de su crítica importancia).
- ✓ Un sensor digital de temperatura. Utilizado para compensar la unión fría de los termopares [2] que pudiesen conectarse al UST.
- ✓ Interface de salida 4-20mA c.c. Permite mantener la compatibilidad con el estándar de dos hilos, presente aún en muchas plantas e instalaciones.

El CM y la MCU son externos y vienen suministrados por la firma HMS, mientras que el resto del hardware ha sido diseñado ex-profeso para implementar el transmisor.

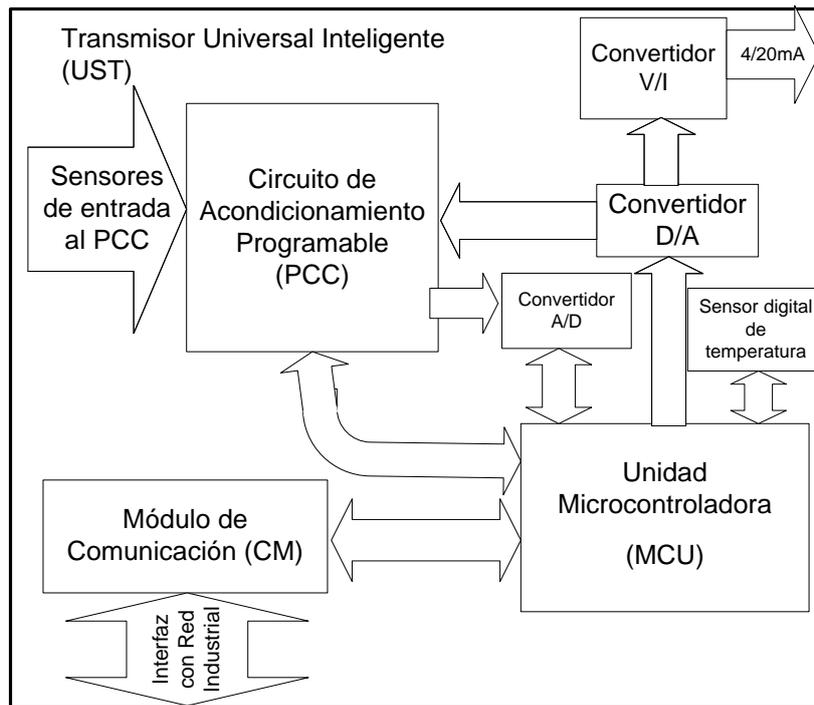


Figura 5. Diagrama de bloques del UST

### **4.3 Descripción detallada del módulo PCC**

La complejidad del UST obligan a describir de modo independiente tres de sus módulos principales: el Circuito de Acondicionamiento Programable (PCC), la unidad microcontroladora (MCU) y el Módulo de comunicaciones (CM). Los dos últimos serán tratados en la siguiente sección.

#### **4.3.1 Módulo PCC**

Es un elemento clave del UST y de hecho, podría considerarse su centro neurálgico, dado que el transmisor adaptará dinámicamente su circuito de acondicionamiento para cada tipo de sensor, en aras de realizar medidas con la resolución adecuada.

## Capítulo 4. Arquitectura del Transmisor Universal Inteligente : Nivel Hardware.

El PCC contiene:

- ✓ Circuitos conversores V/I y  $\Omega$ /V.
- ✓ Un multiplexor analógico.
- ✓ Un amplificador de instrumentación con ganancia programable (PGIA, de Programmable Gain Instrumentation Amplifier).
- ✓ Un filtro activo pasabajo con frecuencia de cruce = 1 KHz.

El diagrama de bloques de la figura 6 describe la interrelación entre los elementos ya citados y es un boceto de la arquitectura del PCC.

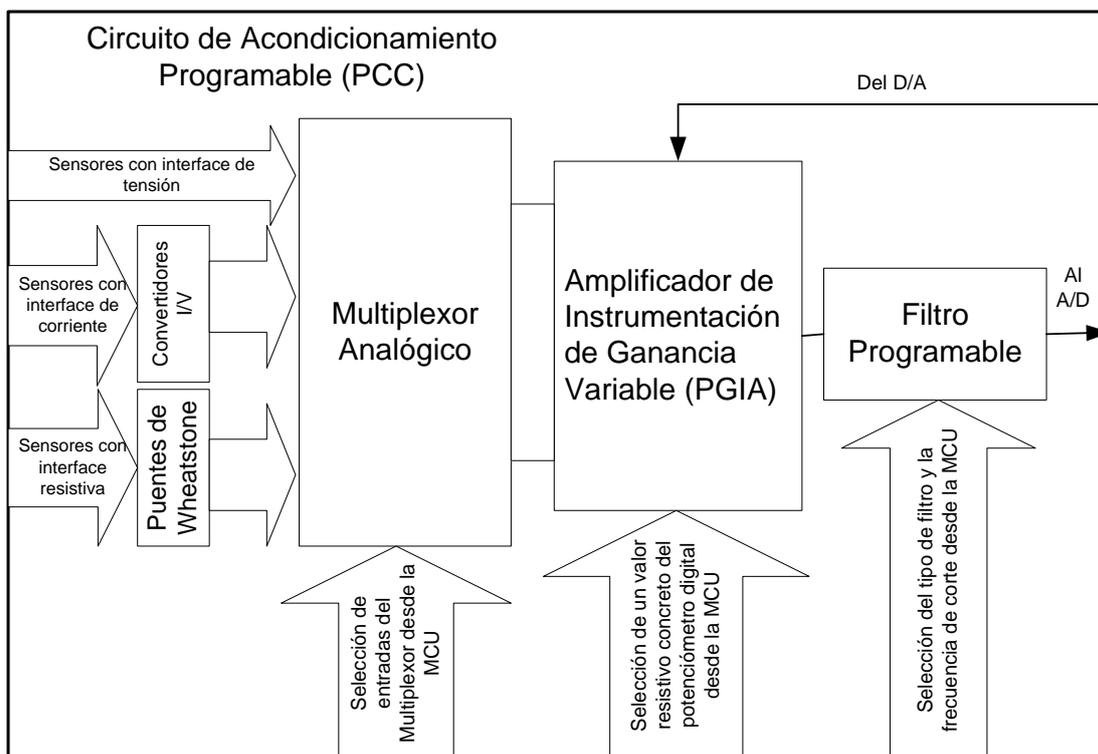


Figura 6. Diagrama de bloques del PCC

Dado que el UST puede trabajar con señales obtenidas de sensores de distinta naturaleza es preciso convertir, en algunos casos, sus interfaces de salida a voltaje. Ese es el caso de sensores resistivos a través de puente de Wheatstone o de sensores 4-20mA a través de conversores corriente-tensión.

En un instante de tiempo sólo se puede tomar una muestra de datos pese a que pueda haber varias señales disponibles en las entradas del transmisor. El multiplexor analógico [16] -de entrada diferencial y de entrada single-ended (referida a masa)-, bajo el control de la MCU, transfiere la entrada correspondiente al amplificador de instrumentación [17,18] mediante las señales de selección. El multiplexor tiene que ser capaz de manejar señales diferenciales para evitar el error de medida inherente a la conexión de un sensor con salida diferencial conectado a un convertidor con entrada single-ended (precisaría dos medidas).

#### 4.3.1.1. Amplificador de Instrumentación de Ganancia Variable (PGIA)

El PGIA se basa en el clásico amplificador de instrumentación de 3 operacionales<sup>1</sup>, mostrado en la figura 7. En el citado modelo, dos amplificadores operacionales adoptan la configuración de seguidor de tensión y el tercero es un amplificador diferencial. Sobre el amplificador de instrumentación es sabido, que proporciona una serie de características imprescindibles para todo sistema de captura de datos, siendo la columna vertebral de los llamados circuitos acondicionadores de señal [2,17,18,19] y cuyas características generales se describen en la tabla 1.

---

1 Es sabido que existen amplificadores de instrumentación integrados como AD524 de Analog Devices o el PGA204/205 de Burr-Brown, siendo este último un amplificador programable, si bien con un rango de ganancias limitado. Hay asimismo diversas modificaciones al respecto[14]

Capítulo 4. Arquitectura del Transmisor Universal Inteligente : Nivel Hardware.

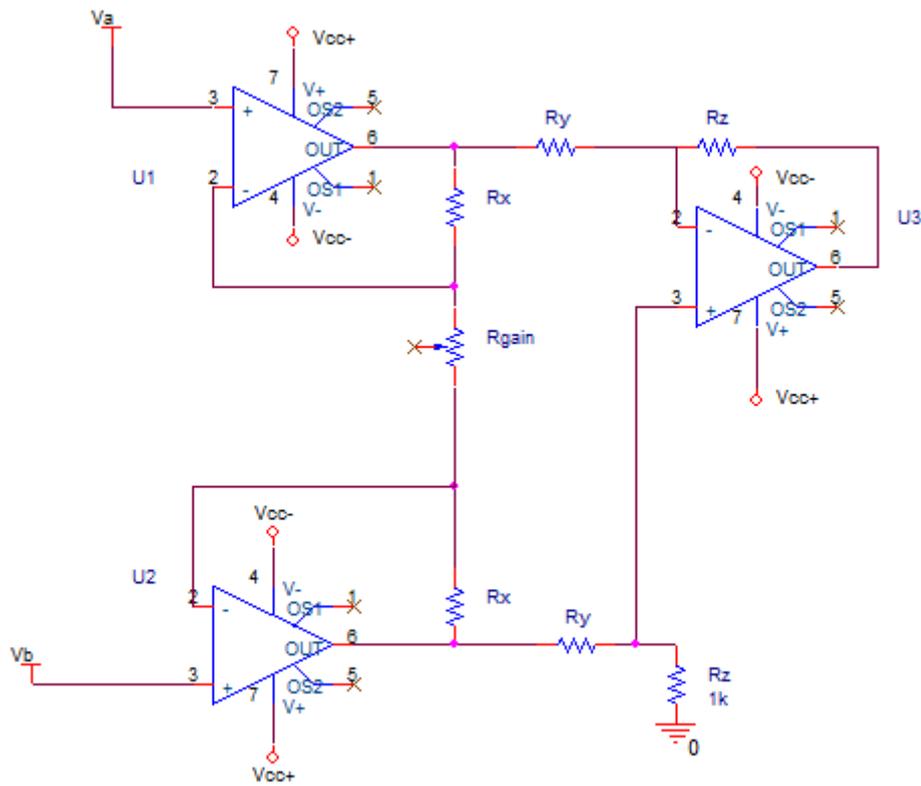


Figura 7. Amplificador de Instrumentación

Tensión de salida	$V_o = G(V_2 - V_1)$ $G$ es la ganancia
Impedancia de entrada	Extremadamente elevada (idealmente infinita)
Impedancia de salida	Extremadamente baja (idealmente cero)
Relación de Rechazo en Modo Común (CMRR)	Extremadamente elevada (idealmente infinita). Así no influirá la entrada en modo común
Valores de offset	Muy bajos
Estabilidad térmica	Muy elevada
Ganancia	Muy elevada y fácilmente ajustable

Tabla 1: Características del Amplificador de Instrumentación

La MCU se encargará de la programación dinámica de la ganancia del PGIA. Para ello es imprescindible la integración en el circuito de los llamados potenciómetros digitales.

#### 4.3.1.1.1 Potenciómetro Digital

Un potenciómetro convencional es un tipo de resistencia variable cuyo valor óhmico es modificado por el usuario dentro de un mínimo y un máximo prefijados. El potenciómetro clásico es un dispositivo de tres terminales de los cuales dos son fijos ( H y L) y otro variable (W), tal y como se muestra en la figura 8.



Figura 8. Potenciómetro convencional

Entre H y L la resistencia es constante y es igual al valor nominal del potenciómetro ( $R_{HL}$ ). Entre H y W hay un valor óhmico  $R_{HW}$  y entre W y L hay un valor óhmico  $R_{LW}$ . De esa forma  $R_{HL} = R_{HW} + R_{LW}$ .

El potenciómetro puede verse como un divisor de tensión, es decir: que presenta una configuración paralela [20].

El potenciómetro digital presenta unas características conceptuales similares a las del convencional, pero su modelo es mucho más complejo. En primer lugar hablamos de un dispositivo electrónico digital de estado sólido compuesto por  $2^n$  secciones resistivas, donde n es el número de bits del mismo.

Entre cada sección resistiva y los extremos del potenciómetro (que llamaremos H y L) hay unos puntos accesibles al cursor (que llamaremos W). La posición del cursor se ajusta a través de un valor digital llamado  $D_v$ . Dicho valor se envía a través de la

## Capítulo 4. Arquitectura del Transmisor Universal Inteligente : Nivel Hardware.

MCU por el interface serie correspondiente sea de tres hilos (como en el caso que se trata aquí) o bien SPI, por ejemplo.

Uno de los circuitos comerciales más conocido en el mercado es el DS1868 [21,22] cuyo diagrama de bloques puede verse en la figura 9, que consta de dos potenciómetros con sendas secciones resistivas de 256 posiciones (es de 8 bits), con la ventaja añadida de permitir la conexión de los dos potenciómetros en serie con la misma resolución. Se ofertan con tres valores nominales máximos (10 K $\Omega$ , 50 K $\Omega$  ó 100 K $\Omega$ ) y con tres encapsulados diferentes (20 pin TSSOP, 16 pin SOIC y 14 pin DIP).

Permite el dos modos de conexión diferenciados: cascada y daisy chained, en caso de que haya varios dispositivos conectados a un solo procesador.

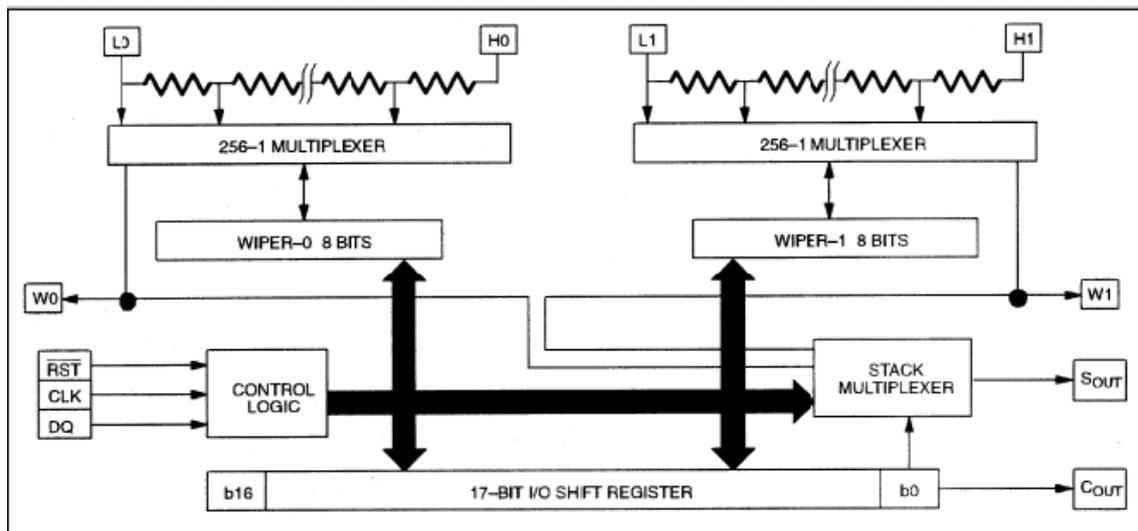


Figura 9. Diagrama de bloques del DS 1868 (Fuente Microchip)

4.3.1.1.2 Implementación del PGIA con el Potenciómetro Digital

La implementación del PGIA parte del modelo ya mencionado del amplificador de instrumentación de tres amplificadores operacionales. El esquema se ha modificado añadiendo un cuarto operacional que dará la salida del PGIA en una configuración no inversora.

Si se usan tres potenciómetros digitales referenciados como PD1\_1, PD1\_0 y PD2, y siendo V2 y V1 las entradas al amplificador de instrumentación, tomadas del multiplexor analógico, se tiene el esquema de la figura 10.

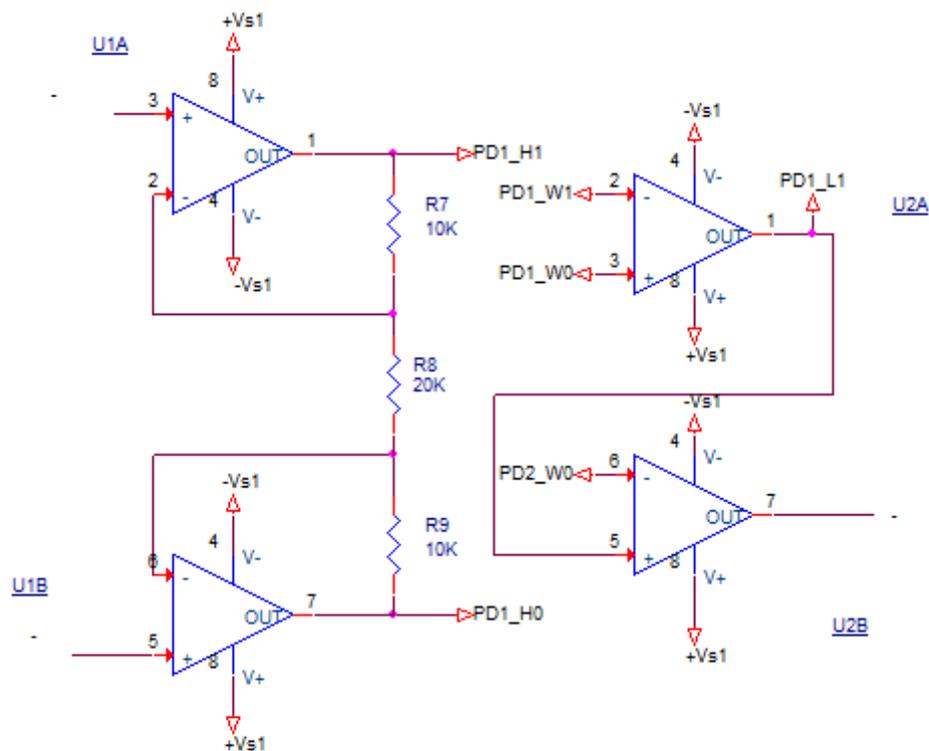


Figura 10: Amplificador programable

## Capítulo 4. Arquitectura del Transmisor Universal Inteligente : Nivel Hardware.

Así, se tendría que:

Va (PD1\_H1) la salida del amplificador operacional U1A.

Vb (PD1\_H0) la salida del amplificador operacional U1B.

V2 la tensión de entrada de U1B (procede del mux analógico).

V1 la tensión de entrada de U1A (procede del mux analógico).

Los terminales W de los potenciómetros PD1\_1, PD1\_0 y PD2 se conectan a las entradas inversora y no inversora de U2A e inversora de U2B, respectivamente. El motivo es compensar la impedancia de 100  $\Omega$  que presenta el cursor W.

Aplicando el principio de masa virtual y teniendo en cuenta que U1A y U1B son seguidores de tensión [19] se tiene la ecuación 1 que relaciona las intensidades en la realimentación de los seguidores de tensión del amplificador de instrumentación y sus tensiones de entrada respectivas.

$$\frac{V_a - V_1}{10\text{ K}\Omega} = \frac{V_1 - V_2}{20\text{ K}\Omega} = \frac{V_2 - V_b}{10\text{ K}\Omega}$$

Ecuación 1. Intensidades en los seguidores de tensión

Despejando se tiene que:

$$V_a = \frac{3V_1 - V_2}{2}; V_b = \frac{3V_2 - V_1}{2}$$

Dado que U2A es un amplificador diferencial, se tiene el llamado factor de proporcionalidad entre las resistencias que se denominará  $\alpha$ , y que queda expresado en la ecuación 2:

$$\frac{RPD1_{L1W1}}{RPD1_{H1W1}} = \frac{RPD1_{LOW0}}{RPD1_{HOW0}} = \alpha$$

Ecuación 2. Factor de proporcionalidad

## Tesis doctoral UDC /2017

Por otra parte, el terminal Lo del potenciómetro PD1\_0 está conectado a la salida del convertidor D/A ya mencionado, lo cual permitirá (si se desea) introducir un offset de tensión distinto de cero.

El operacional U2B es un amplificador no inversor cuya tensión de salida será la del PGIA. Su función de transferencia vendrá definida por la ecuación 3.

$$V_o = V_o(U2B) = \left(1 + \frac{RPD2LOW0}{RPD2W0H0}\right) \times V_o(U2A)$$

Ecuación 3. Función de transferencia del amplificador U2B

(La patilla H del potenciómetro 2 está conectada a masa).

Aplicando el teorema de superposición [20], se obtiene la función de transferencia del amplificador U2A, que viene expresado por la ecuación 4, donde VD/A es la tensión de salida del convertidor digital/analógico.

$$V_o(U2A) = \left(\frac{RPD1LIW1}{RPD1LIH1}\right) \times V_a + \left(1 + \frac{RPD1LIW1}{RPD1LIH1}\right) \times \left(\frac{RPD1LOW0}{RPD1LOW0 + RPD1LOH0}\right) \times V_b + \left(1 + \frac{RPD1LIW1}{RPD1LIH1}\right) \times \left(\frac{RPD1HOW0}{RPD1LOW0 + RPD1LOH0}\right) \times V_{D/A}$$

Ecuación 4. Función de transferencia del amplificador A

Finalmente, sustituyendo y resolviendo se obtiene la función de transferencia del amplificador programable, expresada en la ecuación 5.

$$V_o(PGIA) = \left(1 + \frac{RPD2LOW0}{RPD2W0H0}\right) \times \left[ V_{D/A} + 2 \times (V_2 - V_1) \times \left(\frac{RPD1LIW1}{RPD1LIH1}\right) \right]$$

Ecuación 5. Función de transferencia del amplificador programable

## Capítulo 4. Arquitectura del Transmisor Universal Inteligente : Nivel Hardware.

De ahí podríamos desglosar las expresiones de ganancia y offset, que se definen mediante las ecuaciones 6 y 7, respectivamente.

$$Ganancia = 2_x \left( 1 + \frac{RPD2_{LOW0}}{RPD2_{W0H0}} \right)_x \left( \frac{RPD1_{L1W1}}{RPD1_{L1H1}} \right)$$

Ecuación 6. Ganancia del amplificador programable

$$Offset = \left( 1 + \frac{RPD2_{LOW0}}{RPD2_{W0H0}} \right)_x V_{D/A}$$

Ecuación 7. Offset del amplificador programable

Si se define  $R_{PDx\_LyWy}$  como la resistencia entre el terminal L(PDxLy) del potenciómetro digital Pdx\_y y su cursor (PDxWy), y por otra parte  $R_{PDx\_HyWy}$  es la resistencia entre el terminal H(PDxHy) del potenciómetro digital Pdx\_y y su cursor (PDxWy), puede expresarse según la ecuación 8 la ganancia del amplificador programable, en función de los valores (Dv) que el cursor del potenciómetro digital de n bits puede tomar.

$$\left( \frac{RPD_{xLyWy}}{RPD_{xWyHy}} \right) = \frac{Dv PD_{xy}}{2^n - Dv PD_{xy}}$$

Ecuación 8. Ganancia del PGIA en función del valor digital

La figura 11, muestra de manera más detallada la arquitectura del PGIA.

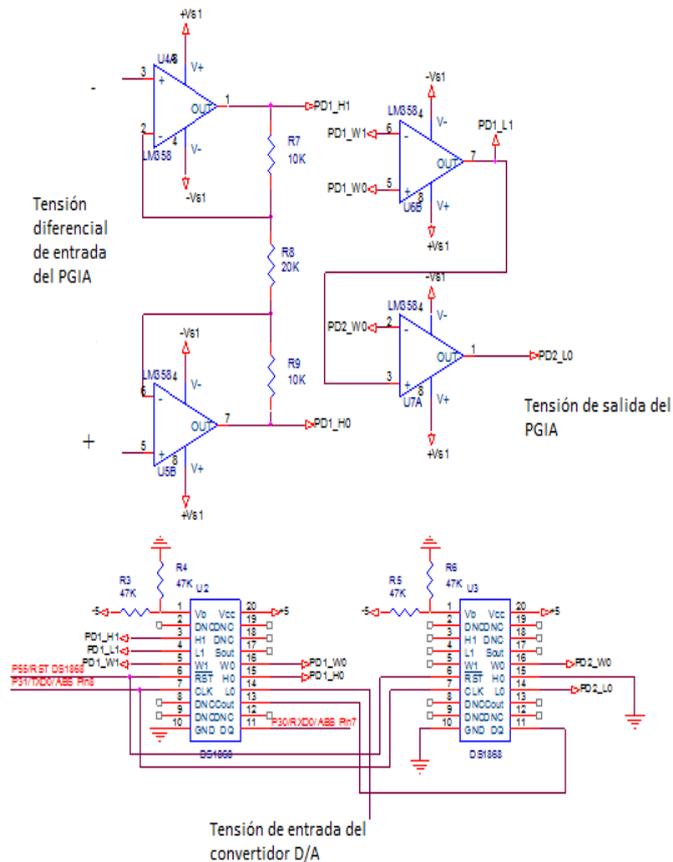


Figura 11. Arquitectura detallada del PGIA

El PGIA permite unos ratios de ganancias muy superiores a los de amplificadores programables comerciales (gracias al amplificador no inversor ya indicado). En la figura 12 puede verse parte del mapa de ganancia del PGIA en función de los cursores Dv1 y Dv2.

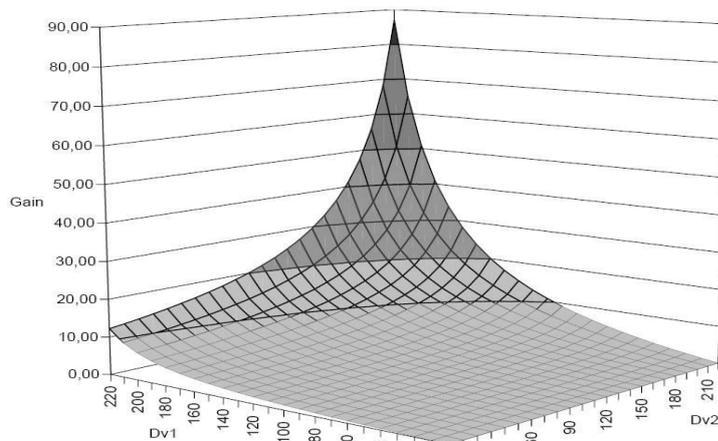


Figura 12. Mapa de Ganancia del PGIA

## Capítulo 4. Arquitectura del Transmisor Universal Inteligente : Nivel Hardware.

La resistencia del cursor (wiper) inherente a todo potenciómetro digital, a causa del multiplexor analógico que incorpora (y que en el caso del DS1868 tiene un valor típico de  $400\Omega$ ), se ve minimizada al conectarse en serie a una carga de alta impedancia (la entrada de uno de los amplificadores operacionales que conforman el PGIA).

### 4.3.1.1.3 Filtro Activo

Es el último bloque antes del convertidor A/D y permite eliminar posible ruido eléctrico no deseado. Su topología se muestra en la figura 13.

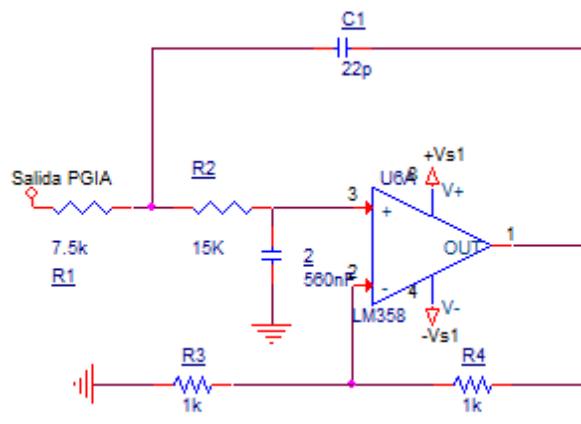


Figura 13. Filtro Activo

Es un filtro activo pasobajo Butterworth de segundo orden en configuración Sallen-Key [18,19]. Da una respuesta casi plana en la banda pasante y una atenuación de  $-40$  dB/década.

**4.4 Unidad Microcontroladora (MCU) y Módulo de Comunicaciones (CM): La tarjeta Anybus® Evaluation**

4.4.1 Introducción

La necesidad de implementación del módulo de comunicación y de tener una unidad microcontroladora, llevó a incorporar un hardware externo: la tarjeta Anybus® Evaluation Board de la firma sueca HMS Industrial Networks [23].

La citada tarjeta, mostrada en la figura 14, permite el desarrollo de aplicaciones basadas en módulos Anybus®. Es compatible con módulos paralelos Anybus-S/M, módulos serie Anybus-S, Anybus IC y Anybus Communicator/ComAdapter.

El objetivo de Anybus es conectar dispositivos a diferentes redes industriales, de forma que actúa como una especie de convertidor de protocolo. El sistema embebido es asimismo lo suficientemente flexible a nivel hardware, que permitirá añadir nuestros propios dispositivos [23,24].

Asimismo, la tarjeta se acompaña de una versión del software Microvisión, de la firma estadounidense Keil, que consiste en un sistema desarrollo de los microcontroladores de la familia 8051 y superiores, como el que acompaña a la tarjeta (Infineon 80C517A).

Las tarjetas pueden trabajar de manera offline (con respecto al ordenador) o en modo monitor (para el desarrollo de aplicaciones, vía programación del microcontrolador).

En suma, la tarjeta de evaluación, unida a uno de los módulos esclavo (S), maestro (M) o maestro-esclavo(S-M) permitirá la conexión del transmisor a la red industrial correspondiente.

## Capítulo 4. Arquitectura del Transmisor Universal Inteligente : Nivel Hardware.

Cabe destacar, que pese a que el CM está ligado a unas tarjetas de una firma comercial concreta, el diseño del UST, basado en un sistema microcontrolador, es flexible y abierto, lo cual permite la escalabilidad y posibilitaría la migración del mismo hacia otras marcas y modelos.

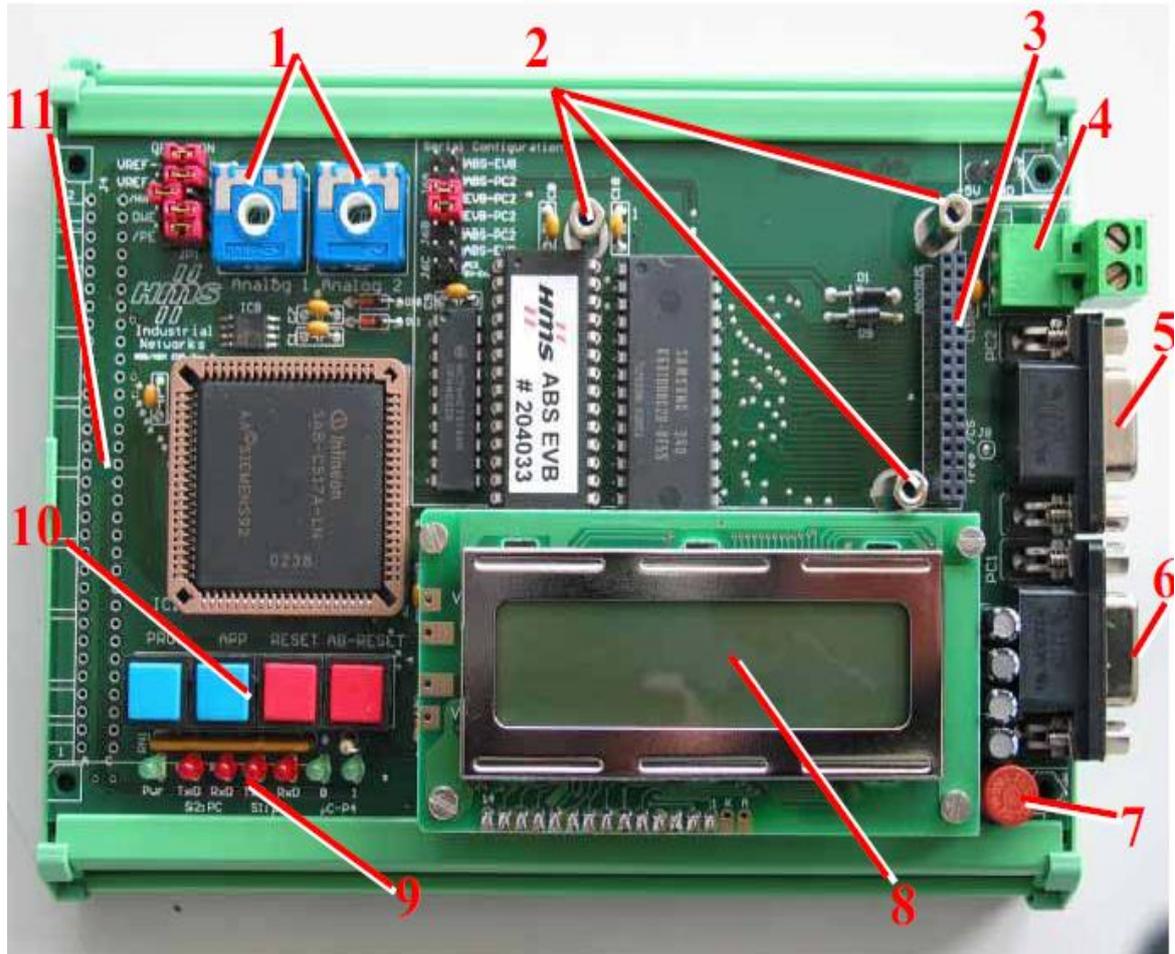


Figura 14. Tarjeta de Evaluación

La tarjeta consta de:

1. Potenciómetro para valores analógicos.
2. Pines para montaje de un módulo Anybus-S/M.
3. Pines para montaje de un módulo Anybus-S.
4. Conector de alimentación 5V DC, 800 mA.
5. Conector serie para dispositivos.
6. Conector serie para ordenador (para programación del microcontrolador).

## Tesis doctoral UDC /2017

7. Fusible tipo T de 250V, 800 mA.
8. Pantalla de cristal líquido (LCD) de 2 líneas de 16 caracteres.
9. Batería de LEDs.
10. Pulsadores para interacción del usuario.
11. Conector de expansión para aplicaciones de usuario (opcional).

### 4.4.2 Microcontrolador SAB 80C517A

Como ya se indicó, la tarjeta incorpora un microcontrolador SAB 80c517A. Este dispositivo es una versión de gama media-alta del clásico microcontrolador 8051 de Intel. El citado dispositivo es de tipo CISC (juego complejo de instrucciones) y tiene un bus común para direcciones y datos, si bien tiene separación física de las memorias RAM y ROM.

Una descripción breve de los recursos y características del microcontrolador, puede verse en la figura 15.

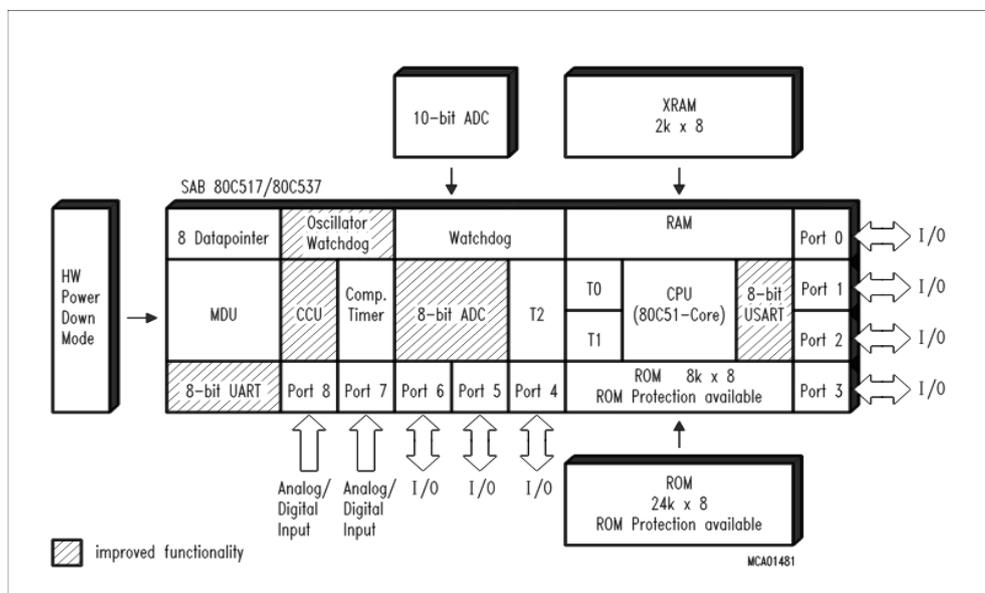


Figura 15. Microcontrolador 80C517A (Fuente Infineon)

## Capítulo 4. Arquitectura del Transmisor Universal Inteligente : Nivel Hardware.

Así, podemos destacar:

- ✓ Compatibilidad con la familia 8051.
- ✓ Frecuencia de trabajo máxima de 24 Mhz.
- ✓ 8 Datapointers .
- ✓ ROM en chip de 32K ó con ROM externa de 64K.
- ✓ RAM en chip de 256 bytes.
- ✓ 4 temporizadores/contadores de 16 bits (T0,T1,T2 y un compare timer).
- ✓ Unidad de Captura/Comparación.
- ✓ Convertidor A7D de 10 bits.
- ✓ Modos de bajo consumo.
- ✓ Watch-Dog Timer.
- ✓ 17 fuentes de interrupción con 4 niveles de prioridad.

### **4.5 Esquemas hardware del transmisor**

#### 4.5.1 Introducción

Se va a mostrar desglosadamente, el esquema del hardware diseñado y una descripción de los principales circuitos integrados utilizados (se obvian los componentes pasivos y diodos).

Sobre el modo de funcionamiento y características de cada I.C, se remite a los datasheets correspondientes, si bien se detallará más en aquellos puntos del trabajo en los que sea necesario.

4.5.2 Multiplexor analógico

Utiliza el I.C MAX397 [16] de Maxim15, un multiplexor analógico de 16 canales y tecnología CMOS. Su esquema puede verse en la figura 16.

Las tensiones de entrada (positiva y negativa) se seleccionan a través de un jumper. Las salidas COMA y COMB son las entradas del amplificador de instrumentación.

Su resistencia interna (con un valor típico de  $60\Omega$ ) no afecta a las medidas ni en precisión ni en exactitud, a consecuencia de la alta impedancia del PGIA.

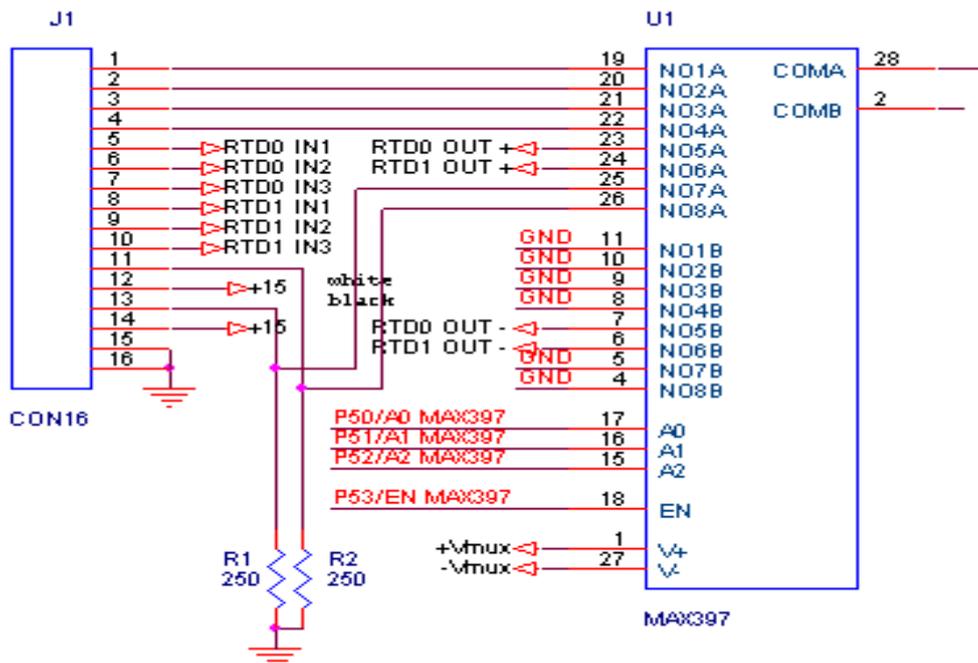


Figura 16. Multiplexor Analógico MAX397

## Capítulo 4. Arquitectura del Transmisor Universal Inteligente : Nivel Hardware.

### 4.5.3 Amplificador de ganancia programable, filtro y sensor de temperatura

El primero está constituido por los potenciómetros digitales, resistencias convencionales y amplificadores operacionales; el segundo por un amplificador operacional similar a los anteriores, resistencias y condensadores. El último es el I.C DS 1620 [25].

Las entradas del amplificador de instrumentación son las salidas del MUX ya indicado.

Los operacionales utilizados son el modelo LM358 de Texas Instruments [26]. Se trata de amplificadores operacionales de uso general.

El DS 1620 es un termostato/sensor que va a ser usado para la compensación térmica en los termopares conectados. Tiene comunicación serie con el microcontrolador o microprocesador, la cual es gestionada a través de una serie de comandos predeterminados y de un pequeño protocolo ad hoc.

El filtro se diseñó con el software de Texas Instruments FilterPro, y es un Butterworth de segundo orden con topología Sallen-Key [18,19].

El bloque completo se muestra en la figura 17.

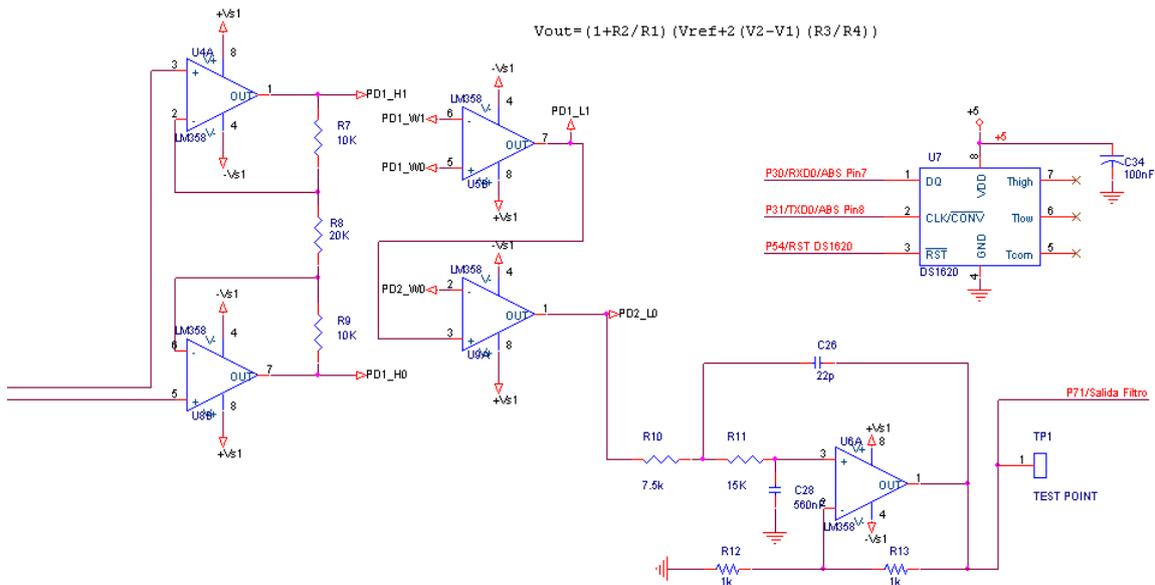


Figura 17. Esquema del bloque de acondicionamiento y sensor térmico

#### 4.5.4 Potenciómetros Digitales

En la placa hay dos potenciómetros digitales DS1868 de Dallas Semiconductors [21,22]. Como ya se indicó en el apartado anterior tienen comunicación serie con el microcontrolador (patillas P30 y P31) aparte de recibir del mismo la señal de reset.

Los potenciómetros están en modo independiente (no están en serie) y van conectados al amplificador de instrumentación para ajustar su ganancia y a la salida del convertidor D/A para el ajuste del offset. Su esquema electrónico se muestra en la figura 18.

## Capítulo 4. Arquitectura del Transmisor Universal Inteligente : Nivel Hardware.

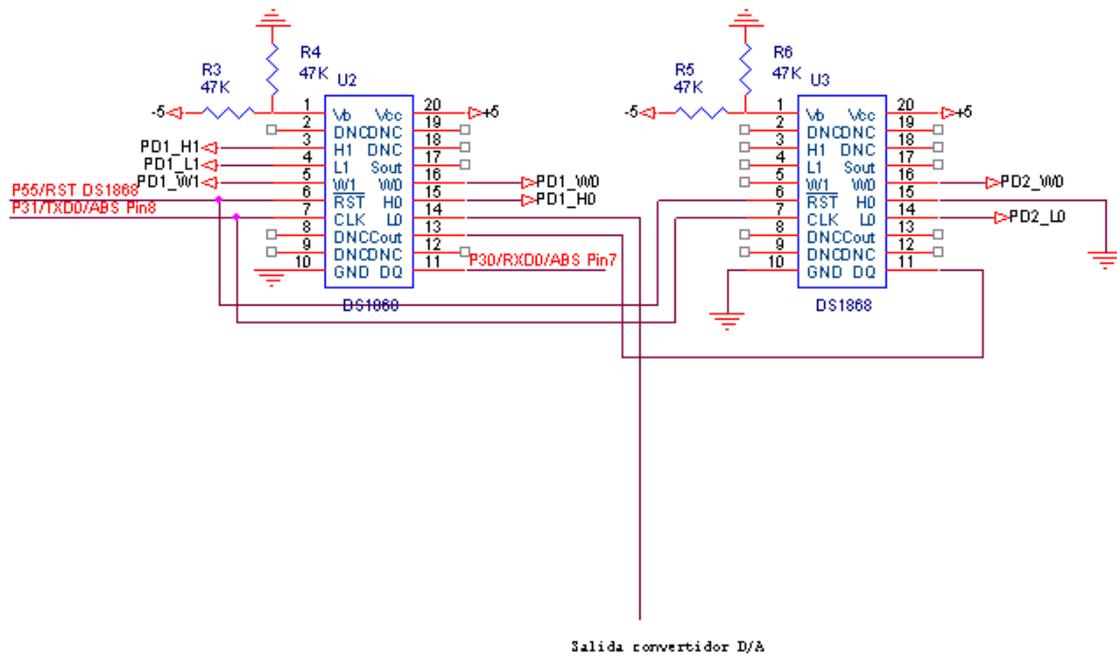


Figura 18. Potenciómetros Digitales

### 4.5.5 Alimentación de la placa

Permite proporcionar las tensiones adecuadas (tanto positivas como negativas) para alimentar el transmisor. El esquema de la alimentación positiva, se muestra en la figura 19.

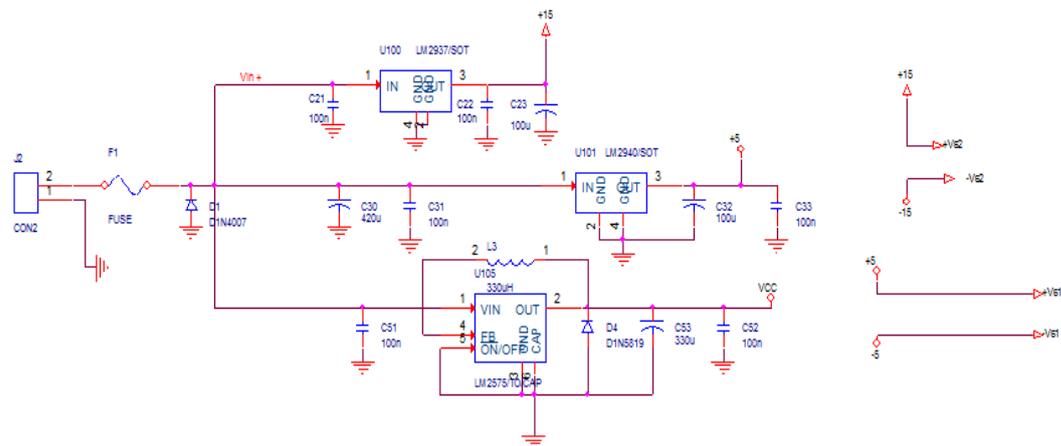


Figura 19. Alimentación (tensiones positivas)

A partir de la entrada de c.c, se tienen los siguientes circuitos integrados (I.C's): LM2937, LM2940 y LM2575.

Los dos primeros, de la firma Texas Instruments [27,28] son reguladores de tensión, de bajas pérdidas y estabilizan las tensiones de 15V y 5V, respectivamente. El tercero es un pre-regulador para los reguladores lineales ya indicados y que libera muy poca temperatura (de hecho, a veces ni precisa disipador).

Por otra parte, los I.C's MAX635 y MAX637, de Maxim, permiten obtener tensiones negativas, precisas para alimentar los diferentes amplificadores operacionales del circuito (-5V y -15V), tal y como se muestra en la figura 20.

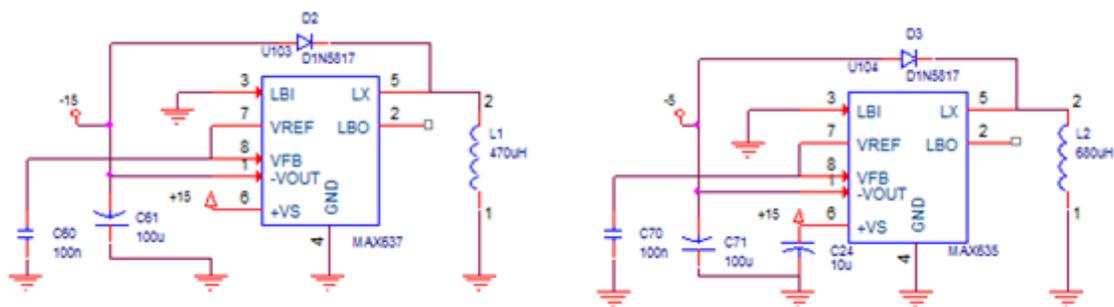


Figura 20. Tensiones negativas

## Capítulo 4. Arquitectura del Transmisor Universal Inteligente : Nivel Hardware.

### 4.5.6 Tensiones de referencia

El I.C MAX875 de Maxim [29] son referencias de tensión constante de 5 V, muy aptas para los convertidores D/A, entre otras aplicaciones. Su esquema se muestra en la figura 21.

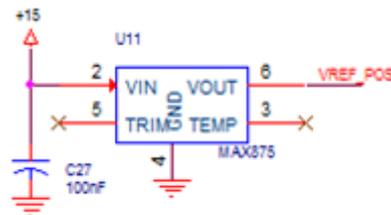


Figura 21. Tensiones de referencia

### 4.5.7 Conector de interface con la tarjeta Anybus® Evaluation Board

Un conector de 64 pines DIN64\_AC-H se encarga de la interconexión entre la tarjeta diseñada y la tarjeta Anybus® Evaluation (que conforma la MCU y el CM), tal y como se muestra en la figura 22.

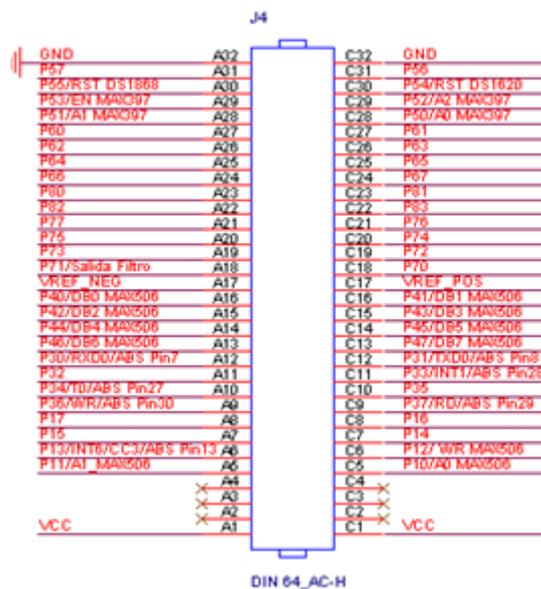


Figura 22. Conector de Interface

#### 4.5.8 Convertidor D/A

Se muestra en la figura 23, y es un convertidor digital-analógico Max506 de Maxim [30] cuádruple de 8 bits que permitirá añadir un offset adicional al PGIA, lo que conlleva modificación del amplificador de instrumentación convencional, que lleva el extremo de la resistencia a masa. Asimismo genera la tensión de entrada al convertidor V/I abajo explicado.

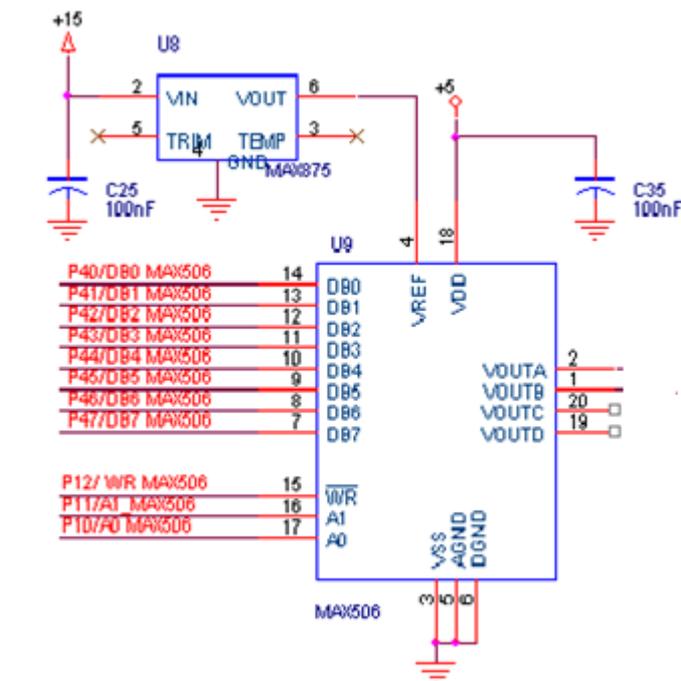


Figura 23. Convertidor D/A

#### 4.5.9 Convertidor Tensión-Corriente

Permite obtener la salida en corriente continua 4..20 mA a partir de una tensión de entrada proveniente del convertidor D/A, utilizando operacionales LM358 de Texas Instruments [26]. Su esquema es mostrado en la figura 24.

Cabe destacar, que mediante este circuito, se permite que el operador pueda realizar un calibrado local del transmisor, utilizando un simple polímetro digital.

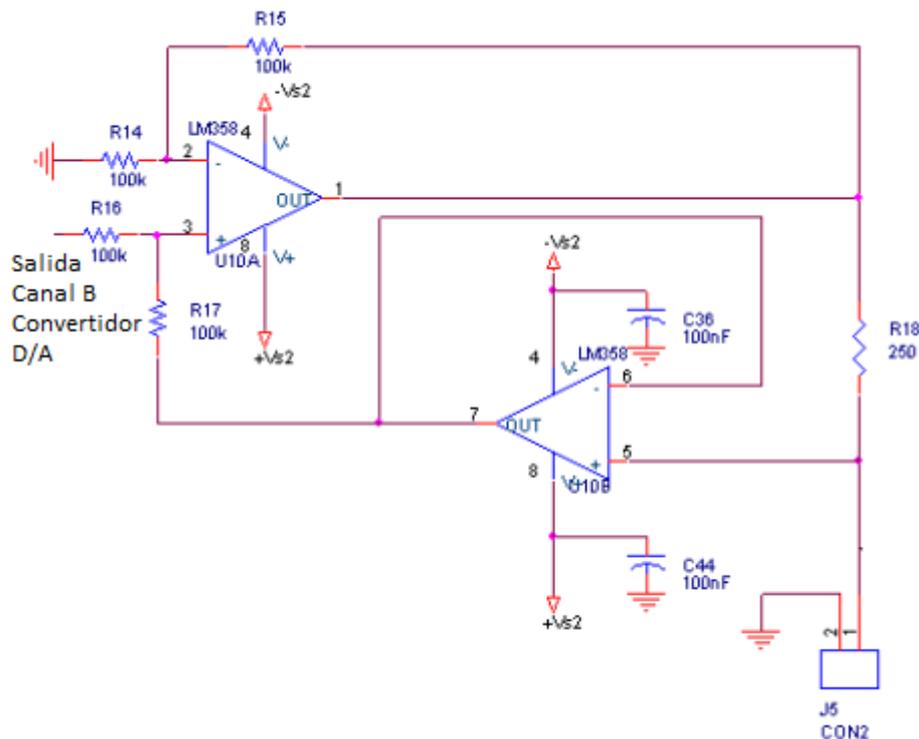


Figura 24. Convertidor Tensión-Corriente

La expresión de la corriente de salida pasa a mostrarse a continuación:

El operacional 1 representa un amplificador no inversor de ganancia 2 y el operacional 2 es un seguidor de tensión. En la ecuación 9 se expresa la tensión de salida del operacional 1.

$$V_{o(1)} = V' \cdot \left( 1 + \frac{100K\Omega}{100K\Omega} \right)$$

Ecuación 9. Tensión de salida del amplificador operacional 1

Sabiendo que  $V' = V_{+(1)} = \left( \frac{V_{D/A} - V_{o(2)}}{200K\Omega} \right) \cdot 100K\Omega + V_{o(2)}$ , donde  $V_{+(1)}$  es la tensión en la entrada no inversora del amplificador operacional 1,  $V_{D/A}$  es la tensión de salida del convertidor digital-analógico y  $V_{o(2)}$  es la tensión de salida del amplificador operacional 2 que está en configuración de seguidor de tensión, cumpliéndose que  $V_{+(2)} = V_{o(2)}$ .

Desarrollando la ecuación 9, se llega a la expresión de la tensión de salida del operacional 1 en función de las tensiones del convertidor digital-analógico y de la tensión de salida del operacional 2, que se expresa en la ecuación 10.

$$V_{o(1)} = V_{D/A} - V_{o(2)}$$

Ecuación 10. Tensión de salida del operacional 1 en función de  $V_{D/A}$  y  $V_{o(2)}$

Por otra parte, la tensión de salida del operacional 2, puede expresarse en función de la tensión de salida del operacional 1 y de la caída de tensión en la resistencia de  $250 \Omega$ , tal y como se ve en la ecuación 11.

$$V_{o(2)} = V_{o(1)} - I \cdot 0,250K\Omega$$

Ecuación 11. Tensión de salida del operacional 2

Finalmente, a partir de las ecuaciones 10 y 11 se llega a la expresión de la corriente de salida, expresada en la ecuación 12.

$$I = \frac{V_{D/A}}{0,250K\Omega}$$

Ecuación 12. Expresión de la corriente de salida

### **4.6 Prototipo Final**

El desarrollo del UST (sin el módulo de comunicaciones) lleva a la implementación de un prototipo físico sobre el que se disponen los componentes físicos previamente descritos.

La figura 25 es una fotografía que ilustra el citado prototipo (concretamente el PCC).

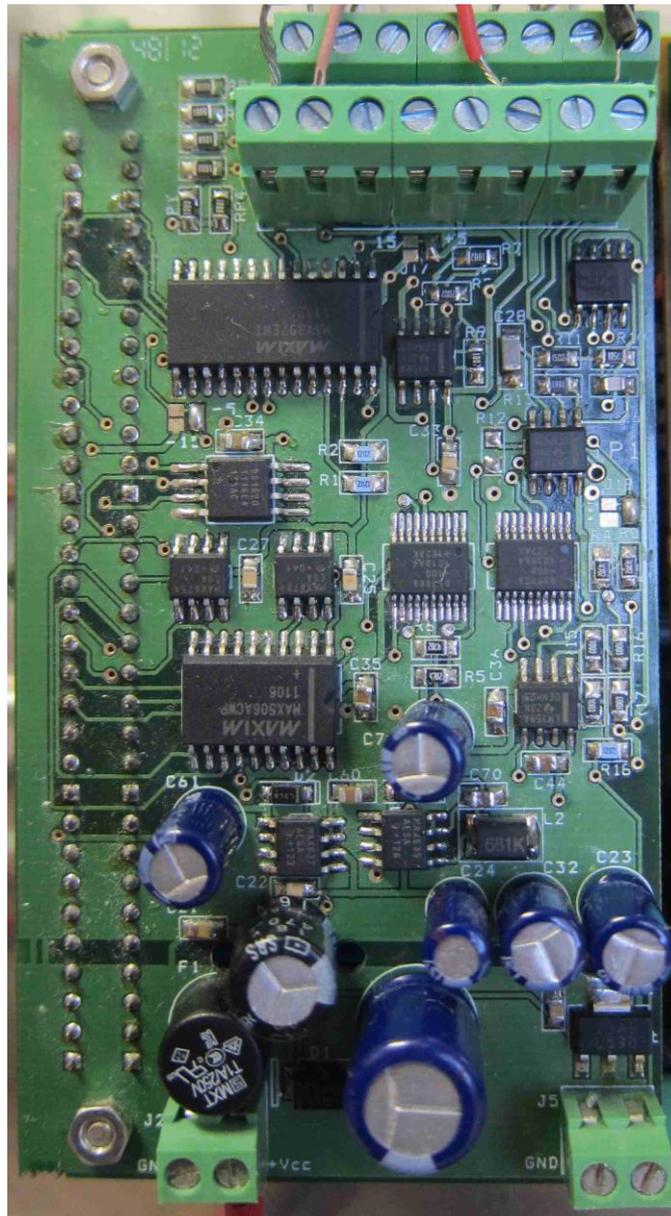


Figura 25. Imagen del prototipo final



## Capítulo 5

El Módulo de Comunicaciones en Detalle

*La ciencia puede divertirnos y fascinarnos, pero es la ingeniería la que cambia el mundo. (Isaac Asimov).*

## **5.1 Introducción**

Se ha destacado la vital importancia del módulo de comunicaciones dentro del transmisor universal, en tanto es el encargado del intercambio de información entre los eventos de la planta (representados por la lectura de los sensores) y los diferentes elementos de cálculo, supervisión, control y visualización en sus diferentes niveles, modos e implementaciones tecnológicas.

Por otra parte, se ha destacado como uno de los aspectos diferenciadores del Transmisor Universal, su capacidad para operar con redes heterogéneas sin estar ligados a un modelo concreto de bus industrial, lo que implica una flexibilidad sin competencia con otros productos de similar naturaleza [31].

## **5.2 El Módulo de Comunicaciones (CM) en detalle**

Como ya se ha indicado con anterioridad, el CM se implementa en base a la tarjeta Anybus ® Evaluation Board, de HMS la cual permite conectar módulos reales de comunicación de la misma firma, con interfaz de distintos protocolos (Modbus, DeviceNet, etc) [23,24,32].

De esta forma, el PCC recibe información del exterior a través de los sensores y mediante la comunicación bidireccional que mantiene con la MCU puede enviar/recibir información hacia/desde la red industrial.

El prototipo de transmisor inteligente universal ha sido diseñado para operar inicialmente en entornos distribuidos Ethernet / IP y Devicenet, con arquitectura cliente / servidor. Una interfaz de hardware / software implementa las tareas de comunicaciones de entrada / salida basadas en módulos de

comunicación incorporados Anybus de la firma HMS Industrial Networks.

## Capítulo 5. El Módulo de Comunicaciones en Detalle.

Este módulo está diseñado para una fácil integración en dispositivos de campo industriales que necesitan comunicarse con Autómatas Programables (PLC's) u Ordenadores Personales (PC's) a través de redes industriales. En el primer prototipo se utiliza un módulo de comunicación Ethernet / IP. El módulo Ethernet / IP permite la fácil implementación de interfaces Ethernet 10 o 10 / 100Mbit en dispositivos industriales. El módulo tiene su propio microprocesador de alto rendimiento que maneja todo el protocolo de comunicación independientemente de la aplicación del host, simplificando el desarrollo de dispositivos de medición inteligentes. Cuenta con una interfaz de aplicación estandarizada que admite hasta 512 bytes de datos de Entrada/Salida cíclicos y soporte adicional para datos de parámetros acíclicos. Esto es exactamente lo que se requiere en los protocolos estándar como Ethernet / IP o DeviceNet.

La interfaz de aplicación está totalmente estandarizada en cuanto a sus características de mecánica, hardware y software, por lo que el módulo es fácilmente intercambiable para otros, ofreciendo la posibilidad de operar en diferentes redes industriales. El intercambio de datos entre el módulo y el dispositivo de campo se gestiona mediante registros de control, que especifican el tamaño del área de Entrada/Salida. Además, la interfaz del software de aplicación proporciona datos relacionados con el módulo de auto reconocimiento, como el tipo de red, versiones de software y hardware, etc.

El uso de estos módulos proporciona flexibilidad y fácil integración en el sistema en comparación con otros tipos de implementaciones que requieren recursos de CPU altos. Otro beneficio es que el mismo desarrollo puede ser fácilmente adaptado para operar en otras redes industriales cambiando el módulo de comunicación y realizando pequeños cambios en el firmware que incluso puede realizarse automáticamente mediante las facilidades de auto reconocimiento.

## Tesis doctoral UDC/ 2017

Explicados en el capítulo anterior los aspectos principales de la tarjeta de evaluación, ahora procede hablar de los propios módulos S-M de Anybus.

### 5.2.1 Tarjeta AnyBus®-S Slave&Master. Introducción

Se trata de módulos de comunicación para diferentes buses de campo que llevan incluidos memoria y capacidad de procesamiento. Estos módulos llevan incorporados un hardware y un firmware que se encargan de la tarea de la comunicación con el bus de campo, dejando para el usuario la implementación de las restantes tareas. Sus características principales, se muestran en la tabla 2.

La mecánica de la interacción entre la aplicación y la tarjeta se gestiona a través de una arquitectura de puertos de entrada-salida y memoria compartida para el intercambio de datos.

Versiones master y slave disponibles
Soporta los principales buses de campo con una interfaz de aplicación común
Microprocesador en placa, que permite descargar de trabajo al host
Interfaz Mailbox para comunicación vía mensajes
Memoria RAM de puerto dual (DPRAM) de 2Kbytes/4Kbytes (según versión)
Realimentación con el usuario vía LEDS y switches
Aislamiento galvánico de la interfaz fieldbus
Estandarización hardware y software para una mayor flexibilidad y adaptación a diferentes modelos de bus

Tabla 2. Características principales de los módulos Anybus

## Capítulo 5. El Módulo de Comunicaciones en Detalle.

### 5.2.2 Arquitectura básica

En la figura 26 puede verse la arquitectura de la tarjeta, destacando sus tres bloques funcionales básicos: La Interfaz de Aplicación, que constituye un puerto paralelo de comunicación con el exterior, apropiado para la interacción con un sistema microcontrolador/microprocesador y que se descompone en un conector de aplicación y la memoria de puerto dual; la unidad microprocesadora gestionará las tareas de comunicación, liberando al host de las mismas y por último, la Interfaz de Fieldbus, se encargará de manejar el protocolo del bus de campo correspondiente.

Esta última unidad, supone un sistema embebido que gestiona completamente la tarea de comunicación con el bus de campo, sin requerir una interacción con la aplicación.

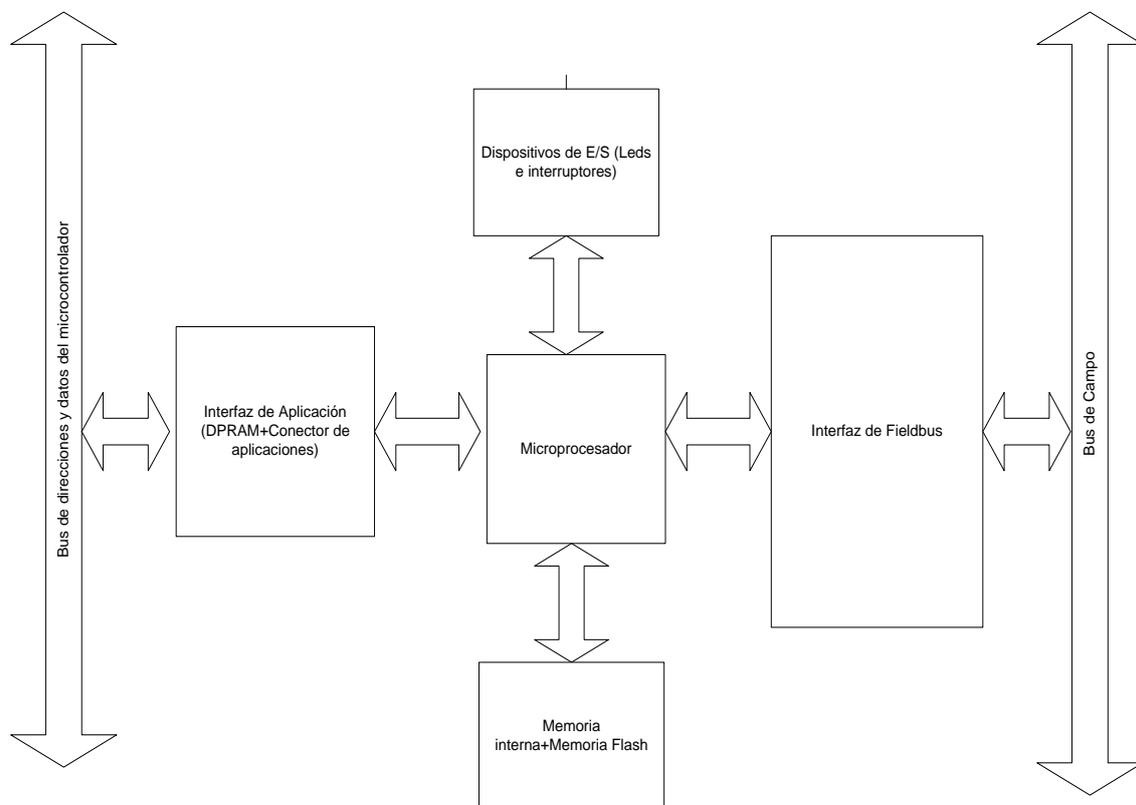


Figura 26. Arquitectura básica de la tarjeta

5.2.2.1 Interfaz de Aplicación

Está formado por el a)conector de aplicaciones, que permite tanto una conexión serie como paralelo, y cuyas señales se pueden ver detalladamente en la guía del usuario de la tarjeta [32], y b)la DPRAM, cuyo mapa se ve en la figura 27 y viene también de la citada guía de usuario.

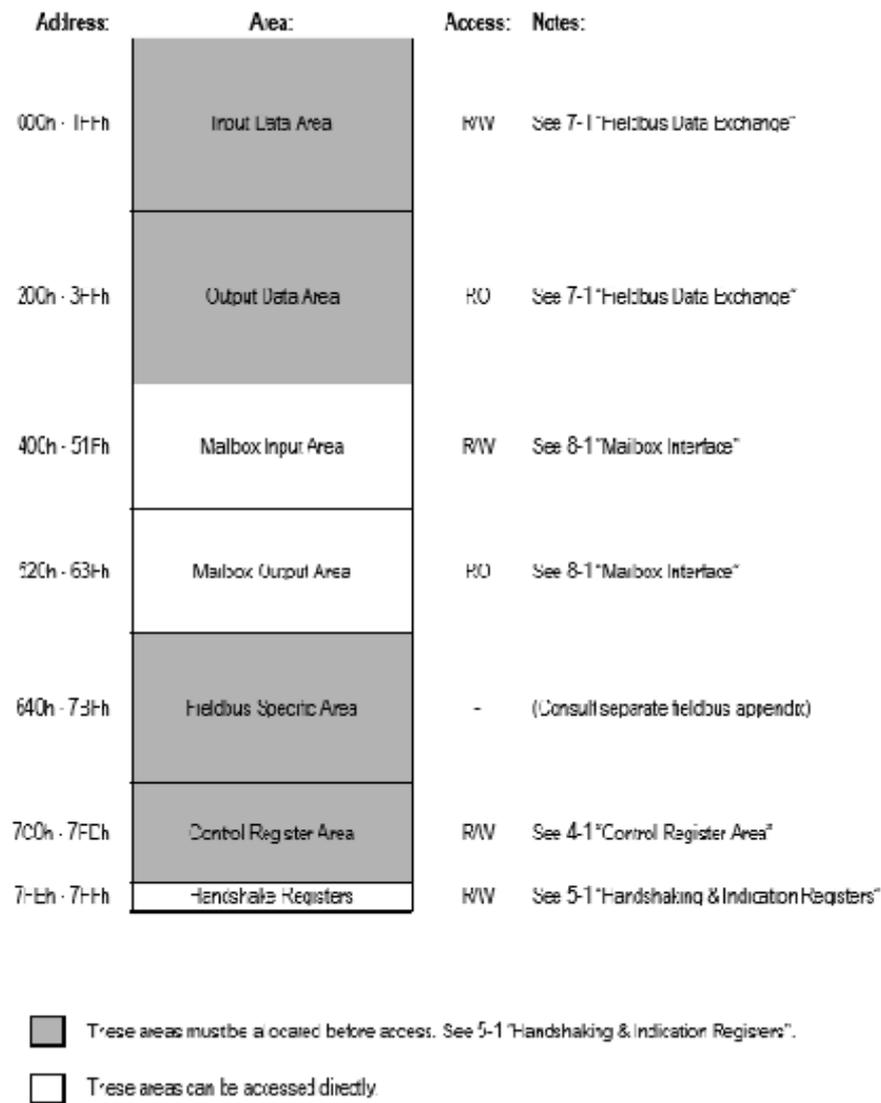


Figura 27. Mapa de memoria (Fuente HMS)

- ✓ Las posiciones 0000h-01FFh conforman el área de datos de entrada (lectura/escritura).
- ✓ Las posiciones 0200h-03FFh conforman el área de datos de salida (solo lectura).

## Capítulo 5. El Módulo de Comunicaciones en Detalle.

- ✓ Las posiciones 0400h-051Fh conforman el área de entrada del Mailbox (lectura/escritura).
- ✓ Las posiciones 0520h-063Fh conforman el área de salida del Mailbox (sólo lectura).
- ✓ Las posiciones 0640h-07BFh conforman el área específica del fieldbus.
- ✓ Las posiciones 07C0h-07FDh conforman el área del registro de control (lectura y escritura).
- ✓ Las posiciones 07FEh-07FFh conforman los registros de Handshake (lectura y escritura) e indicación de estado.

En el área del registro de control podemos encontrarnos información como:

- ✓ Versión del bootloader.
- ✓ Código del fabricante.
- ✓ Número de serie del módulo.
- ✓ Tipo de bus de campo.
- ✓ Estado del watchdog<sup>1</sup>.
- ✓ Estado de los LEDs.
- ✓ Tipo de módulo.
- ✓ Bit de cambio de datos (si se modificó el contenido de la DPRAM).
- ✓ Notificación de eventos.
- ✓ Fuente del evento.
- ✓ Etc.

En el área de Handshaking e indicadores, tendríamos:

- ✓ Área de ubicación y desubicación.
- ✓ Notificación de eventos.
- ✓ Envío y recepción de Mailbox.

---

<sup>1</sup> Es un recurso típico de los microcontroladores y consiste en un timer que se desborda si no es refrescado y que en ese caso indica un malfuncionamiento de la planta o sistema.

La memoria se subdivide, como ya hemos visto, en varias áreas. Para evitar conflictos de colisión, la aplicación debe direccionar previamente la zona de memoria. En caso de que la zona esté disponible, se pone a 1 el bit correspondiente del registro de control. Una vez terminada la tarea, la aplicación devuelve el control al módulo Anybus®.

Una vez que se ha mencionado el concepto de evento, cabe destacar que la tarjeta objeto de estudio, permite -a través de la CPU- el trabajo en base a **polling** (sondeo) y en base a **interrupción**.

La diferencia entre ambos métodos, es sobradamente conocida al estar muy ligada al estudio de las arquitecturas de computadores, concretamente a la CPU [33].

El método de sondeo es **cíclico**, y en él, un elemento que actúa de árbitro (un elemento con capacidad de proceso) pregunta a los potenciales transmisores de información, si tienen algo que enviar.

El método de interrupción es **acíclico** y en él, cuando un elemento tiene información que transmitir, el elemento árbitro detecta un **evento**, lo que se traduce en un cambio en una señal o bit y gestiona la llegada o envío de información. La ventaja de este método es su rapidez.

Los eventos detectables en el caso de estudio son:

- ✓ Inicialización del módulo.
- ✓ Notificación en el Mailbox.
- ✓ Interrupciones software (cambios en datos fuera de memoria interna o señales del bus de campo).
- ✓ Interrupción de inicio (tras arranque en frío o en caliente).

## Capítulo 5. El Módulo de Comunicaciones en Detalle.

- ✓ Asignación de memoria.

### 5.2.2.2 Microprocesador, memoria interna y periféricos E/S

Se encarga de las tareas de proceso y es el nexo de unión entre la MCU y la Interfaz de Fieldbus (que será la que intercambie la información con el bus industrial).

Los periféricos de entrada (switches) se encargan de tareas de configuración (velocidad, habilitación, etc) y los de salida (LEDS) muestran el estado del watchdog o de la conexión al bus, en base a colores y frecuencias de encendido/apagado.

### 5.2.2.3 Interfaz de Fieldbus y gestión de memoria

Está ligada al modelo concreto de bus de campo que implementa y sería complicado describirla, dado que se trata de un sistema empotrado. Lo único destacable a nivel de diseñador, es que la tarjeta se comunica con el bus industrial vía las regiones de entrada y salida (buffers) de la DPRAM.

Ese intercambio de información se realiza a través de:

- ✓ **Input Data Buffer.** Contiene la información enviada al bus de campo.
- ✓ **Output Data Buffer.** Contiene la información leída del bus de campo.

Los citados buffers, en aras de tener un acceso más rápido, pueden tener parte de sus datos en la DPRAM, estando localizados los restantes en la memoria interna (ésta es accesible vía Mailbox). El tamaño máximo de un buffer en DPRAM es de 512 bytes.

5.2.2.4 Interfaz Mailbox

Es una interfaz de intercambio de mensajes, que permite al módulo ejecutar tareas, enviar o recibir información, atender peticiones, etc.

Es la interfaz entre la aplicación y el software de la placa Anybus®. La figura 28 describe de manera esquemática, la interacción entre ambas.

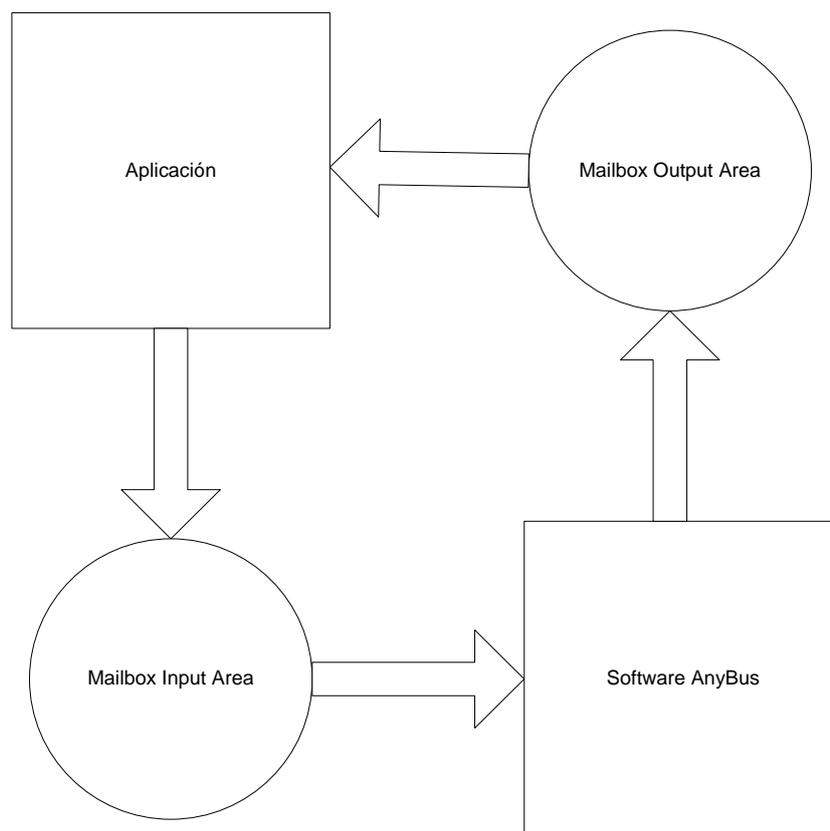


Figura 28. Interacción entre la aplicación y la tarjeta Anybus a través de la Interfaz Mailbox

Las áreas Mailbox Input y Mailbox Output se vinculan a la entrada y salida de mensajes desde y hacia la aplicación, respectivamente.

La figura 29 refleja los dos modos de comunicación implementados por la interfaz Mailbox.

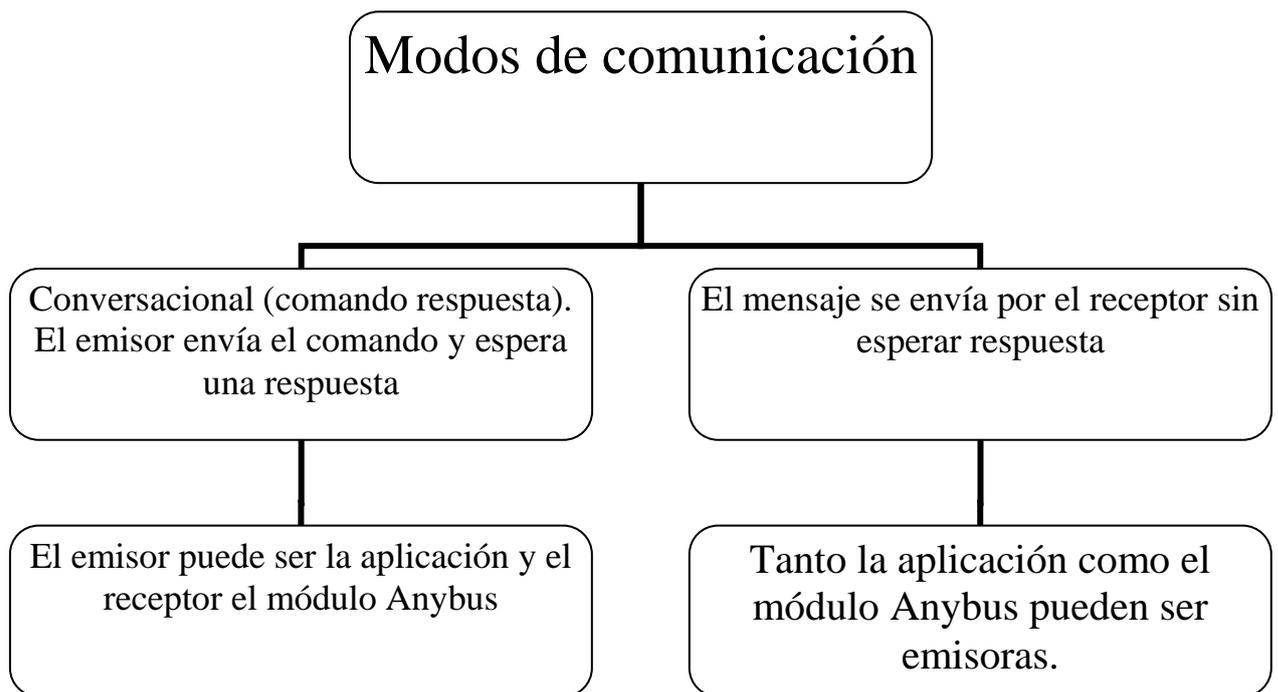


Figura 29. Modos de comunicación de la Interfaz Mailbox

Teniendo en cuenta que se pueden enviar varios mensajes antes de recibir respuesta, es obvio que la interfaz debe articular mecanismos para diferenciarlos y así no confundir las respuestas que llegan. Para ello existe un identificador de mensaje que lo referencia de manera biunívoca.

En Mailbox pueden distinguirse los siguientes tipos de mensajes:

- ✓ Mensajes de Aplicación (para el acceso a las funciones internas del módulo Anybus); p.e: inicialización del proceso, almacenamiento y acceso a la memoria Flash, autodiagnóstico, etc.
- ✓ Mensajes de Fieldbus(específicos para el acceso a funciones y datos del bus de campo correspondiente).
- ✓ Mensajes de Memoria Interna(para el acceso a la misma); p.e: leer área interna de entrada, escribir en el área interna de entrada, leer el área interna de salida, etc.
- ✓ Mensajes de Reset (reset del software).

## Tesis doctoral UDC/ 2017

Los bits de notificación del Mailbox permiten coordinar las operaciones de E/S entre la aplicación y el módulo. Se encuentran en las direcciones 07FEh-07FFh (que conforman los registros de Handshake e indicación de estado).

- ✓ AP\_MIN. Modificamos este bit para enviar un mensaje previamente escrito en el área Mailbox Input.
- ✓ AP\_MOUT Modificamos este bit para indicar que un mensaje recibido ha sido leído.
- ✓ AB\_MIN . Este bit se modifica por el módulo Anybus cuando tiene que leer un mensaje.
- ✓ AB\_MOUT. Este bit se modifica por el módulo Anybus cuando un mensaje espera en el área Mailbox Output.

Si AP\_MIN = AB\_MIN el Mailbox Input está libre. En otro caso, está ocupado.

Si AP\_MOUT = AB\_MOUT el Mailbox Output está ocupado. En otro caso, está libre.

Las tablas 3 y 4 describen la estructura de los mensajes del Mailbox y la cabecera de los mismos, respectivamente. Asimismo, las figuras 30 y 31 explican, en base a flujogramas, los procesos de emisión y recepción de mensajes al/desde el Mailbox.

Posición 000h-01Fh	Cabecera del mensaje (32 bits)
Posición 020h-11Fh	Cuerpo del mensaje (256 bits)

Tabla 3. Estructura de un mensaje del Mailbox

Capítulo 5. El Módulo de Comunicaciones en Detalle.

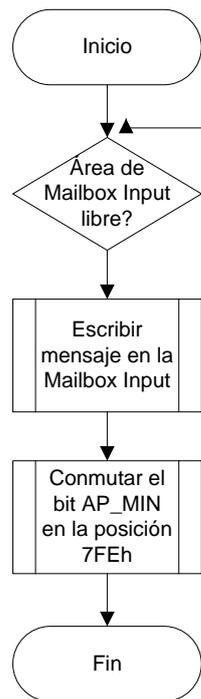


Figura 30. Envío de un mensaje al Mailbox

Posiciones	Bits	Contenido
000h-001h	16	Message Id (identificación del mensaje)
002h-003h	16	Message Information (tipo de mensajes, control de errores, comando o respuesta)
004h-005h	16	Command Number (identificador del comando)
006h-007h	16	Data Size (tamaño del mensaje. Máximo 256 bytes)
008h-00Bh	32	Reservado (se pone a 00h/01h)
00Ch-00Fh	32	Reservado (se pone a 00h/00h)
010h-011h	16	Palabra reservada 1 (específico para cada comando)
012h-013h	16	Palabra reservada 2 (específico para cada comando)
014h-015h	16	Palabra reservada 3 (específico para cada comando)
016h-017h	16	Palabra reservada 4 (específico para cada comando)
018h-019h	16	Palabra reservada 5 (específico para cada comando)
01Ah-01Bh	16	Palabra reservada 6 (específico para cada comando)
01Ch-01Dh	16	Palabra reservada 7 (específico para cada comando)
01Eh-01Fh	16	Palabra reservada 8 (específico para cada comando)

Tabla 4. Cabecera de un mensaje

## Capítulo 5. El Módulo de Comunicaciones en Detalle.

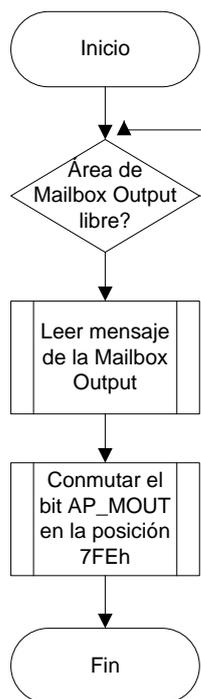


Figura 31. Recepción de un mensaje del Mailbox

### 5.2.3 Modos de comunicación

Los modos clásicos de comunicación que podemos encontrar en una red industrial son:

- ✓ Modo Master (maestro): El Master actúa como árbitro del bus e intermediario entre los esclavos (Slave) y las capas superiores de red. El Maestro, ya sea por sondeo (polling) o por interrupción realiza una petición al esclavo.
- ✓ Modo Slave (esclavo): Se encuentra en espera a la petición del Master (maestro). Una vez que ha atendido la solicitud, se queda en espera de la siguiente. Sería el modo típico del transmisor.
- ✓ Modo Master/Slave: En este caso, los roles serían intercambiables.



## Capítulo 6

Arquitectura del Transmisor Universal  
Inteligente: Nivel Software

*En el futuro es posible que los ordenadores no pesen más de 1,5 toneladas. (Popular Mechanics, 1949).*

## 6.1 Introducción

En este capítulo, se describe el elemento software del UST. Como ya se ha comentado, la columna vertebral del Transmisor Universal radica en la MCU, por dos motivos fundamentales: por una parte, las comunicaciones -canalizadas a través de las tarjetas Anybus®- se sustentan en un microcontrolador; por otra parte, la sensorización virtual, precisa de un sistema de procesamiento de información para implementar los algoritmos correspondientes.

El microcontrolador elegido - el que viene embebido en la tarjeta es, como ya se ha mencionado, el 80C517A de Infinenon. La programación del citado microcontrolador puede realizarse en lenguaje ensamblador o bien en C. La segunda opción ha sido la elegida, ya que aporta innegables ventajas, tales como una mejor comprensión del código, mayor portabilidad y reutilización, así como una perfecta interacción con el software proporcionado por HMS.

Se utiliza el sistema de desarrollo de la firma Keil Microvision para microcontroladores de la familia 8051. Este sistema de desarrollo permite crear unidades de código, llamadas proyectos, que constan de uno o más programas escritos en C y/o ensamblador.

Los proyectos pueden depurarse off-line sobre un simulador en el que puede controlarse la ejecución del programa o en modo on-line o monitor, sobre una tarjeta de evaluación, como va a ser el caso del transmisor.

El C utilizado para el desarrollo del software, contiene las características del ANSI C, amén de las peculiaridades propias de la programación de microcontroladores (especialmente en lo que a tipos de datos se refiere) y más en concreto a la

## Capítulo 6. Arquitectura del Transmisor Universal Inteligente : Nivel Software.

arquitectura 80C517A (gestionada a nivel de archivos header .H) [34,35].

### 6.2 Flujogramas del sistema y explicación de las principales subrutinas

No se ha adjuntado el código fuente del prototipo, en tanto no parecía procedente para la definición del modo de trabajo del UST. En su lugar, se ha optado por desarrollar los flujogramas del bloque principal del programa, así como de aquellas subrutinas más críticas en el desarrollo del sistema. Asimismo, se incorporan unas tablas en las que se comentan las citadas subrutinas, amén de indicar su nombre, parámetros de entrada y dominio del valor de salida, en el formato habitual del lenguaje C:

```
dominio          nombre_funcion          (parámetro_1:dominio_1,  
parámetro_2:dominio_2,...,parámetro_n:dominio_n)
```

La figura 32 muestra el flujograma del cuerpo principal de programa.

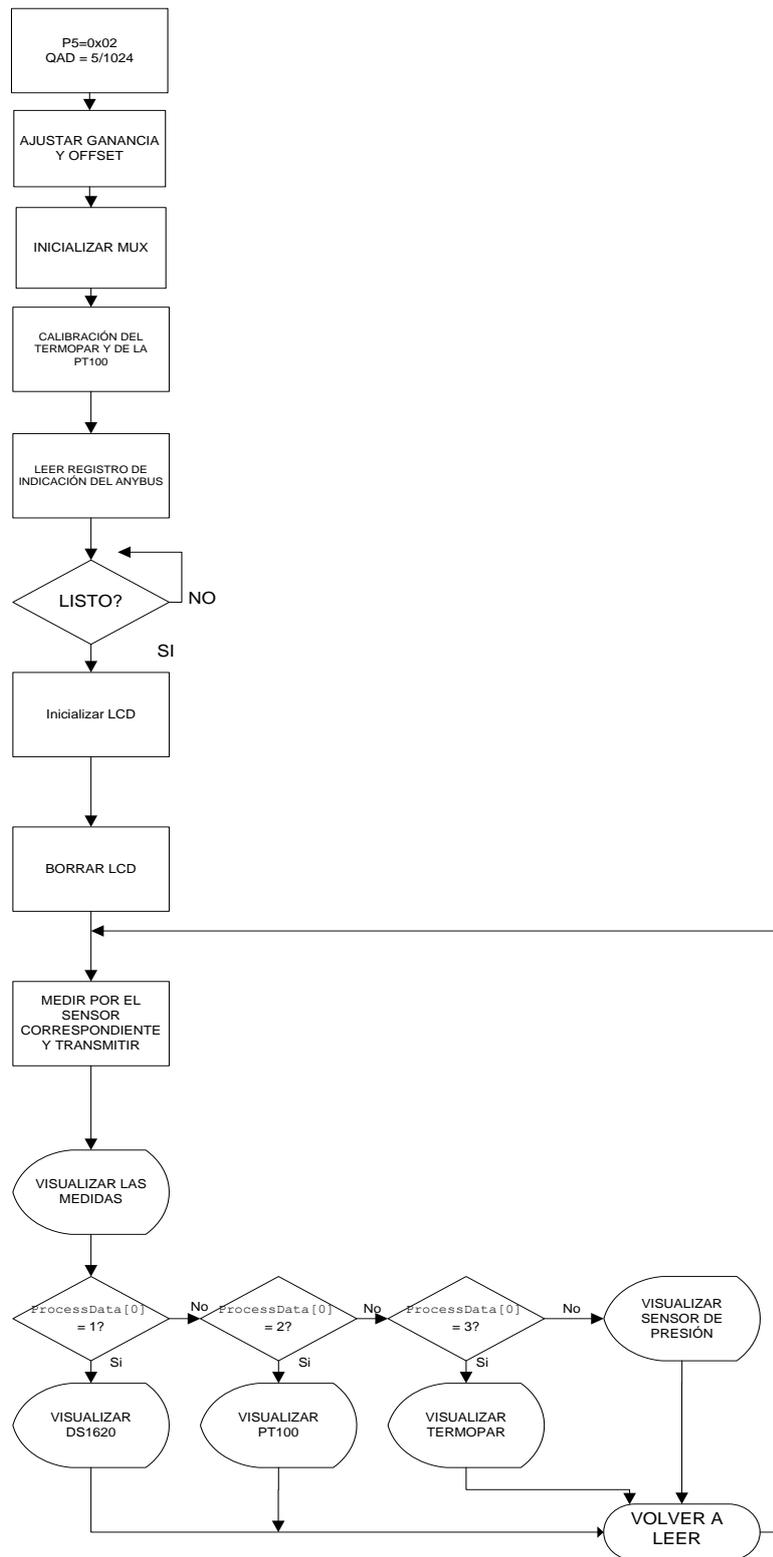


Figura 32. Flujoograma del cuerpo principal

## Capítulo 6. Arquitectura del Transmisor Universal Inteligente : Nivel Software.

Antes de nada, cabe decir que se trata de un sistema Master-Slave en el que una aplicación maestra, basada en un software externo e instalada sobre un ordenador personal, demanda una medida al UST conectado al bus de campo, vía CM, que actúa como esclavo y transmitiendo la información relativa al sensor que previamente haya seleccionado el maestro.

La figura 33, muestra la topología del sistema de trabajo, instalado en el Laboratorio de Automática de la Escuela Técnica Superior de Náutica de Máquinas, de la Universidade da Coruña y que se retomará en el capítulo relativo al caso de uso.

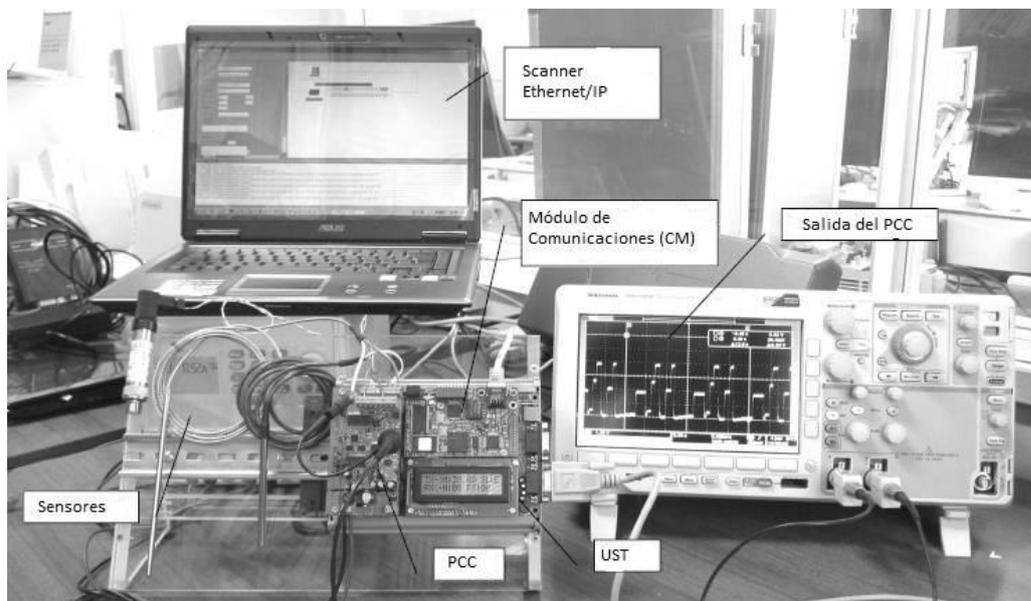


Figura 33. Topología del sistema Master-Slave

### 6.2.1 Módulo main()

Remitiéndonos al cuerpo principal del programa (main()), y tal y como muestra la figura 32, se descompone en unos bloques bien diferenciados:

- ✓ Inicialización de variables.
- ✓ Inicialización del multiplexor analógico.
- ✓ Asignación de los valores de ganancia y offset para los sensores seleccionados.
- ✓ Establecimiento de un bucle de espera con el Mailbox del módulo de comunicaciones.
- ✓ Una vez iniciada la comunicación, se inicializa la pantalla de cristal líquido del CM.
- ✓ En modo cíclico, se realiza la lectura del sensor y se visualizan los resultados, además de realizar la comunicación con el mailbox para la interacción entre el bus de campo y la aplicación maestra.

#### 6.2.2 Subrutinas

Como ya se indicó con anterioridad, sólo se explicarán aquellas subrutinas de importancia crítica para entender el funcionamiento del sistema.

##### 6.2.2.1 Obtencion ganancia offset()

Esta subrutina permite sacar los valores de ganancia y offset que se introducirán en el PGIA en base a los márgenes mínimo y máximo del sensor.

Esta subrutina cuyo flujograma principal se muestra en la figura 34 y su código se explica en la tabla 5 se descompone en tres subrutinas: `lectura_datos()`, `saca_ganancia_offset()` y `busca_valores_potencimetro()`, cuyos flujogramas se detallan en las figuras 35, 36 y 37 y su código en las tablas 6, 7 y 8.

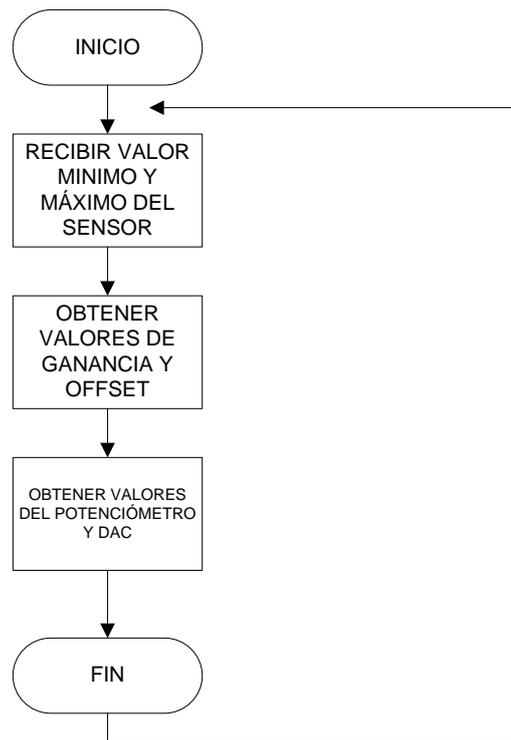


Figura 34. Flujograma principal de Obtencion\_ganancia\_offset()

<u>Explicación del código</u>		
Parámetros de entrada	void (ninguno)	
Valor de salida	void (ninguno)	
Función	El módulo principal estructura el programa (no aparecerá en la versión implementada). Se aceptan los valores mínimo y máximo del sensor, se obtienen los valores de offset y ganancia y por último los valores de los potenciómetros y DAC.	

Tabla 5. Explicación del cuerpo principal de Obtencion\_ganancia\_offset()

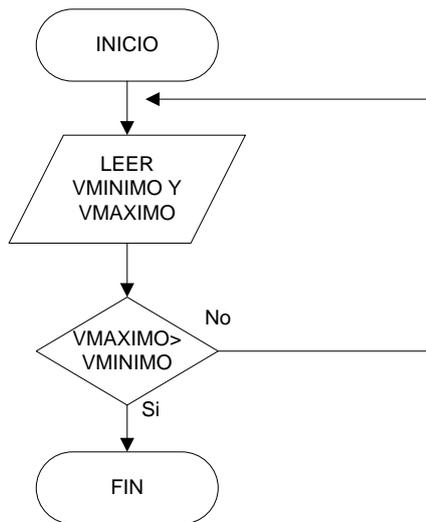


Figura 35. Flujograma de lectura\_datos()

<u>Explicación de la subrutina</u>		
Parámetros de entrada	void(ninguno)	
Valor de salida	void (ninguno)	
Función	Esta subrutina lee los valores mínimo y máximo de salida del sensor (en voltios)	

Tabla 6. Explicación de lectura\_datos()

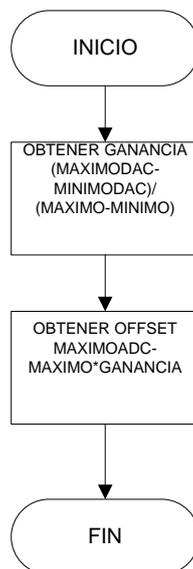


Figura 36. Flujograma de saca\_ganancia\_offset()

<u>Explicación de la subrutina</u>		
Parámetros de entrada	minimo float , maximo float	
Valor de salida	void (ninguno)	
Función	<p>Esta subrutina resuelve el sistema de ecuaciones del que se obtiene ganancia y offset.</p> $MINIMOADC = GANANCIA * VALORMINIMO + OFFSET$ $MAXIMOADC = GANANCIA * VALORMAXIMO + OFFSET$ <p>Luego</p> $GANANCIA = \frac{MAXIMOADC - MINIMOADC}{VALORMAXIMO - VALORMINIMO}$ $OFFSET = MAXIMOADC - GANANCIA * VALORMAXIMO$ <p>En la práctica <math>MAXIMOADC = 5V</math> , <math>MINIMOADC = 0V</math></p>	

Tabla 7. Explicación de saca\_ganancia\_offset

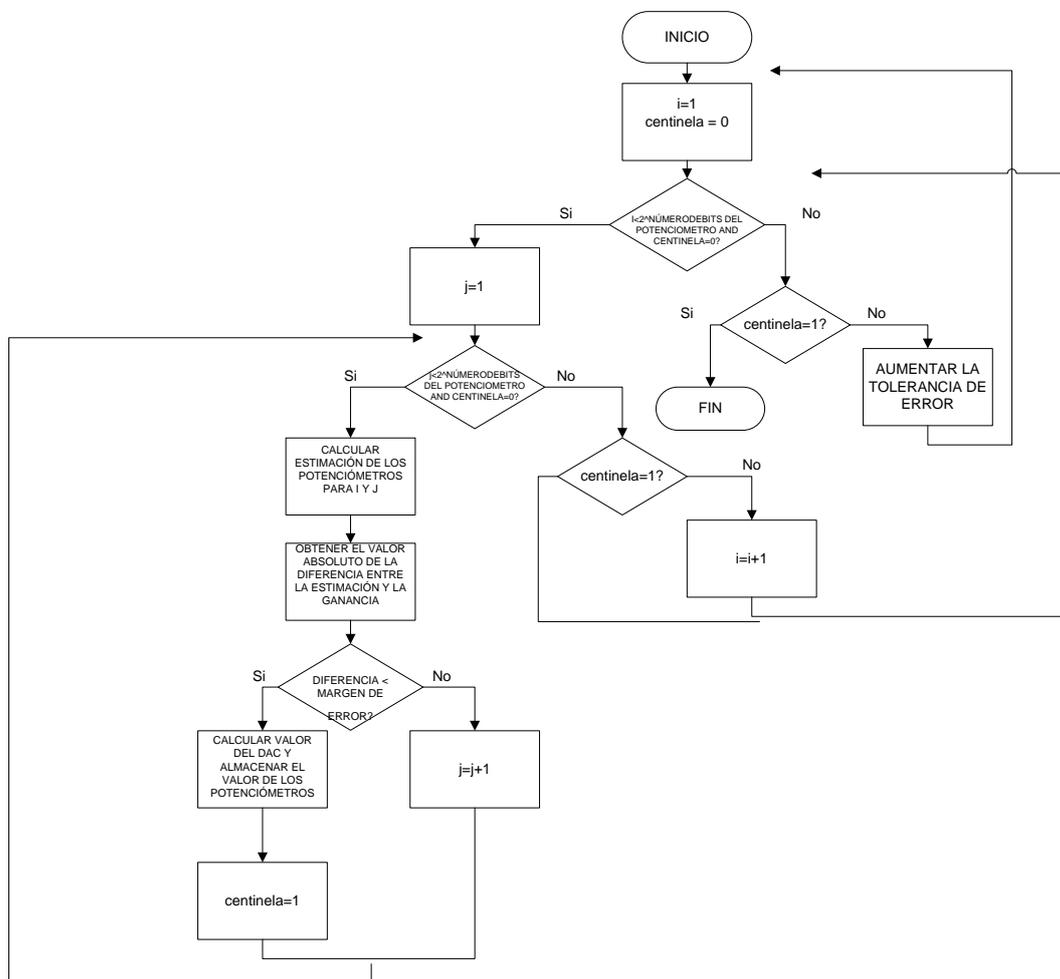


Figura 37. Flujoograma de busca\_valores\_potenciometro()

<u>Explicación de la subrutina</u>		
Parámetros de entrada	ganancia float, offset float, tolerancia float	
Valor de salida	void (ninguno)	
Función	<p>Esta subrutina resuelve obtiene el valor de los potenciómetros digitales y de la tensión de salida en voltios, a partir de los valores ya calculados de ganancia y offset.</p> <p>Se tiene un margen de error (tolerancia) previo (por defecto cero) y se itera el valor de los potenciómetros desde 1 hasta 256 (8 bits, luego <math>2^8=256</math>).</p> <p>Se calcula</p> $\text{Ganancia} = 2 * \left[ 1 + \frac{RPD2_{LOW0}}{RPD2_{WOHO}} \right] * \left( \frac{RPDI_{LIWI}}{RPDI_{LIHI}} \right),$ <p>teniendo en cuenta que</p> $\left[ \frac{RPDx_{LyWy}}{RPDx_{WyHy}} \right] = \frac{DvPDx_y}{2^n - DvPDx_y}$ <p>Si la diferencia entre el valor estimado y la ganancia deseada queda por debajo de la tolerancia, entonces el valor de los potenciómetros es el valor actual de iteración y se calcula el valor del DAC</p> <p>Si se encuentra el valor deseado, una variable llamada centinela detiene los bucles para evitar iteraciones innecesarias. Si no se encuentra, se pasa al siguiente valor, con un máximo de <math>256*256</math> iteraciones.</p> <p>Si el valor buscado no es posible con la tolerancia deseada, ésta se incrementa y la subrutina se autoinvoca (recursividad).<sup>1</sup></p>	

Tabla 8. Explicación de busca\_valores\_potenciometro()

1 Dos consideraciones : en primer lugar, el sistema tiene dos grados de libertad (cada uno de los potenciómetros digitales), con lo cual podría haber más de un valor posible. Por ello, la subrutina para cuando se llega a la primera combinación de valores digitales potenciométricos que cumplan la condición de tolerancia. En segundo lugar, uno de los "riesgos" de la recursividad podría ser que la subrutina no tuviese fin. No ocurre en este caso, ya que en el caso más desfavorable (que no se va a dar) se detendría ante una tolerancia del 100%.

## Capítulo 6. Arquitectura del Transmisor Universal Inteligente : Nivel Software.

### 6.2.2.2 serie()

Esta subrutina gestiona la comunicación serie y los periféricos (por ejemplo el sensor DS1620). El flujograma se muestra en la figura 38 y el código se detalla en la tabla 9.

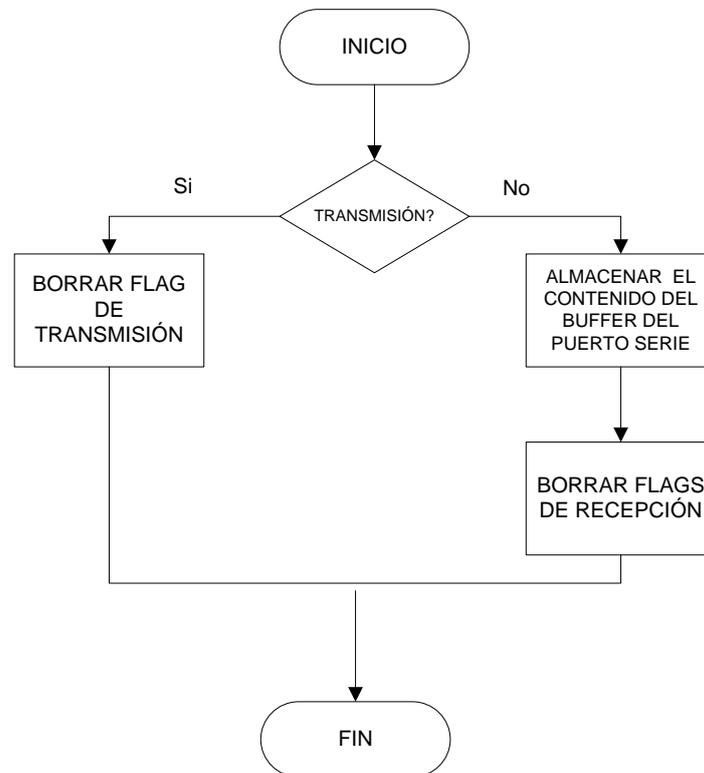


Figura 38. Flujograma de serie()

<b><u>Explicación de la subrutina</u></b>	
Parámetros de entrada	void (ninguno)
Valor de salida	void (ninguno)
Función	Permite hacer una transmisión serie gestionada por la interrupción correspondiente del microcontrolador (interrupción 4). Ya que la interrupción puede vectorizarse ante una transmisión o una recepción, se testea el flag de transmisión. Si está a uno (transmisión), simplemente se limpia. Si no es así (recepción), se guarda en una variable (datoledo) el buffer del puerto serie, y se limpian los flags.

Tabla 9. Explicación de serie()

6.2.2.3 calibrar termopar k()

Esta subrutina realiza, a través de un método empírico, el calibrado de un termopar tipo K, para reducir el ruido en el mismo, situándolo en el punto medio de trabajo, a través de un bucle incremental de los valores de offset.

La tabla 10 explica el código y la figura 39 muestra el flujograma correspondiente.

<u>Explicación de la subrutina</u>		
Parámetros de entrada	void (ninguno)	
Valor de salida	void (ninguno)	
Función	Esta subrutina, a través de un método empírico, realiza el calibrado del termopar tipo K. Para ello asigna la ganancia correspondiente a los potenciómetros digitales y un offset inicial a través del DAC. A través de un bucle se va incrementando el offset, hasta que la salida del PGIA (leída a través del convertidor A/D del microcontrolador da un valor aproximado de 2.5 VDC, lo que pondrá al termopar en un punto medio de trabajo. El convertidor A/D no trabaja por interrupción : trabaja en modo sencillo y por testeo del flag BSY (busy flag), que se limpia por hardware cuando termina la conversión [34].	

Tabla 10. Explicación de CALIBRAR\_TERMOPAR\_K

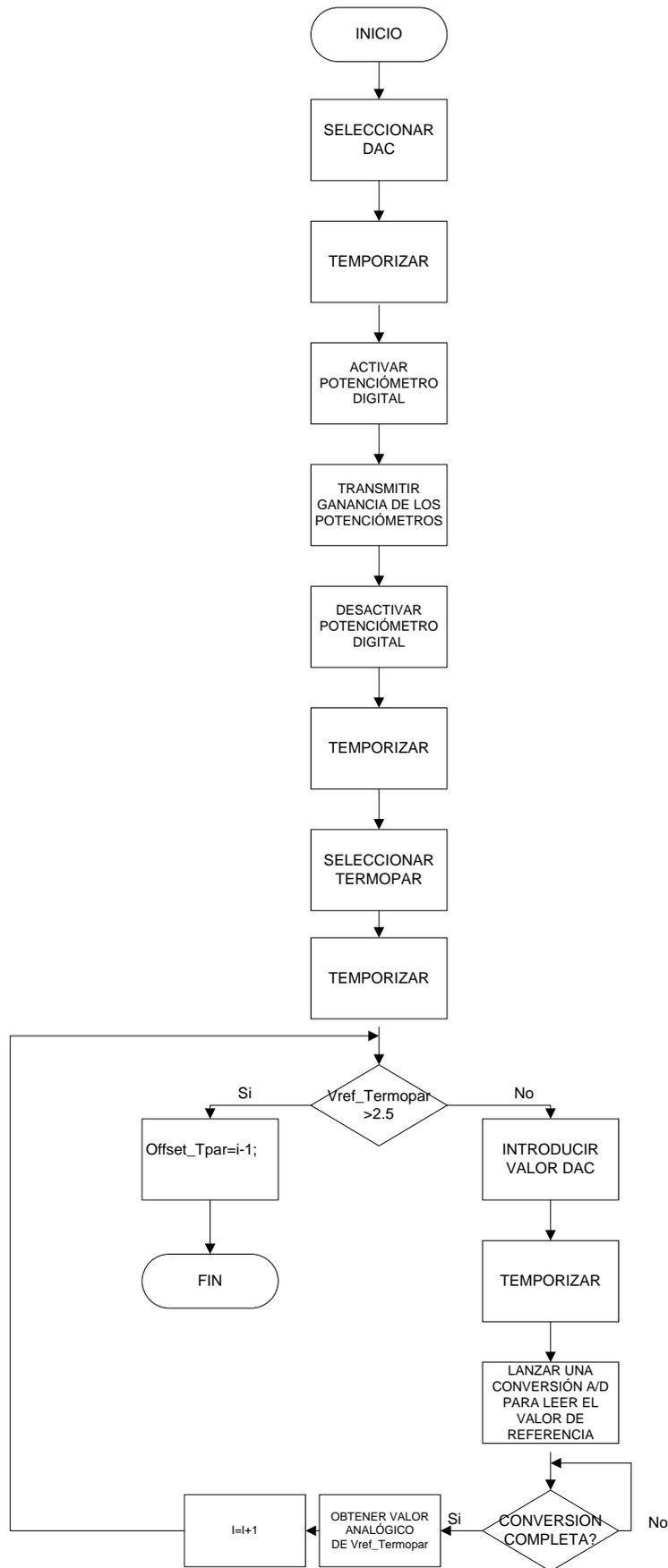


Figura 39. Flujoograma de calibrar\_termopar\_k()

6.2.2.4 termopar k()

Esta subrutina realiza las medidas a través del termopar tipo K, previamente calibrado.

La tabla 11 explica el código y la figura 40 muestra el flujograma correspondiente.

<u>Explicación de la subrutina</u>		
Parámetros de entrada	void (ninguno)	
Valor de salida	void (ninguno)	
Función	<p>Esta subrutina, gestiona las medidas por el termopar. Una vez calibrado el termopar, lo selecciona y asigna la ganancia y offset debidos al PGIA.</p> <p>Para obtener la tensión de salida, lee a través del convertidor A/D la salida del PGIA y le resta <math>V_{ref} - T_{par}</math> (valor de calibrado).</p> <p>Para obtener la temperatura, multiplica la tensión por 19.3647135 y le suma la temperatura ambiente leída por el DS1620.</p>	

Tabla 11. Explicación de termopar\_k()

Consideraciones acerca de la obtención de la temperatura por el termopar:

a) La tensión de salida del amplificador sería:

$V_o = K * \alpha * T_m$ , donde K es la ganancia del amplificador,  $T_m$  es la temperatura en la unión del termopar (temperatura a medir) y  $\alpha$  es el coeficiente de Seebeck, propio de cada tipo de termopar [2,3] y que en el caso del tipo K es de  $41\mu V/^{\circ}C$ .

## Capítulo 6. Arquitectura del Transmisor Universal Inteligente : Nivel Software.

De ahí, se obtiene la ecuación 13, que expresa la temperatura de unión del termopar, en función de la tensión de salida, la ganancia del amplificador y el coeficiente de Seebeck.

$$T_m = \frac{V_o}{K \cdot \alpha}$$

Ecuación 13. Temperatura de unión del termopar

Como  $K = 1259.5240$  y  $\alpha = 41 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ,  $K \cdot \alpha = 0,051640484$ , se tiene  $T_m = V_o \cdot 19,3647135^\circ\text{C} / \mu\text{V}$ .

b) La temperatura medida por el termopar debe ser la de unión (unión caliente) de los dos metales o aleaciones que la conforman. La unión fría debería mantenerse a una temperatura constante, usándose para ello técnicas como la del cubo de hielo, efectivas pero poco operativas. Por ello se opta por dejar la unión fría a temperatura ambiente, medir ésta con un sensor de temperatura distinto (en este caso, con el sensor de temperatura DS1620 [25]), sumarlas y así obtendremos el equivalente a una medida con el termopar con la unión fría a  $0^\circ\text{C}$ .

De esa forma, se tiene la ecuación 14 que expresa la tensión del termopar entre su unión caliente y su unión fría.

$$V_{tm,tamb} = V_{tm,0} + V_{0,tamb}$$

Ecuación 14. Tensión del termopar

Donde  $t_m$  es la temperatura a medir (unión caliente),  $t_{amb}$  es la temperatura ambiente (unión fría),  $V_{tm,tamb}$  es la tensión en el termopar con la unión fría sin compensar y  $V_{tm,0}$  es la tensión de salida del termopar compensado.

Teniendo en cuenta que  $V_{tamb,0}$  es la tensión de salida de un termopar que midiese la temperatura ambiente, de la ecuación 14 se tendría que:

$$V_{tm,0} = V_{tm,tamb} + V_{tamb,0}$$

Extrapolándolo a temperaturas [36], se llega a la ecuación 15 que refleja la temperatura medida por un termopar compensado en función de la temperatura medida por el termopar sin compensar y la temperatura ambiente.

$$T_{tm,0} = T_{tm,tamb} + T_{tamb,0}$$

Ecuación 15. Temperatura medida por un termopar compensado

Es decir: *La temperatura medida por el termopar compensado es igual a la temperatura medida por el termopar sumada a la temperatura ambiente.*

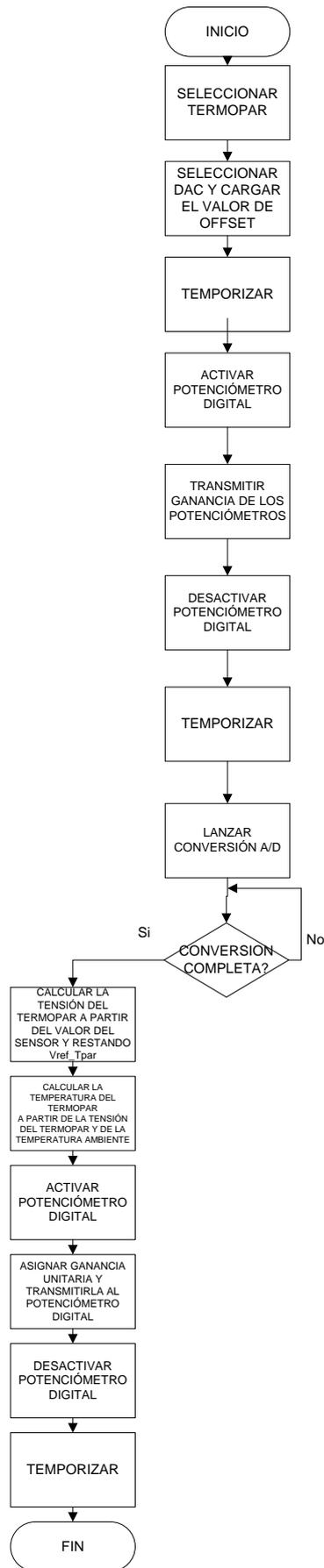


Figura 40. Flujograma de termopar\_k()

6.2.2.5 calibrar PT100()

Esta subrutina calibra la PT100 restando el error producido por el valor óhmico de los hilos de conexión.

La figura 41 muestra el flujograma correspondiente y la tabla 12 la explicación del código.

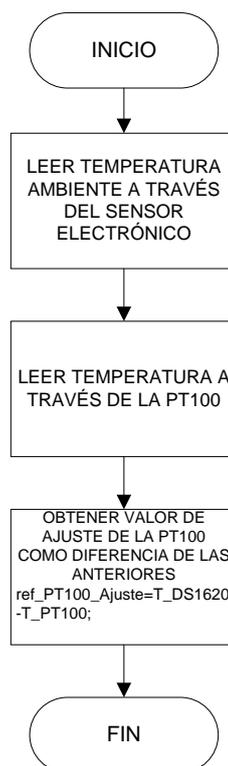


Figura 41. Flujograma de calibrar\_PT100()

## Capítulo 6. Arquitectura del Transmisor Universal Inteligente : Nivel Software.

<u>Explicación de la subrutina</u>		
Parámetros de entrada	void (ninguno)	
Valor de salida	void (ninguno)	
Función	Esta subrutina calibra una PT100, restando el error que se produce por efecto de variación de la resistencia a consecuencia del valor óhmico de los hilos de conexión. Para ello, se mide la temperatura ambiente con el sensor electrónico y se le resta el valor de la PT100, siendo esa diferencia el valor de calibración [36,37,38].	

Tabla 12. Explicación de CALIBRAR\_PT100()

### 6.2.2.6 PT 100()

Esta subrutina realiza la medida de la temperatura a través de la PT100 previamente calibrada [37,38].

La tabla 13 describe el código y las figuras 42 y 43 representan su flujograma.

<u>Explicación de la subrutina(I)</u>		
Parámetros de entrada	void (ninguno)	
Valor de salida	void (ninguno)	
Función	Esta subrutina usa el DAC para establecer un valor inicial no nulo del punto medio del puente de Wheatstone en el que va montada la PT100. A través de un bucle se dan valores al DAC (tras medir con referencia a masa) hasta que se obtiene un valor no nulo (es un método empírico).  Una vez obtenido el valor de referencia, se saca la tensión en extremos de la PT100 y a partir de ahí, la temperatura en la misma.	

Tabla 13. Explicación de PT100()

Consideraciones acerca de la obtención de los valores de salida del puente de Wheatstone:

Se parte del esquema del puente de Wheatstone, ya conocido y que es alimentado a 5V y se llega a la ecuación 16.

$$V_{DIFF} = \frac{5}{R_0 + R_0(1 + \alpha t)} \cdot R_0(1 + \alpha t) - 2,5$$

Ecuación 16. Tensión diferencial en un puente de Wheatstone

Donde  $V_{DIFF}$  es la tensión diferencial del puente,  $\alpha$  es el coeficiente de variación con la temperatura,  $t$  es la temperatura y  $R_0$  el valor de la resistencia a 0°C.

De ahí se llega a la ecuación 17 que expresa la temperatura medida en el puente.

$$t = \frac{2V_{DIFF}}{\alpha(2,5 - V_{DIFF})}$$

Ecuación 17. Expresión de la temperatura medida en el puente

Capítulo 6. Arquitectura del Transmisor Universal Inteligente : Nivel Software.



Figura 42. Flujograma de PT\_100() (1.2)

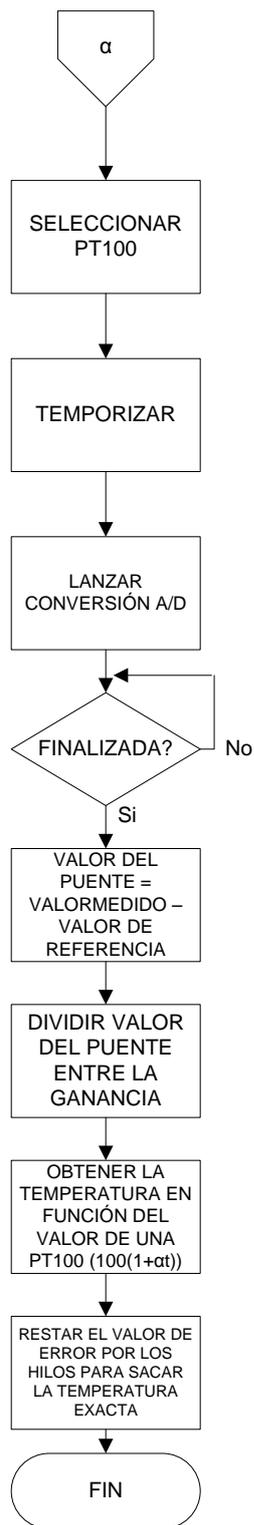


Figura 43. Flujograma de PT\_100 () (2.2)

## Capítulo 6. Arquitectura del Transmisor Universal Inteligente : Nivel Software.

### 6.2.2.7 presion 4 20mA()

Esta subrutina permite obtener el valor de salida de un sensor de presión con interface en corriente 4..20mA.

La tabla 14 explica el código y la figura 44 refleja su flujograma.

<b><u>Explicación de la subrutina</u></b>		
Parámetros de entrada	void (ninguno)	
Valor de salida	void (ninguno)	
Función	Permite obtener la presión a partir del sensor que da una salida en corriente 4..20mA.  A través de una resistencia de 250Ω, se produce una caída de tensión que se lee por el convertidor A/D (como en todos los casos anteriores trabajo en modo single). La tensión medida permite obtener de forma indirecta, la presión de salida.  Una corriente entre 4 y 20 mA, da una caída de tensión en la resistencia de 250Ω entre 1 y 5V.	

Tabla 14. Explicación de `presion_4_20mA()`

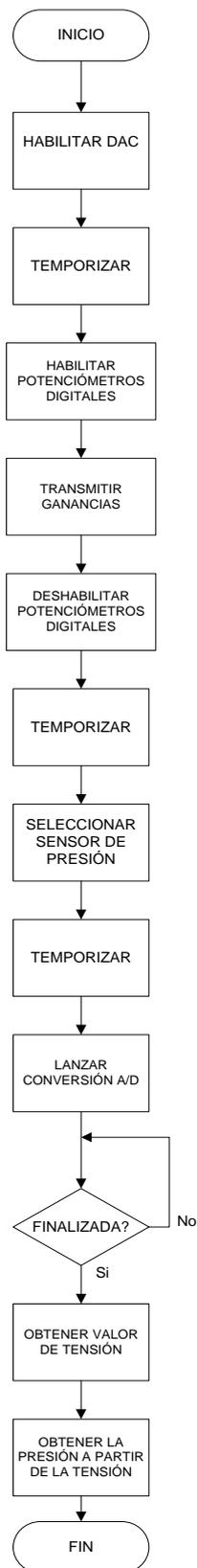


Figura 44. Flujograma de `presion_4_20mA(void)`

## Capítulo 6. Arquitectura del Transmisor Universal Inteligente : Nivel Software.

### 6.2.2.8 DS1620 ()

Esta subrutina realiza la medida de la temperatura ambiente a través del sensor digital 1620.

La tabla 15 explica el código y las figuras 45 y 46 reflejan su flujograma.

<b><u>Explicación de la subrutina</u></b>	
Parámetros de entrada	void (ninguno)
Valor de salida	void (ninguno)
Función	<p>Esta subrutina permite leer la temperatura ambiente a través del sensor digital DS1620 [25].</p> <p>Conectada al microcontrolador a través del puerto serie, se comunica a través de mensajes, utilizándose un sistema conversacional en el que el se lanza un mensaje al sensor, se espera en modo de bajo consumo (idle) hasta que la respuesta llega.</p> <p>Tras gestionar la configuración, se envía la orden de leer la temperatura.</p> <p>Para ello hay que hacer dos lecturas: en la primera se lee el byte de temperatura y en la segunda el signo.</p> <p>Si es un número negativo (aparece en complemento a 2) se descomplementa.</p> <p>Dado que el sensor tiene una resolución de 0,5°C se comprueba si el valor es impar. En ese caso, tiene parte fraccionaria; en otro caso es valor entero.</p> <p>Por último se divide entre dos (el sensor da la salida multiplicada) y así se obtiene la parte entera de la temperatura.</p>

Tabla 15. Explicación de DS1620

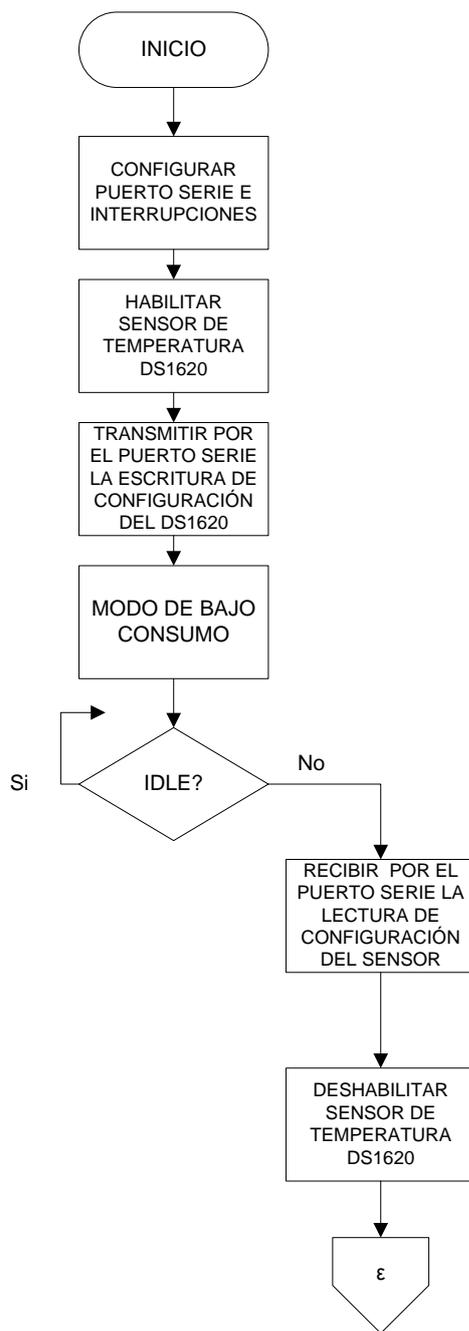


Figura 45. Flujograma de DS1620 () (1.2)

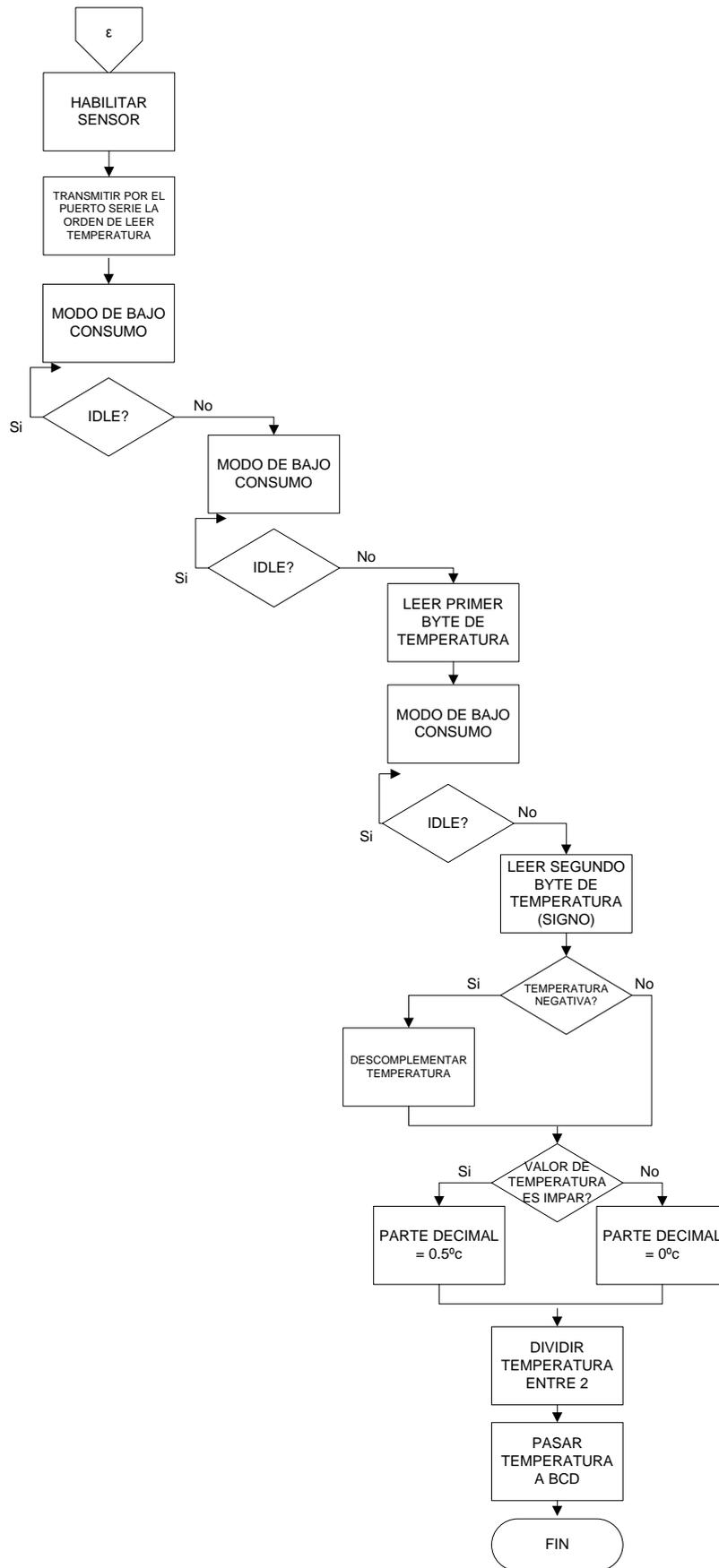


Figura 46. Flujograma de DS1620 () (2.2)

6.2.2.9 ExchangeData ()

Esta subrutina gestiona las peticiones de lectura por parte del maestro.

La tabla 16 explica el código y la figura 47 muestra su flujograma.

<b><u>Explicación de la subrutina</u></b>		
Parámetros de entrada	void (ninguno)	
Valor de salida	void (ninguno)	
Función	Esta subrutina gestiona las peticiones de lectura por parte del maestro. Tras hacer una lectura de los sensores, determina cuál es el que tiene que transmitir el dato al maestro, y es lo que hace.	

Tabla 16. Explicación de ExchangeData

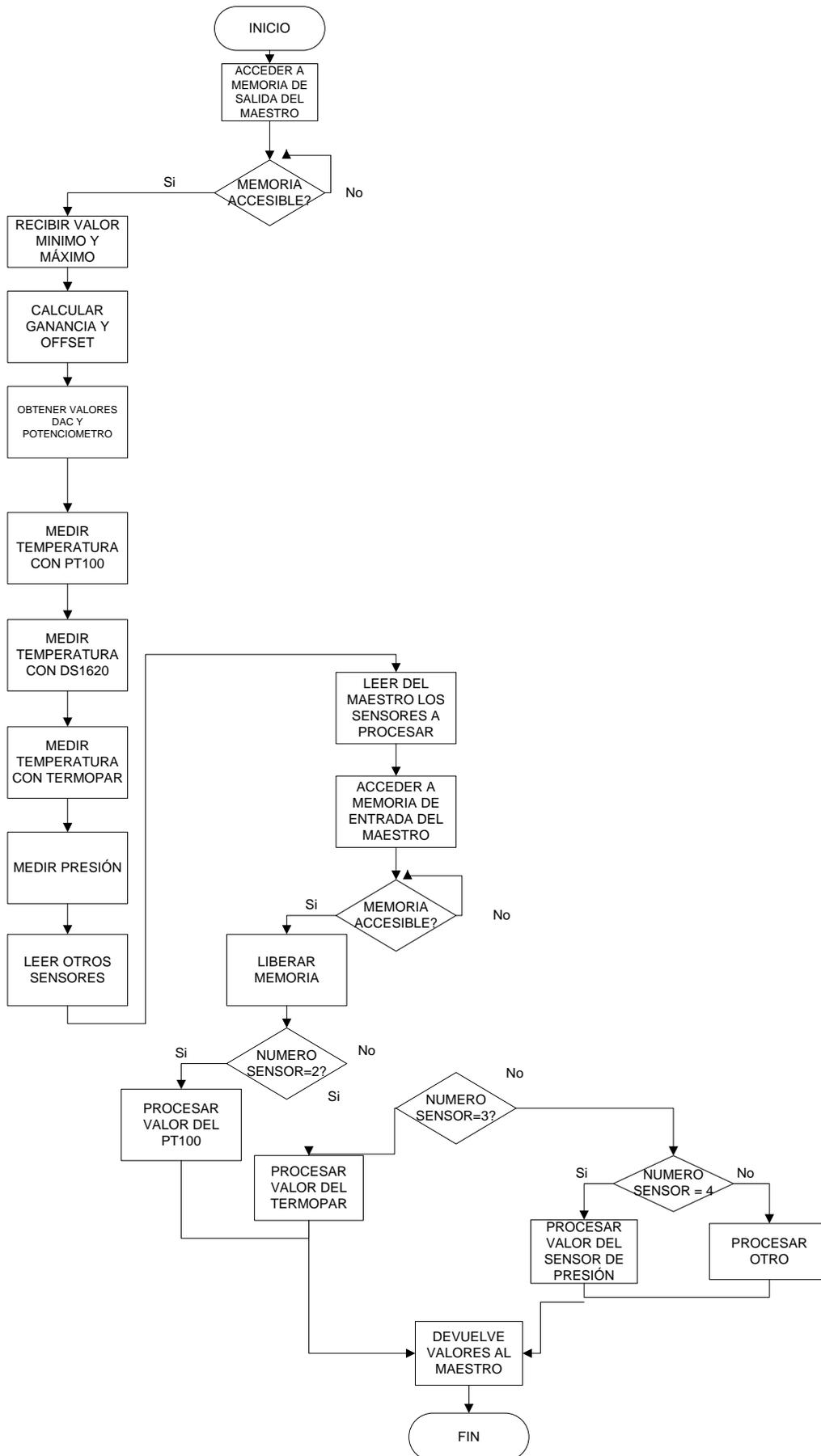


Figura 47. Flujograma de ExchangeData()



## Capítulo 7

### Mejoras del Prototipo

*Hagas lo que hagas, hazlo bien. (Abraham Lincoln).*

## **7.1 Introducción**

En este capítulo se explican las mejoras introducidas o en fase de implementación, en el prototipo inicial del UST.

El modelo inicial, resultado de dos años de proceso de investigación y desarrollo, y que es el que genera el prototipo con número de registro de patente 201300292, ha sido sometido a una fase de refinamiento sucesivo por parte de los miembros del grupo de investigación en Ciencia y Técnica Cibernética de la Universidade da Coruña, que se plasma en los aspectos hardware, software y ergonómico y que se pasan a describir.

## **7.2 Mejoras en el prototipo**

El hardware, puede decirse que ha tenido una fase de investigación y desarrollo plenamente madura, en tanto que se han seleccionado los componentes y elementos apropiados, en aras de optimizar costes y eficiencia energética, sin menoscabo de los requisitos ineludibles de precisión, exactitud y repetibilidad deseados. Obviamente, dentro de las mejoras hardware no se incluye nada relativo a los diferentes sensores conectables a la entrada, englobados en un mercado en constante evolución. Tampoco se plantea una mejora en el módulo de comunicaciones, supeditado a los diferentes productos que pueda ofertar HMS u otra empresa comercial del sector.

El diseño se realizó con la herramienta software ORCAD, un paquete de CAD/CAM/CAE electrónico de uso muy común y con el que se generaron los circuitos impresos correspondientes.

## Capítulo 7. Mejoras del Prototipo.

### 7.2.1 Filtro programable

La mejora más palpable que se puede plantear, es la incorporación de un filtro programable [39]. Para ello, se hace interesante la utilización de un circuito integrado ad-hoc, pudiendo destacarse el TLC04 de Texas Instruments, uno de los más habituales del mercado.

El citado circuito [40], es un filtro paso bajo tipo Butterworth de cuarto orden, basado en condensadores conmutados y cuya frecuencia de corte se fija en función de la frecuencia de entrada del circuito integrado, con una razón de 50:1 y un error del 0,8%.

El rango de las frecuencias de corte queda entre 0.1Hz y 30KHz (más que suficiente para el transmisor) y con una alimentación de  $\pm 2.5$  VDC.

La frecuencia de entrada es fácilmente asignable a través del propio microcontrolador previa modificación del software. La salida se toma de cualquier patilla disponible de la MCU. Otra opción sería implementar un aetstable de frecuencia variable, si bien, su precisión sería menor.

Sin pretender entrar en el aspecto del código fuente preciso para implementar la señal cuadrada (muy trivial, por otra parte) se añade un flujograma (figura 48) para explicar la implementación del mismo.

Es indicado utilizar alguno de los timers del microcontrolador (en el caso del 80C517A sería indicado usar el Timer 2 por su capacidad de preescalado y de autorrecarga [34], asociados a su interrupción correspondiente.

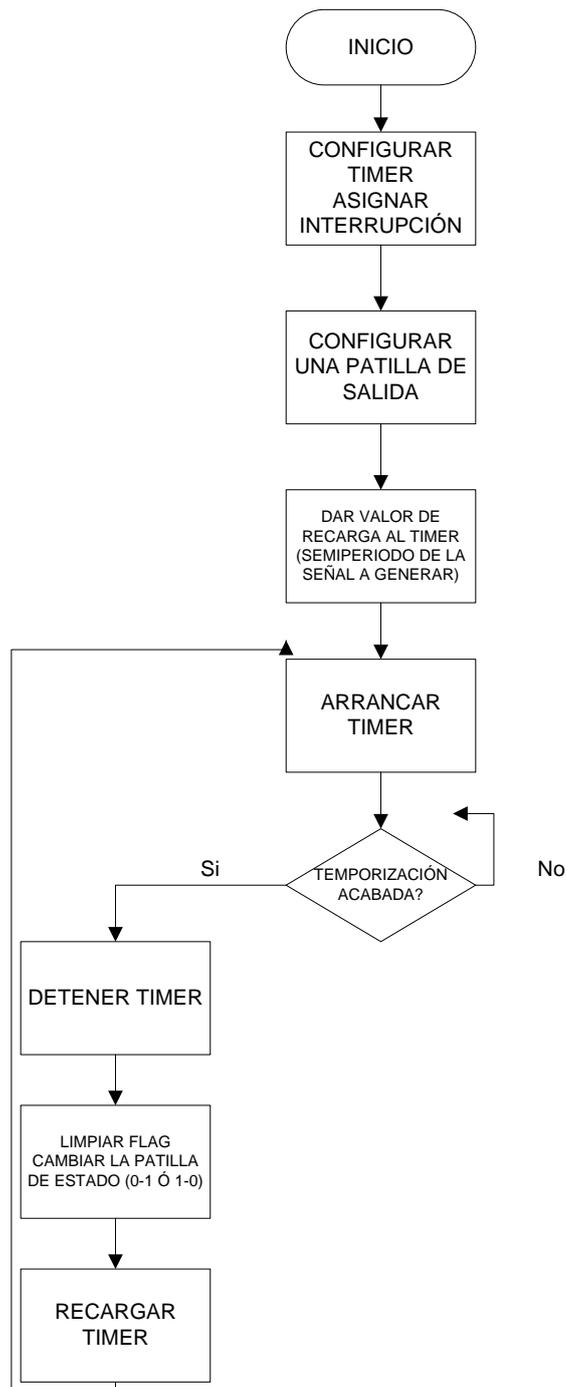


Figura 48. Flujograma de la generación de la señal de reloj del filtro programable

## Capítulo 7. Mejoras del Prototipo.

Sería obligado incluir un mecanismo de introducción de los valores de frecuencia en el microcontrolador, de manera que presente una retroalimentación con el usuario. La forma usual sería utilizar algún periférico de entrada (pulsador, teclado matricial) y uno de salida (la propia pantalla LCD del módulo de evaluación Anybus) de manera que el usuario visualice la frecuencia actual y pueda cambiarla a su voluntad (dentro del rango de la MCU y del propio filtro).

### 7.2.2 Utilización del DAC en modo bipolar

Sin considerarse una mejora al uso, si es necesario hacer una modificación del diseño, para poder trabajar con valores bipolares del DAC: la llamada configuración de cuatro cuadrantes.

El fabricante proporciona diferentes soluciones para obtener valores positivos y negativos en el DAC [30]. La elegida ha sido la opción de cuatro cuadrantes.

Teniendo en cuenta que en el caso de uso explicado en el capítulo 8, se hace una referencia extensa a la citada configuración (para proporcionar los valores negativos del offset del PGIA), se deja para ese apartado la explicación detallada de la misma.

### 7.2.3 Utilización de una EEPROM externa.

Es evidente que proporcionar una capacidad de almacenamiento secundaria de datos, podría ser de enorme interés en una potencial mejora del transmisor.

El uso de una EEPROM podría favorecer al sistema en dos aspectos: por una parte se podrían almacenar datos del proceso y por otra, se podrían guardar datos relativos a la calibración y acondicionamiento de los sensores.

Un ejemplo de este tipo de memoria podría ser el IC 24LC04B con interface serie I2C y una capacidad de 4K [41].

## Capítulo 8

### Caso de Estudio

*No puede ser algo opinable lo que se comprueba en la realidad: aunque puede haber diversas interpretaciones de los hechos, los hechos no pueden negarse ni tergiversarse. (Manuel Carreira Vérez, SJ).*

## **8.1 Introducción**

En este capítulo, como ejemplo de aplicación del UST, va a plantearse la medida de unos valores en una planta real, combinando medidas reales y virtuales, siguiendo el modelo de la figura 49.

Como ya se indicó en apartados anteriores, la implementación de las medidas virtuales, permite cubrir varios aspectos de interés:

- ✓ Obtener aquellas medidas físicas que pueden tener cierto grado de complejidad, pero que pueden ser resueltas fácilmente con modelos matemáticos.
- ✓ Liberarse del uso de sofisticados instrumentos de medida en aquellos entornos industriales especialmente agresivos, tales como las plantas químicas.
- ✓ Reducir el número de dispositivos y elementos de medida e instrumentación.
- ✓ Facilitar las medidas en entornos poco accesibles.

## **8.2 Caso de Estudio**

### 8.2.1 Explicación del supuesto

El caso de estudio pretende explicar que el transmisor funciona con cualquier tipo de sensores y ante cualquier clase de medida.

Va a plantearse el supuesto de unas medidas a través de un sensor virtual con soporte en el UST y que permitirá la monitorización de fluidos midiendo de forma simultánea velocidad, flujo volumétrico, flujo de masa y número de Reynolds, a través de tres medidas básicas: presión, viscosidad y densidad, las cuales son leídas a través de los sensores correspondientes.

## Capítulo 8. Caso de Estudio.

Algunas instalaciones de medición (principalmente para aplicaciones de control en industrias químicas) donde se encuentran gases o fluidos corrosivos, así como fluidos que cristalizan o se solidifican con facilidad y que necesitan instrumentación sofisticada, exigen que se tenga especial cuidado en seleccionar dispositivos de medición adecuados. Con el fin de reducir la cantidad de tales dispositivos se pretende implementar un sistema de medición basado en el uso del UST.

El propio concepto del UST implica que un dispositivo único puede realizar la tarea de medir varias magnitudes diferentes de una manera directa o virtual. Magnitudes tales como temperatura, presión, nivel o flujo pueden medirse directamente o virtualmente basándose en modelos matemáticos por medio de UST como se muestra en la Figura 50. Otros aspectos como el diagnóstico, la vigilancia de la condición y la detección de fallas también son susceptibles de ser implementadas con esta técnica.

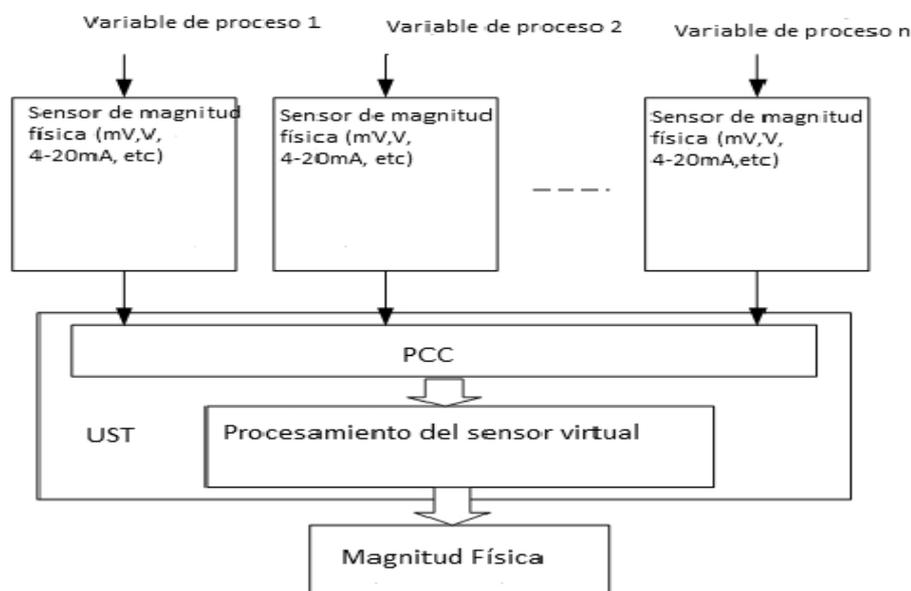


Figura 49. Estructura de medidas a través del UST

Se va a considerar una planta con los elementos precisos para para la adquisición de las magnitudes físicas, que pueden verse en la figura 50: (a) una sección de tubería recta con un fluido homogéneo a través de la misma, (b) un tubo de Pitot, (c y d) dos entradas conectadas a los respectivos sensores de viscosidad ( $\mu S$ ) y densidad ( $\rho S$ ) y (e y f), dos entradas conectadas a sendos sensores de presión ( $pS1$ ) y ( $pS2$ ). Por último está el propio UST(g).

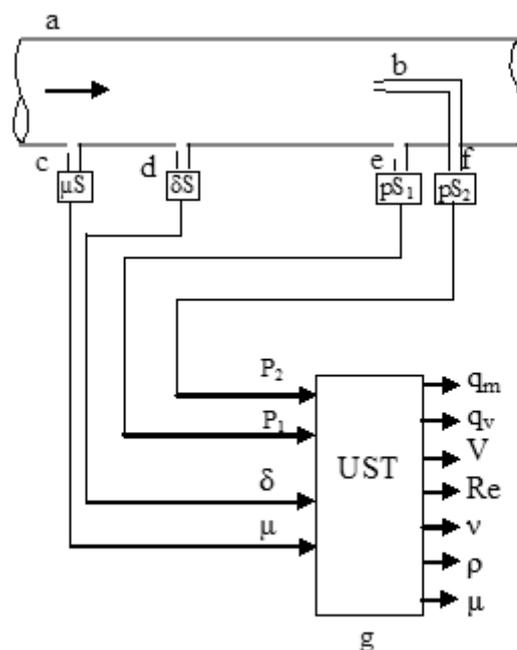


Figura 50. Esquema del sensor virtual y su interrelación con las magnitudes

Se realizarán cuatro medidas: la densidad del fluido ( $\rho S$ ), la viscosidad del mismo ( $\mu S$ ) y la presión ( $pS1$ ) y ( $pS2$ ).

El tubo de Pitot es el elemento primario de medida de la velocidad del fluido dentro de la tubería. Hay dos entradas para la medida de presión del fluido: una es para la medida de la presión estática del fluido ( $P_{stat}$ ) y otra para la presión dinámica del fluido ( $P_{dyn}$ ). La presión diferencial (en pascales) entre ambas entradas e) y f) se denomina gradiente de presión  $Pd1$  y

## Capítulo 8. Caso de Estudio.

la relación entre esta magnitud y la velocidad del fluido se representa por la ecuación 18.

$$P_{d1} = P_{dyn} - P_{stat} = P_1 - P_2 = \rho \frac{V^2}{2}$$

Ecuación 18. Relación entre el gradiente de presión y la velocidad del fluido

Donde  $P_{d1}$  es la presión diferencial (Pa)  
 $\rho$  es la densidad del fluido (kg/m<sup>3</sup>)  
 $V$  es la velocidad del fluido (m/s)

De ahí puede deducirse la velocidad del fluido (en m/s) en función de  $P_{d1}$ , tal y como se muestra en la ecuación 19.

$$V = \sqrt{\frac{2P_{d1}}{\rho}} \left( \frac{m}{s} \right)$$

Ecuación 19. Expresión de la velocidad del fluido en función del gradiente de presión

Con los valores de la presión diferencial  $P_{d1}$ , la densidad ( $\rho$ ) y la viscosidad ( $\mu$ ), las magnitudes  $Q_v$  (flujo volumétrico),  $Q_m$  (flujo de masa),  $Re$  (número de Reynolds) y  $\nu$  (viscosidad cinemática) pueden obtenerse virtualmente con las ecuaciones 20, 21, 22 y 23.

$$Q_v = AV = A \sqrt{\frac{2P_{d1}}{\rho}} \left( \frac{m^3}{s} \right)$$

Ecuación 20. Expresión del flujo volumétrico

Donde  $A$  es el área de la sección transversal de la tubería.

$$Q_m = Q_v \cdot \rho \left( \frac{Kg}{s} \right)$$

Ecuación 21. Expresión del flujo de masa

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu}$$

Ecuación 22. Número de Reynolds

Donde  $D$  es el diámetro de la sección transversal de la tubería.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{m^2}{s} \right)$$

Ecuación 23. Expresión de la viscosidad cinemática

### 8.2.2 Diseño del sistema

Para la implementación del sistema de medida se van a utilizar los siguientes elementos:

- ✓ Tubería con un diámetro ( $D$ ) de 0.1m y sección ( $A$ ) de 0.0075m<sup>2</sup>.
- ✓ Líquido: agua.
- ✓ Sensor de viscosidad: VS2 EX D SENSOR con salida en bucle de corriente 4-20 mA. Rango de viscosidad dinámica de 0-25 mPa.s.
- ✓ Sensor de densidad: DIMF 1.3 on salida en bucle de corriente 4-20 mA. Rango de densidad 0 a 5 g/cm<sup>3</sup>.
- ✓ Sensor de presión: Keller PR-21 Y con salida de 0.5 a 4.5V. Rango de presión 2-10 bar.
- ✓ UST.

Las magnitudes físicas a medir tienen unos rangos de:

- Presión: [400 kPa, 900 kPa].
- Viscosidad: [0.5mPa.s, 3mPa.s].
- Densidad: [0.7gm/cm<sup>3</sup>, 3gm/cm<sup>3</sup>].

Los sensores de presión tienen una sensibilidad de 0,5V/bar con una salida a fondo de escala de 4,5V -el sistema sólo usa el 64,5% del rango de medida del sensor-. Para medidas en alta resolución la salida debe ser acondicionada previamente a la conversión A/D en el microcontrolador [42,43]. Para programar el PGIA para medidas en alta resolución se consideran los

## Capítulo 8. Caso de Estudio.

siguientes parámetros: el rango de entrada del convertidor A/D (0-5V), la sensibilidad del sensor y el rango de la magnitud física a medir.

El sensor de presión da unas tensiones de salida -en el caso de estudio- entre 1.5V y 4V, para un margen de presiones entre 4bar y 9 bar. Entonces, para obtener la ganancia y offset del PGIA, se tienen las ecuaciones 24 y 25.

$$0 = G \cdot V_{\min} + \text{Offset}$$

Ecuación 24. Ganancia y offset (1)

$$5 = G \cdot V_{\max} + \text{Offset}$$

Ecuación 25. Ganancia y offset (2)

Donde  $V_{\min}$  es el valor mínimo de salida del sensor,  $V_{\max}$  es el valor máximo de salida del sensor,  $G$  es la ganancia del PGIA y  $\text{Offset}$ , es el valor de salida del DAC. 0 y 5 es el rango de entrada del ADC.

En el caso del sensor de presión, se tiene que:

$$0 = G \cdot 1.5 + \text{Offset}$$

$$5 = G \cdot 4 + \text{Offset}$$

Luego,  $G = 2$  y  $\text{Offset} = -3V$ .

En el caso del sensor de viscosidad, se tiene una sensibilidad de 0.6mA/mPas que convertido a tensión (a través de la resistencia de 250Ω) se tiene una salida en tensión de 0.15V/mPas. En este caso, el sistema sólo usa el 10% del rango del sensor.

Teniendo en cuenta que el rango del sistema está entre 0.5mPas y 3mPas, se tendrá una tensión de salida entre 75 mV y 450mV.

$$0 = G \cdot 0,075 + \text{Offset}$$

$$5 = G \cdot 0,45 + \text{Offset}$$

Luego,  $G = 13,33$  y  $\text{Offset} = -1V$ .

Finalmente, el sensor de densidad tiene una sensibilidad de  $3mA/g/cm^3$  ( $0.75V/g/cm^3$ ) y el sistema sólo usa un 8% de su rango. Teniendo en cuenta que el rango del sistema está entre 0.7 y  $3g/cm^3$ , se tendrá una tensión de salida entre 525mV y 2,25V.

Se tiene que:

$$0 = G \cdot 0,525 + \text{Offset}$$

$$5 = G \cdot 2,25 + \text{Offset}$$

Luego,  $G = 2,9$  y  $\text{Offset} = -1,52V$ .

### 8.2.3 Programación del PGIA

Una vez obtenidos los valores de ganancia y offset para cada sensor, de cara a su acondicionamiento para su uso posterior, es obligado pasar a la parte de la programación del PGIA.

Esto se traduce en dos acciones: por una parte, proporcionar los valores adecuados a los potenciómetros digitales para realizar el ajuste de ganancia; por otra, proporcionar el valor digital correspondiente al DAC para obtener el offset deseado, a partir de la tensión de salida del convertidor D/A.

## Capítulo 8. Caso de Estudio.

### 8.2.3.1 Ajuste de ganancia

Según se vio en el capítulo 4, se tienen las ecuaciones 6 y 8 que expresan la ganancia del amplificador desde el punto de vista analógico y digital del potenciómetro.

$$Ganancia = 2_x \left( 1 + \frac{RPD2_{LOW0}}{RPD2_{W0H0}} \right)_x \left( \frac{RPD1_{L1W1}}{RPD1_{L1H1}} \right)$$

Ecuación 6. Expresión de la ganancia del amplificador

$$\left( \frac{RPD_{xL_yW_y}}{RPD_{xW_yH_y}} \right) = \frac{DvPD_{x_y}}{2^n - DvPD_{x_y}}$$

Ecuación 8. Expresión de la ganancia del amplificador programable en función del valor digital

Por lo tanto, es inmediato obtener el valor de los potenciómetros digitales<sup>1</sup>.

En el caso de estudio, y para cada uno de los sensores, se llega a los siguientes valores de ganancia del PGIA, usando las ecuaciones 6 y 8.

Sensor de Presión:  $DV_{PD1\_1} \quad DV_{PD1\_0} = 120; \quad DV_{PD2\_0} = 30$

$$Ganancia = 2_x \left( 1 + \frac{30}{256-30} \right)_x \left( \frac{120}{256-120} \right) = 1,9989 \approx 2$$

Sensor de viscosidad:  $DV_{PD1\_1} \quad DV_{PD1\_0} = 212; \quad DV_{PD2\_0} = 71$

$$Ganancia = 2_x \left( 1 + \frac{71}{256-71} \right)_x \left( \frac{212}{256-212} \right) = 13,33$$

Sensor de densidad:  $DV_{PD1\_1} \quad DV_{PD1\_0} = 151; \quad DV_{PD2\_0} = 2$

---

1 En el capítulo 6, dedicado al nivel software, se explicó detalladamente el algoritmo para obtener los mismos.

$$Ganancia = 2 \times \left(1 + \frac{2}{256 - 2}\right) \times \left(\frac{151}{256 - 151}\right) = 2,884 \approx 2,9$$

8.2.3.2 Cálculo de la tensión de salida y valor digital del DAC

Partiendo de la ecuación 7 que expresa el offset del PGIA, se tiene que:

$$Offset = \left(1 + \frac{RPD2_{LOW0}}{RPD2_{W0H0}}\right) \times V_{D/A}$$

Ecuación 7. Expresión del offset del amplificador programable

Luego, la ecuación 26 expresa la tensión de salida del convertidor digital analógico en función del offset y del valor del potenciómetro digital 2.

$$V_{D/A} = \frac{Offset}{\left(1 + \frac{RPD2_{LOW0}}{RPD2_{W0H0}}\right)}$$

Ecuación 26. Expresión de la tensión de salida del convertidor digital analógico en función del offset

En el caso de estudio, y para cada uno de los sensores, se llega a los siguientes valores de la tensión de salida del convertidor, usando la ecuación 20.

Sensor de presión: Offset = -3V;  $DV_{PD2\_0} = 30$

$$V_{D/A} = \frac{-3V}{\left(1 + \frac{30}{226}\right)} \approx -2,65V$$

Sensor de viscosidad: Offset = -1V;  $DV_{PD2\_0} = 71$

$$V_{D/A} = \frac{-1V}{\left(1 + \frac{71}{185}\right)} \approx -0,723V$$

## Capítulo 8. Caso de Estudio.

Sensor de densidad: Offset = -1,52V;  $DV_{PD2\_0} = 2$

$$V_{D/A} = \frac{-1,52V}{\left(1 + \frac{2}{254}\right)} \approx -1,51V$$

Finalmente, queda obtener el valor digital de entrada para el DAC, que proporcione la tensión analógica de salida que se acaba de calcular. Para ello es preciso remitir a la configuración de cuatro cuadrantes mencionada en el capítulo anterior, habida cuenta que se necesita una salida bipolar, mostrada en la figura 51.

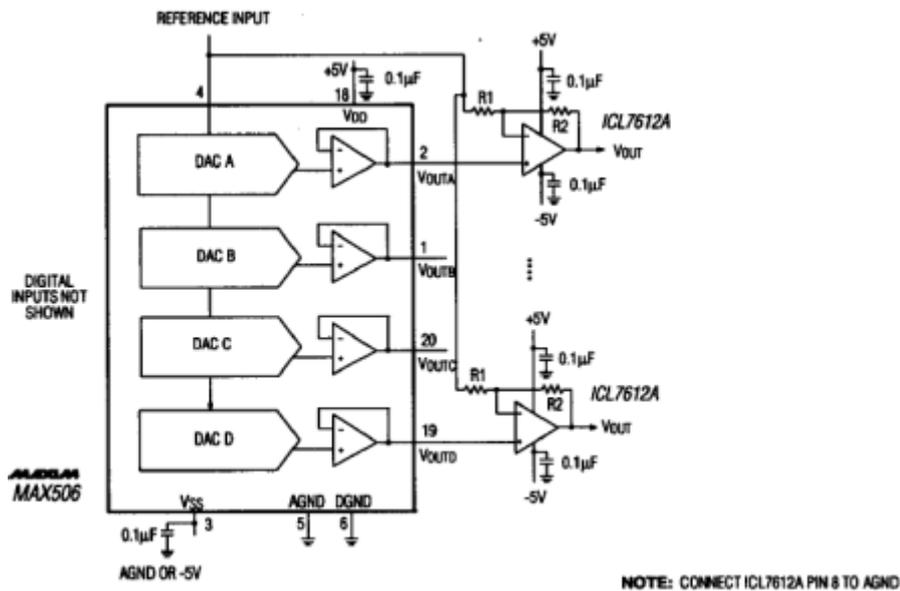


Figura 51. Configuración bipolar del Max506 (Fuente Maxim)

Se tienen dos amplificadores inversores con ganancia unitaria y para los que el fabricante sugiere dar valores  $R1 = R2 = 330\Omega$  [30].

La tensión del amplificador conectado a la salida del canal A del convertidor digital-analógico, se expresa en la ecuación 27.

$$\frac{V_{ref} - V_{out(A)}}{R_1} = \frac{V_{out(A)} - V_{out}}{R_2}$$

Ecuación 27. Tensión del amplificador conectado a la salida del canal A del convertidor digital-analógico

Donde  $V_{ref}$  es la tensión de referencia del circuito (5V) y  $V_{out(A)}$  la tensión de salida del canal A del convertidor.

Despejando en la ecuación 27 y sabiendo que  $R_1=R_2$  como ya se indicó, se llega a la ecuación 28 que refleja la tensión de salida del amplificador conectado a la salida, en función de la tensión de referencia y la tensión de salida del canal A.

$$V_{out} = 2xV_{out(A)} - V_{ref}$$

Ecuación 28. Tensión de salida del amplificador conectado a la salida, en función de la tensión de referencia y la tensión de salida del canal

Por otra parte, se tiene la ecuación 29 que expresa la tensión de salida del canal A en función del valor digital del convertidor y de la tensión de referencia del mismo, donde  $V_D$  es dicho valor digital.

$$V_{out(A)} = \frac{V_D \cdot V_{ref}}{256}$$

Ecuación 29. Tensión de salida del canal A en función del valor digital del convertidor y de la tensión de referencia del mismo

Entonces y a partir de las ecuaciones 27 y 28, y sabiendo que  $V_{ref}=5V$ , se llega a la ecuación 30, que expresa el valor digital de entrada del convertidor.

## Capítulo 8. Caso de Estudio.

$$V_D = 128x \left[ \left( \frac{V_{out}}{5} \right) + 1 \right]$$

Ecuación 30. Valor digital de entrada del convertidor

En el caso de estudio, y para cada uno de los sensores, se llega a los siguientes valores de la tensión de salida del convertidor, usando la ecuación 30.

$$\text{Sensor de presión: } V_D = 128x \left[ \left( \frac{-2,65V}{5} \right) + 1 \right] = 60$$

$$\text{Sensor de viscosidad: } V_D = 128x \left[ \left( \frac{-0,723V}{5} \right) + 1 \right] = 110$$

$$\text{Sensor de densidad: } V_D = 128x \left[ \left( \frac{-1,51V}{5} \right) + 1 \right] = 89$$

Recapitulando, se llega a las siguientes tablas (17 y 18):

Magnitud Física	Rango del Sensor	Rango del Sistema	Offset del PGIA	Ganancia del PGIA
Presión	2-10 bar	4-9 bar	-3.0V	2.00
Viscosidad Dinámica	0-25mPa.s	0.5-3mPa.s	-1V	13.33
Densidad	0-5g/cm <sup>3</sup>	0.7-3g/cm <sup>3</sup>	-1.52V	2.90

Tabla 17. Especificaciones del PGIA

Magnitud Física	DV <sub>PD1_1</sub> DV <sub>PD1_0</sub>	DV <sub>PD2_0</sub>	Ganancia PGIA	Tensión de salida del DAC	Valor digital del DAC	Offset
Presión	120	30	2	-2.65 V	60	-3V
Viscosidad Dinámica	212	71	13.33	-0.723V	110	-1V
Densidad	151	2	2.9	-1.51 V	89	-1.52V

Tabla 18. Valores de programación del PGIA

### 8.2.3.3 Operatoria del sistema

El sistema de medida se prueba bajo las siguientes condiciones:

- ✓ Presión estática medida; viscosidad y densidad constantes.
- ✓ Presión dinámica variable.
- ✓ Fluido: agua.
- ✓ Numero de muestras: 9.

La operatoria del sistema puede describirse con el siguiente flujograma, descrito en la figura 52:

Capítulo 8. Caso de Estudio.

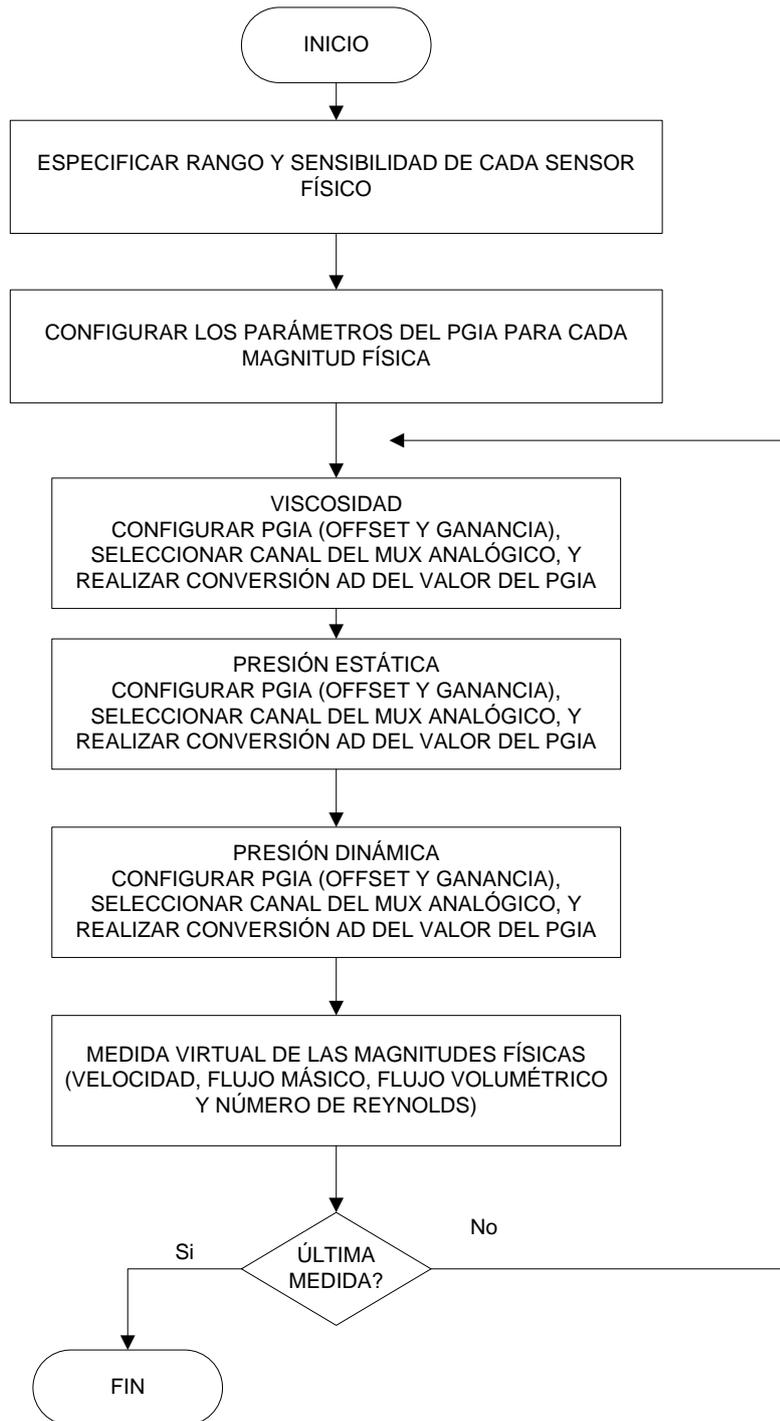


Figura 52. Operatoria del sistema

De esta forma, se obtienen las medidas directas de las magnitudes físicas de viscosidad, densidad, presión estática y dinámica. A partir de ahí se obtienen las medidas virtuales de velocidad, caudal másico, caudal volumétrico y número de Reynolds (a partir de las ecuaciones ya citadas).

La figura 53, muestra a través de un flujograma, la adaptación del código para el caso de estudio citado. Asimismo, las figuras 54, 55 y 56, representan los resultados del experimento en modo gráfico.

En las tablas 19 y 20, como colofón al experimento, se muestran las medidas numéricas, tanto físicas como virtuales.

Capítulo 8. Caso de Estudio.

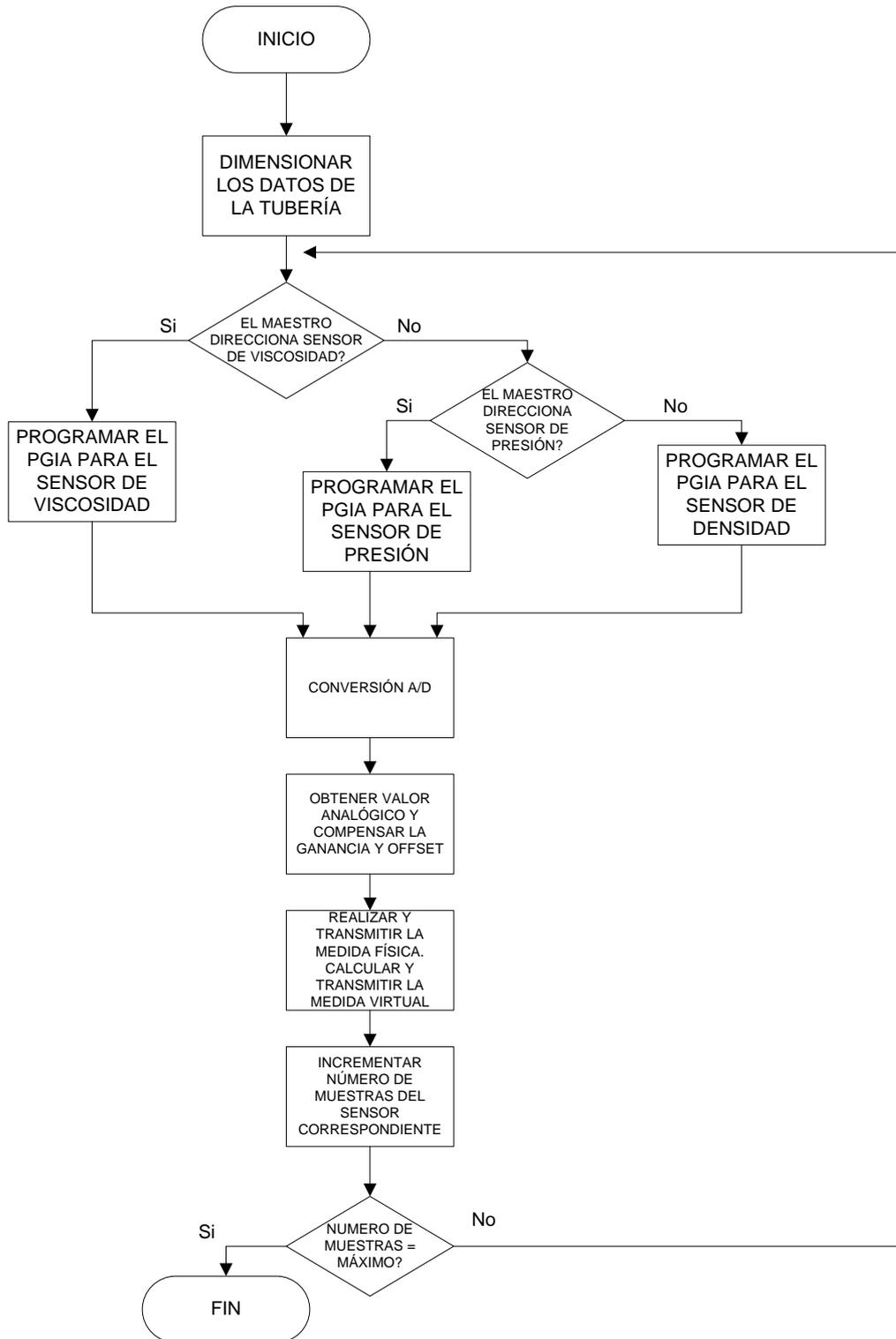


Figura 53. Adaptación del código para el caso de estudio

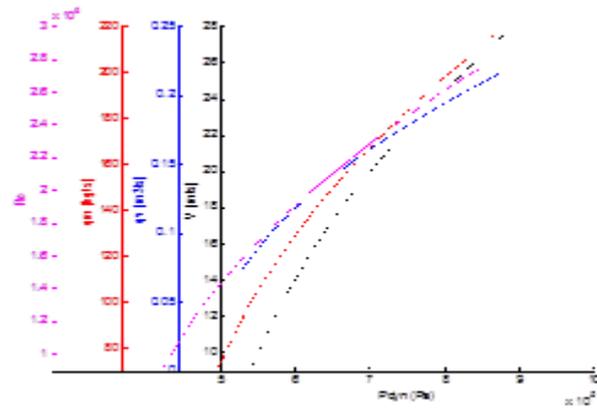


Figura 54. Gráfica de resultados del caso de estudio

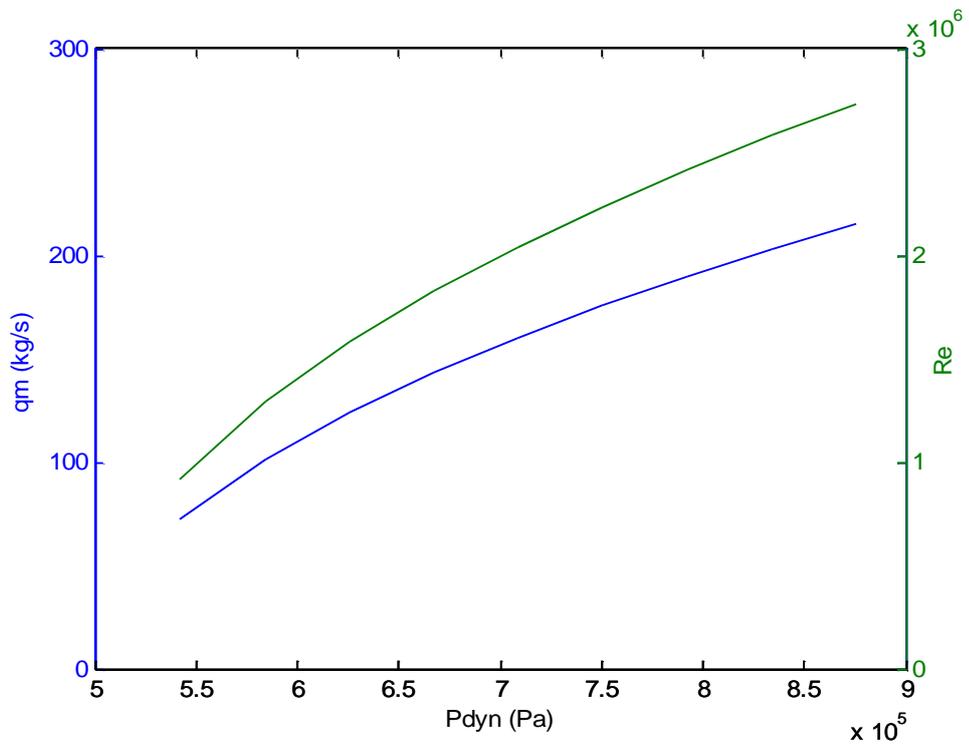


Figura 55. Gráfica de resultados disgregada (1) : Presión dinámica - Caudal másico- Número de Reynolds

Capítulo 8. Caso de Estudio.

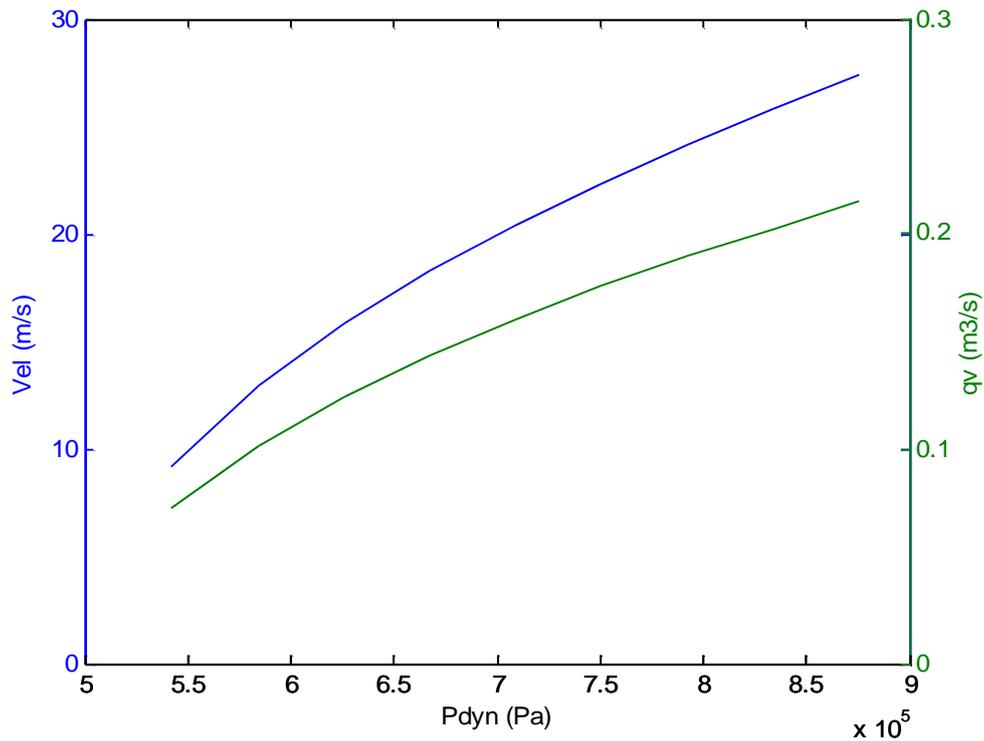


Figura 56. Gráfica de resultados disgregada(2) : Presión dinámica - Velocidad - Caudal volumétrico

Pest (V)	Pest (Pa)	Pdyn (V)	Pdyn (Pa)	Vis d (V)	Vis d (Pa.s)	den (V)	den (kg/m³)
1,030	500022,354125977	1,45	541870,11	0,990	1,0008E-03	0,64	1001,714
1,034	500367,385864258	1,88	584162,40	0,991	1,0012E-03	0,64	1001,327
1,030	500036,712646484	2,29	625133,19	0,989	1,0004E-03	0,64	1001,979
1,033	500310,165405273	2,71	667089,88	0,990	1,0006E-03	0,64	1000,891
1,031	500081,0546875	3,13	708732,94	0,990	1,0008E-03	0,64	1000,142
1,034	500387,481689453	3,56	750866,32	0,989	1,0002E-03	0,64	1001,775
1,032	500182,800292969	3,97	792300,89	0,988	1,0000E-03	0,64	1001,800
1,032	500163,391113281	4,40	834039,93	0,991	1,0012E-03	0,64	1001,333
1,033	500270,431518555	4,81	875552,13	0,992	1,0020E-03	0,64	1000,165

Tabla 19. Relación de medidas directas

Pest (V): Presión estática expresada en voltios.

Pest (Pa): Presión estática expresada en pascales.

Pdyn (V): Presión dinámica expresada en voltios.

Pdyn (Pa): Presión dinámica expresada en pascales.

Vis\_d (V): Viscosidad dinámica expresada en voltios.

Vis<sub>d</sub> (Pa.s): Viscosidad dinámica expresada en pascuales/s.

Den (V): Densidad expresada en voltios.

Den (kg/m<sup>3</sup>): Densidad expresada en kg/m<sup>3</sup>.

<u>vel (m/s)</u>	<u>qv (m<sup>3</sup>/s)</u>	<u>qm (kg/s)</u>	<u>Re</u>
9,1407	0,0718	71,88	914910,4669
12,9371	0,1016	101,69	1293810,6521
15,8019	0,1240	124,29	1582680,5206
18,2555	0,1433	143,43	1826070,0196
20,4266	0,1603	160,37	2041236,3701
22,3622	0,1755	175,86	2239691,7354
24,1493	0,1896	189,91	2419224,8240
25,8237	0,2027	202,99	2582824,0137
27,3941	0,2150	215,08	2734296,2620

Tabla 20. Relación de medidas virtuales

vel (m/s): Velocidad del fluido expresada en m/s.

qv (m<sup>3</sup>/s): Caudal volumétrico expresado en m<sup>3</sup>/s.

qm(kg/s): Caudal másico expresado en kg/s.

Re: Número de Reynolds.

## Capítulo 8. Caso de Estudio.

### **8.3 Aspectos relativos a la configuración y calibración del dispositivo**

La configuración del UST a través del protocolo digital permite configurar el tipo de sensor, el rango de medida y las unidades, el tipo de medición virtual, etc. Como la tarea de configuración debe implementarse remotamente a través del protocolo de comunicación, es necesario el uso de un dispositivo de configuración, normalmente un ordenador personal con una interfaz hombre-máquina.

Cualquier dispositivo de medición tiene que ser calibrado. Las normas internacionales establecen que la calibración es una comparación del dispositivo sometido a prueba con un instrumento de referencia homologado (calibrador). Formalmente la tarea de calibración no incluye ningún ajuste, pero a menudo se incluye en dicho proceso.

En un transmisor convencional se dispone de una salida analógica para la calibración directa del instrumento local mediante la comparación de la salida del transmisor con la entrada del calibrador. Con un transmisor inteligente no es posible una calibración local directa porque la salida del transmisor está embebida en el protocolo digital. En este último caso es necesaria, como en el caso anterior, una entrada de calibrador pero la lectura de salida tiene que ser ejecutada con ayuda de un dispositivo o software capaz de analizar el protocolo industrial.

El UST desarrollado permite tareas de calibración tanto remotas como locales, por comparación con una base de sensores de referencia redundantes y/o transmisores inteligentes.

El circuito de acondicionamiento programable ofrece características especialmente útiles e interesantes para los ajustes de calibración (ganancia programable y offset D/A). Obviamente, cada sensor puede requerir diferentes estrategias de ajuste de calibración. Los sensores con respuesta lineal se pueden calibrar con un simple ajuste de offset y uno no lineal puede requerir una tabla de consulta o una ecuación polinómica que represente el ajuste en función del rango de entrada.

El UST tiene una característica adicional que permite la tarea de calibración local como en un transmisor convencional. Como ya se vio, está disponible una salida de 4..20mA y por lo tanto es factible realizar una lectura directa de la salida sin la necesidad de un analizador de protocolo digital, siendo preciso solamente un polímetro.

#### **8.4 Comportamiento de salida y recapitulación**

La Figura 57 representa el comportamiento de salida del circuito de acondicionamiento programable del UST para los tres sensores, visto en la pantalla del osciloscopio digital del laboratorio. La ganancia de PCC y el valor de offset para cada sensor, se pueden identificar en la figura.

El PCC tiene que ser asociado con el sensor y la parametrización del rango de medición, como ya se ha indicado, es una tarea fundamental para las mediciones de alta resolución. Cada vez que se va a medir una magnitud física con el PCC, tres operaciones deberán ser ejecutadas por el UST y en función de la configuración del elemento primario del sensor: selección de entrada a través del multiplexor, valor de offset y ganancia, antes de la conversión analógico digital.

## Capítulo 8. Caso de Estudio.

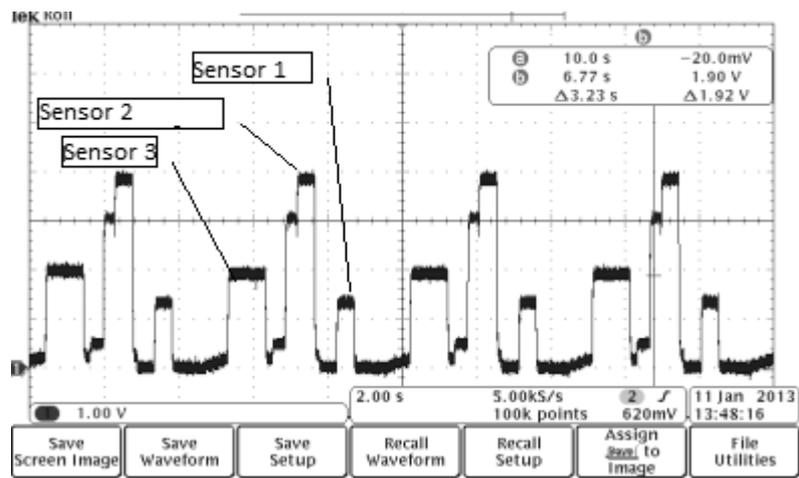


Figura 57. Comportamiento del PCC



## Capítulo 9

Campos de Aplicación, Trabajos Futuros  
y Conclusiones

*El mundo no es más que transformación, y la vida, opinión solamente. (Marco Aurelio).*

## 9.1 Introducción

En este capítulo se intentarán mostrar de manera somera algunas de las aplicaciones que puede tener el UST, así como las posibilidades de expansión futura que se le pueden asignar y unas conclusiones adicionales.

## 9.2 Campos de aplicación

- **Industria en general (química, alimentaria, manufacturera, etc).** Como se indicó en el primer capítulo, la automatización y el control es algo obligado en la industria actual y se hace imprescindible implementar elementos de medida con la facilidad de interactuar tanto en redes basadas en bus industrial, como aquellas en conexión punto a punto, encajando el UST en cualquiera de ellas.

Podrían destacarse las siguientes funciones a implementar [44,45]:

- ✓ Control de desgastes de máquinas.
  - ✓ Optimización de máquinas herramienta a través de sensores virtuales.
  - ✓ Predicción de averías y control de calidad.
  - ✓ Etc.
- 
- **Optimización de los entornos CIM.** Con la aparición de los ordenadores personales, y más aún, con la expansión de la conectividad de las redes (LAN, WAN, Intranets, buses de campo y redes industriales, etc), la producción se convierte en algo global donde interaccionan la información de diseño, fabricación, costes, etc, de manera que el proceso se convierte en lo que se da en llamar la Industrial Smart Solutions [45] y que se traduce en aspectos tales como:

## Capítulo 10. Campos de Aplicación, Trabajos Futuros y Conclusiones.

- ✓ Montaje inteligente.
  - ✓ Visibilidad total del proceso.
  - ✓ Toma rápida de decisiones.
  - ✓ Gestión energética y medioambiental.
  - ✓ Mejoras en la seguridad e higiene laboral.
- 
- **Automoción.** Un sector tan pujante y competitivo como es el de la automoción, sujeto a las principales novedades tecnológicas, ha sido uno de los más importantes receptores de la instrumentación electrónica y de los sistemas de medida y control[49,50], en tanto que en el automóvil se conjugan una serie de factores endógenos (datos de motor, control de consumo, dirección, climatización, confort, seguridad pasiva, control de frenada, etc) como exógenos (condiciones climatológicas, estado de la carretera, limitaciones legales, etc) que lo convierten en un sistema multivariable.

Actualmente, todos los vehículos incorporan sistemas electrónicos avanzados (abs, airbag, ESP) que precisan de ordenadores de abordo o centralitas, capaces de gestionar no sólo parámetros de seguridad o confort, sino todos los relativos al ahorro energético y control de emisiones<sup>1</sup>. Adicionalmente, desde hace varios años diversas firmas o consorcios, han desarrollado diversos buses de comunicación aplicados a este sector concreto : CAN de Bosch LIN, FlexRay o Most.

---

<sup>1</sup> Sin olvidar la cada vez mayor cantidad de apps desarrolladas para el control y gestión del vehículo.

En estos medios, muy similares a los buses industriales<sup>2</sup>, la información de diversos sensores es transmitida y gestionada de forma conceptualmente idéntica a la de los buses de campo, a los mismos (tolerancia a fallos, redundancia, control centralizado y distribuido).

Por otra parte, tecnologías como la del vehículo eléctrico e híbrido, plantea numerosos retos relativos a la optimización del proceso de carga y de consumo en ruta, en la que los sensores virtuales tienen un papel primordial. Y naturalmente, es de sumo interés, en todo lo relativo a circulación y aparcamiento autónomos.

Así, la implementación del UST en automoción podría extenderse a:

- ✓ Control de emisiones.
  - ✓ Seguridad activa y pasiva.
  - ✓ Medidas virtuales en lugares poco accesibles.
  - ✓ Asistencia a la circulación autónoma.
  - ✓ Capacidad de comunicación y gestión con servidores externos al vehículo.
  - ✓ Diagnóstico online duplicante a la del propio vehículo.
  - ✓ Etc.
- **Otros.** Es obvio que los tres apartados anteriores son "la punta del iceberg" de todos los campos posibles de aplicación, que son infinitos. No obstante, se podrían citar algunos muy significativos:

---

<sup>2</sup> De hecho el bus CAN, primigeniamente desarrollado para el automóvil, ha pasado al entorno industrial a través de CAN-OPEN

## Capítulo 10. Campos de Aplicación, Trabajos Futuros y Conclusiones.

- ✓ Automatización y control de la propulsión, planta eléctrica y sistema de posicionamiento de buques y artefactos marinos [48,49].
- ✓ Aviónica.
- ✓ Investigación y enseñanza.
- ✓ Control de cultivos e invernaderos.
- ✓ Producción y transporte de energía eléctrica.

### **9.3 Conclusiones y Posibilidades**

Las principales conclusiones que se pueden extraer del trabajo de investigación realizado, son las que se relacionan a continuación:

- El UST se postula como un transmisor industrial con unas características que lo diferencian de otros modelos comerciales en términos de flexibilidad, universalidad y conectividad.
- El sistema es adecuado tanto para las medidas físicas como las virtuales, Las capacidades de conectividad lo hacen plenamente apto para integrarse en redes industriales y, en base al hardware y software comercialmente disponible, también en redes corporativas e Internet.
- Su diseño conceptual y su implementación le dan una singularidad propia y por tanto un significado concreto en el contexto de una planta industrial.
- Su diseño e implementación, asimismo, lo hacen muy adecuado en términos de escalabilidad y evolución tecnológica.
- Es un elemento de base para el desarrollo de la Empresa 4.0, insertado en IoT.
- Por otra parte, en lo que a medidas virtuales se refiere, es de indicar que los posibles errores en los sensores físicos, arrastrarían un error acumulativo en las mismas,

lo cual obliga a mantener unos parámetros muy estrictos de calidad en lo que a calibrado y ajuste se refiere.

- También se deben tener en cuenta, los errores en las conversiones AD y DA (inherentes al dispositivo).
- Es preciso, afinar en lo que a la declaración de tipos de datos en lo que al módulo software se refiere, para evitar pérdidas de precisión y exactitud.

A partir de lo comentado en este trabajo, es factible pensar en trabajos futuros o nuevas líneas de investigación que pudiesen complementar lo aquí mencionado.

Realmente, en este momento, podrían citarse cuatro líneas maestras, con una enorme potencialidad de resultados:

- **Sistemas SCADA.** Mencionados con anterioridad, los sistemas SCADA son una herramienta imprescindible en el campo de la automatización y control industrial, por su capacidad de adquisición y visualización de información relativa a la planta industrial, en tiempo real y con una capacidad enorme de almacenar y gestionar datos relativos al proceso y por supuesto a la toma de decisiones, tanto de tipo operativo (técnico o de gestión) como estratégico [7,8].

Actualmente, fuera de un entorno estrictamente corporativo al uso, funcionan sobre dispositivos móviles tipo tablet o smartphone, con las ventajas que ello proporciona.

Los sistemas scada son una tecnología plenamente madura y de más que demostrada solidez que precisan de un entorno de sensorización inteligente y de unas comunicaciones eficaces para un buen desempeño. Ahí la solvencia del UST estaría más que demostrada.

- **Aplicación de modelos de regresión para el calibrado de sensores.**

Obviamente, una de las grandes capacidades del UST es su MCU que permitirá la realización de cálculos aritméticos y lógicos con total facilidad. Esta capacidad sería fundamental para realizar el calibrado de sensores por medio de técnicas de regresión lineal o lineal, ya que el proceso se implementaría fácilmente por software, una vez vista la flexibilidad del sistema.

- **Minería de datos.**

Hablar de la minería de datos o Data Mining podría ocupar centenares de páginas. Si hubiese que definirla brevemente podría decirse que es un conjunto de técnicas computacionales que permiten extraer información de grandes volúmenes de datos, de la misma forma que en el contexto físico y clásico de la minería, se separa la mena de la ganga.

Se ha demostrado la enorme potencialidad de la minería de datos, no sólo en entornos empresariales o de gestión (por ejemplo en predicción de ventas o comportamiento de mercados) [50], sino también en los entornos industriales, permitiendo el modelado de plantas reales y facilitando su optimización en términos de mejora de calidad, prevención de averías, etc [51], así como en el desarrollo de estrategias de control [52].

Es de indicar que la capacidad de proceso del UST no sería la adecuada para el tratamiento de esa información (que sería realizada por procesadores de gama más alta [53] y ubicados en ordenadores personales, por ejemplo), sino transmisión y eventualmente, almacenamiento de la información de la planta.

- **Internet de las Cosas (IoT)**. Uno de los paradigmas más pujantes en el campo de la automatización y control industrial , es la incorporación de los sistemas de medida, supervisión, regulación y demás, a la llamada Internet de las Cosas (Internet of Things) y el Big Data. De hecho, algunos autores lo asocian con una nueva revolución industrial basada en las TIC (Tecnologías de la Información y las Comunicaciones) [54,55,56].

Internet de las Cosas podría definirse como la incorporación a la red de dispositivos no comúnmente conectables, al menos no como se han entendido hasta ahora (ordenadores, servidores, netbooks, tablets, en forma personales, relojes, elementos automotrices, etc). En suma, supone la conexión a Internet de los objetos cotidianos.

Según fuentes como Gartner y AbiResearch, en 2020 habrá conectados a Internet, aproximadamente treinta mil millones de objetos comunes con tecnología inalámbrica. Las estrategias empresariales ya han puesto sus ojos en Internet de las Cosas [57,58,59,60] aprovechando la conectividad de los sistemas, la alta velocidad de las redes, la capacidad de proceso de los dispositivos y los valores añadidos del almacenamiento en nube, dando lugar a la Industria 4.0.

Las posibilidades de IoT son infinitas en términos de la producción, mantenimiento predictivo, control de calidad, etc [58,59,60,61].

## Capítulo 10

Referencias

REFERENCIAS Y FUENTES DE INFORMACIÓN

- [1] Piñon Pazos A. Ferreiro García, R & Meizoso López, M.C. Implementación De Sensores Virtuales En Foundation Fieldbus.En : XXIV Jornadas de Automática CEA 2013 [en línea]. [consultado 11 de septiembre de 2015]. Disponible en <http://www.ceautomatica.es/old/actividades/jornadas/XXIV/documentos/incon/68.pdf>
- [2] Pallas Areny, R. Sensores y Acondicionadores de Señal. Barcelona: Marcombo, 2003, cuarta edición. ISBN 9788426713445.
- [3] J. Fraden. Handbook of Modern Sensors. AIP Press.
- [4] La red de nanosensores en Castilla-La Mancha. [consultado el 27 de febrero de 2016]. Disponible en <http://pagina.jccm.es/medioambiente/rvca/pdfs/nanosensoresCLM.pdf>.
- [5] Ogata, K. Ingeniería de Control Moderna. Prentice-Hall,2002, cuarta edición.
- [6] Creus Sole, A. Instrumentación Industrial. Barcelona : Marcombo,2005, séptima edición. ISBN 84-267-1361-0.
- [7] Rodriguez Penin, A. Sistemas SCADA. Barcelona: Marcombo, ISBN 9788426717818.
- [8] Bailey, D. Wright, Edwin. Practical Scada for Industry. Elsevierm 2003. ISBN 978-0-7506-5805-8.

## Capítulo 10. Referencias.

[9] Barceló Ordinas, J et al. Redes de Computadores. [en línea]. [consultado 14 de marzo de 2016]. Disponible en <http://www.sciencemag.org/content/349/6244/161.full.pdf>.

[10] Vignoni, J. Redes de Datos en Tiempo Real .[en línea]. [consultado 11 de enero de 2016]. Disponible en [http://www.ing.unlp.edu.ar/electrotecnia/procesos/apuntes/edes\\_tr2.pdf](http://www.ing.unlp.edu.ar/electrotecnia/procesos/apuntes/edes_tr2.pdf).

[11] Ferreiro García, R. Módulo sobre Ingeniería de Control. Máster en Ingeniería Marítima. E.S de Náutica y Máquinas, Universade da Coruña (2012).

[12] Honeywell. Technical Information about ST3000 Smart Pressure Transmitter. [en línea]. [consultado el 20 de marzo de 2016]. Disponible en <https://www.honeywellprocess.com/library/marketing/tech-specs/34-ST-03-65.pdf>.

[13] Itou, Akio et al. EJX910 Multivariable Transmitter. [en línea]. [consultado 17 de marzo de 2016]. Disponible en <http://cdn2.us.yokogawa.com/rd-tr-r00042-004.pdf>.

[14] Emerson Process Management. Transmisor Rosemount3095 Multivariable. [en línea]. [consultado 20 de marzo de 2016]. Disponible en <http://www2.emersonprocess.com/es-es/brands/rosemount/pressure/pressure-transmitters/multivariable-transmitters/3095-multivariable/pages/index.aspx>.

[15] Model 267CS Multivariable Transmitter. [en línea]. [consultado 20 de marzo de 2016]. Disponible en [https://library.e.abb.com/public/144476dc7f8516d3c1257b87003fadb4/SS\\_267CS\\_269CS\\_EN\\_01.pdf](https://library.e.abb.com/public/144476dc7f8516d3c1257b87003fadb4/SS_267CS_269CS_EN_01.pdf).

[16] Maxim Low Voltage, CMOS Analog Multiplexers/Switchers. [en línea]. [consultado el 1 de febrero de 2016].

Disponible en <http://www.farnell.com/datasheets/4520.pdf>.

[17] Kumen, B. Analog Sensor Conditioning Circuits- An Overview. Microchip Inc. Appnote (2005).

[18] Granda Miguel. Mediavila Bolado, E. Instrumentación Electrónica : Transductores y Acondicionadores de Señal. Santander : Textos Universitarios de la Universidad de Cantabria, 2010. ISBN 978-84-8102-568-2.

[19] Schmitz, O et al. Differential Amplifier Characterization Using Mix-Mode Scattering Parameters Obtained From True and Virtual Differential Measurements. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. Enero 2011.

[20] Leira Rejas, A. Pérez Castelo F.J. Fundamentos de Tecnología Electrónica : Teoría, Problemas Resueltos y Simulaciones por Ordenador. Coruña : Copy Belén, 2001, segunda edición. ISBN .

[21] Microchip Technology Inc. Digital Potentiometer Design Guide. (2007).

[22] Dallas Semiconductor. DS1868 Dual Digital Potentiometer Chip. DS 1868 Datasheet (2009).

[23] HMS Industrial Networks. Anybus Evaluation Board User Manual. (2004).

[24] HMS Industrial Networks. The Guide to Connecting Automation Devices to Industrial Networks. (2014).

## Capítulo 10. Referencias.

[25] Dallas Semiconductors. DS1620 Digital Thermometer and Thermostat. (2010).

[26] Texas Instruments. LM158-LM258-LM358 Low Power Dual Operational Amplifiers. (2016).

[27] Texas Instruments. LM2937 500-mA Low Dropout Regulator. (2016).

[28] Texas Instruments. LM2940 1A Low Dropout Regulator. (2016).

[29] Maxim. MAX873-876 Low-Power, Low-Drift +2.5V/+5V/10V Precision Voltage References. (1992).

[30] Maxim. MAX505-506 Quad 8 Bit DACS with Rail-to-Rail Voltage Outputs. (1994).

[31] Aristova, NI. Ethernet in Industrial Automation: Overcoming Obstacles. Journal Automation. Moscú, 2013. pp. 44-54.

[32] HMS. Anybus ®-S Slave&Master. Paralell Interface Design Guide. (2015).

[33] Stallings, W. Organización y Arquitectura de Computadores. Prentice-Hall, 2006, séptima edición. ISBN 9788489660823 .

[34] Siemens: Microcomputer Components SAB 80C517A/83C517A-5 8-Bit CMOS Single-Chip Microcontroller. [en línea]. [consultado el 1 de abril de 2016]. Disponible en [http://www.keil.com/dd/docs/datashts/infineon/8xc5x7a\\_uma.pdf](http://www.keil.com/dd/docs/datashts/infineon/8xc5x7a_uma.pdf).

[35] Keil Software. Cx51 Compiler Optimizing C Compiler and Library Reference for Classic and Extended 8051 Microcontrollers .(2001).

[36] Pérez García, Miguel. Instrumentación Electrónica. Madrid: Paraninfo, 2014. ISBN 9788428337021.

[37] Farnell. Pt100 General Purpose Temperature Sensor (2009).

[38] Rosenberg, R.J. Temperature Measurement on the Job Using RTDs and Thermocouples. ISA Transactions, Volumem 33, Número 3. Septiembre 1994. pp. 287-292.

[39] Rubio, Antonio et al. Diseño de Circuitos y Sistemas Integrados. Barcelona : Ediciones UPC, 2000. ISBN 84-8301-404-1.

[40] Texas Instruments. TLC04/MF4A-50, TLC14/MF4A-100 BUTTERWORTH FOURTH-ORDER LOW-PASS SWITCHED-CAPACITOR FILTERS. (1996).

[41] Microchip. 24AA04/24LC04B. 4K I2C™ Serial EEPROM.

[42] Ozkul, T. Data Adquisition and Process Control Using Personal Computers. CRC Press. pp. 102, 459-480. 1996.

[43] Luyben, W. Process Modelling, Simulation and Control for Chemical Engineers.McGraw-Hill.

[44] Reñones, Aníbal. Bustillo, Andrés. Quintana, Guillem. ¿Qué pueden hacer los sensores inteligentes en una planta de fabricación.[en línea]. [consultado el 23 de junio de 2016]. Disponible en

## Capítulo 10. Referencias.

<http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/72003-Que-pueden-hacer-los-sensores-inteligentes-en-una-planta-de-fabricacion.html>

[45] Cisco Systems Inc. Industrial Smart Solutions: conectar la fábrica con la empresa.[en línea].[consultado el 18 de junio de 2016]. Disponible en <http://www.cisco.com/go/industrial>

[46] Denton, Tom. Sistemas eléctrico y electrónico del automóvil. Tecnología automotriz: mantenimiento y reparación de vehículos. Barcelona: Marcombo, 2016. ISBN 978-84-267-2319-2.

[47] Sawyer, C. Sensors: More, not less. Automotive Design & production, marzo 2013 pp. 21-25.

[48] Ferreiro García, R. Rodríguez García, B. Apuntes sobre Integración de Sistemas. Máster en Ingeniería Marítima. E.S de Náutica y Máquinas, Universade da Coruña (2012).

[49] Alstom Power Conversion Marine & Offshore. Guide to Dynamic Positioning of Vessels.

[50] Virseda Benito, F. Román Carrillo, Javier. Minería de datos y aplicaciones.[en línea]. [consultado el 23 de mayo de 2016]. Disponible en <http://www.it.uc3m.es/jvillena/irc/practicas/06-07/22.pdf>.

[51] González Marcos, A. Desarrollo de técnicas de minería de datos en procesos industriales; modelización en líneas de producción de acero. Universidad de la Rioja, 2006.

[52] Ma Yuekun, Li Zhigang, Yu Zuli. Research on Dynamic and Distribute Data Mining Software Used in Control System. Second International Symposium on Intelligent Information Technology Application.

[53] Amol Gothing et al. A Characterization of Data Mining Algorithms on a Modern Processor.

[54] Cisco Systems Inc. ¿En qué consiste Internet of Everything?[en línea].[consultado el 21 de junio de 2016]. Disponible en <http://www.cisco.com/c/m/es/es/tomorrow-starts-here/ioe.html?CAMPAIGN=cisco-spain-social>.

[55] Tascón, M. Big Data y el Internet de las Cosas: qué hay detrás y cómo nos va a cambiar. Madrid: Catarata, 2016.

[56] IBM España. ¿Qué es Big Data?[en línea].[consultado el 23 de junio de 2016]. Disponible en <https://www.ibm.com/developerworks/ssa/local/im/que-es-big-data/>.

[57] Tremosa, L. Objetivo : La Empresa Conectada. Automática e Instrumentación. [en línea]. Disponible en <http://p88-127.0.0.1.accedys.udc.es/accedix0/sitios/control/0incrustat.php?aplicacion=10274>.

[58] ElectroIndustria. Internet de las Cosas en la Industria. [en línea]. Disponible en <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=2713&srch=fabelec&act=3>

## Capítulo 10. Referencias.

[59] Tremosa, L. Internet de las Cosas : Punto de Encuentro de Diversas Tecnologías. Automática e Instrumentación. Número 472, abril 2015. pp.36-41.

[60] Ingeniería Naval. Revista del sector marítimo. Sistema de información para los puertos marítimos de Brasil.[en línea].[consultado el 22 de junio de 2016]. Disponible en <http://p88-127.0.0.1.accedys.udc.es/accedix0/sitios/control/0incrustat.php?aplicacion=10143>.

[61] Samoila, C. Ursujiu, D. Jinga, V. Remote Experiment and Virtual Sensors. IEEE Global Engineering Education Conference.



Anexo 1: Diccionario de Abreviaturas,  
Acrónimos y Siglas

## Anexo 1 : Diccionario de abreviaturas, acrónimos y siglas

ADC: (*Analog to Digital Converter*). Convertidor analógico-digital.

CAD: (*Computer Aided Design*). Diseño asistido por ordenador.

CAE: (*Computer Aided Engineering*). Ingeniería asistida por ordenador.

CAM: (*Computer Aided Manufacturing*). Fabricación asistida por ordenador.

C.C: Corriente continua.

CIM: (*Computer Integrated Manufacturing*). Fabricación integrada por ordenador.

CM: (*Communication Module*). Módulo de comunicaciones.

CMOS: (*Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*). Metal-Óxido-Semiconductor complementario).

CMRR: (*Common Mode Rejection Ratio*). Relación de rechazo en modo común.

CPU: (*Central Processing Unit*). Unidad central de proceso.

DAC: (*Digital to Analog Converter*). Convertidor digital-analógico.

DC: (*Direct Current*). Corriente continua.

DPRAM: (*Dual Port Random Access Memory*). Memoria de acceso aleatorio de puerto dual.

DSP: (*Digital Signal Processor*). Procesador digital de señales.

## Anexo 1 : Diccionario de abreviaturas, acrónimos y siglas

EPROM: (*Erasable Programmable Read Only Memory*). Memoria programable y borrrable de solo lectura.

EEPROM: (*Electrical Erasable Programmable Read Only Memory*). Memoria programable de solo lectura borrrable eléctricamente.

FPGA: (*Field Programmable Gate Array*). Matriz de puertas programable.

IC: (*Integrated Circuit*). Circuito integrado.

IOT: (*Internet of Things*). Internet de las cosas.

LAN: (*Local Area Network*). Red de área local.

MCU: (*Microcontroller Unit*). Unidad microcontroladora.

MUX: (*Multiplexer*). Multiplexor.

PAL : (*Programmable Array Logic*). Matriz lógica programable.

PCC: (*Programmable Conditionig Circuit*). Circuito de acondicionamiento programable.

PGIA: (*Programable Gain Instrumentation Amplifier*). Amplificador de instrumentación de ganancia variable.

PID: (*Proportional-Integral-Derivate*). Proporcional-integral-derivativo.

PLC: (*Programmable Logic Controller*). Controlador lógico programable. Autómata programable.

RAM: (*Random Access Memory*). Memoria de acceso al azar.

## Anexo 1 : Diccionario de abreviaturas, acrónimos y siglas

*ROM: (Read Only Memory)*. Memoria de solo lectura.

*SCADA: (Supervisory Control And Data Acquisition)*. Supervisión, Control y Adquisición de Datos.

*TIC: Tecnología de la información y las comunicaciones.*

*UST: (Universal Smart Transmitter)*. Transmisor universal inteligente.

*WAN: (Wide Area Network)*. Red de banda extensa.

## Anexo 2: Producción Científica y Resultados Prácticos

## Anexo 2: Producción científica y resultados prácticos.

El transmisor, como ya se ha indicado, ha sido objeto de la patente con número de solicitud 201300292 publicada el 01-10-2014 por la Oficina Española de Patentes y Marcas. Cabe decir también, que la realización física fue factible gracias al apoyo económico de la Xunta de Galicia, dentro de su programa “Diseño e Producción Industrial”, fijado al proyecto 09DPI001166PR.