

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

IMPLEMENTACIÓN Y DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE FLUJO, COMPRESIBILIDAD Y DENSIDAD DE GAS MULTICOMPONENTE EN UN PROCESADOR ARM Y UN MICROCONTROLADOR

Prof. Guía: Ing. José Alonso
Tutor Industrial: Ing. Pedro Bortot

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Brs. Huizi U., Rosalía A. y
Verde I., José I
para optar al Título de
Ingeniero Electricista

Caracas, 2007

RECONOCIMIENTOS Y AGRADECIMIENTOS

Principalmente agradecemos a Dios, por darnos la fuerza y la perseverancia para realizar exitosamente nuestra carrera universitaria.

A nuestros padres y hermanos por el apoyo que nos brindaron a lo largo de nuestra carrera. A nuestros compañeros y amigos con quienes compartimos momentos inolvidables de nuestra vida universitaria.

A la ilustre Universidad Central de Venezuela y a nuestros profesores, quienes contribuyeron con nuestra formación como ingenieros de esta institución.

A Seebeck Instrumentación y Control C.A., y a los ingenieros Pedro Bortot, Germán Da Rúos y Nelson Mambre, por su colaboración y ayuda en la elaboración del presente proyecto, así como también a nuestros compañeros de trabajo.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
CONSTANCIA DE APROBACIÓN	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
RESUMEN	vii
LISTA DE TABLAS	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
SIGLAS	xi
ACRÓNIMOS	xii
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	4
OBJETIVOS	5
RECURSOS Y/O HERRAMIENTAS	6
METODOLOGÍA	7
CAPÍTULO II	
MARCO TEÓRICO	8
CAPÍTULO III	
METODOLOGÍA	37
CAPÍTULO IV	
ANÁLISIS DE RESULTADOS	99
CONCLUSIONES	103
RECOMENDACIONES	106
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107
BIBLIOGRAFÍA	108

GLOSARIO	110
ANEXOS	114

Huizi U., Rosalía A; Verde I., José I.

**IMPLEMENTACIÓN Y DESARROLLO DE UN SISTEMA DE
MEDICIÓN DE FLUJO, COMPRESIBILIDAD Y DENSIDAD DE
GAS MULTICOMPONENTE EN UN PROCESADOR ARM Y UN
MICROCONTROLADOR**

**Prof. Guía: José Alonso. Tutor Industrial: Pedro Bortot. Tesis. Caracas. U.C.V.
Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Eléctrica. Ingenieros Electricistas.
Opción: Electrónica, Computación y Control. Institución: SEEBECK
Instrumentación y Control, C.A. 2007. 114 h + anexos.**

Palabras Claves: Computador de Flujo; Normas AGA; ARM; Microprocesador;
Microcontrolador; MODBUS; CompactFlash; Software.

Resumen. Se plantea la implementación de un sistema de medición de diversas características de gas natural mediante un equipo denominado computador de flujo, regido por la normativa que establece la Asociación Americana de Gas (AGA). La norma AGA8 define las ecuaciones matemáticas que caracterizan tanto el factor de compresibilidad de un gas como su densidad; la norma AGA3, partiendo de los resultados obtenidos mediante la aplicación de la norma AGA8, define los cálculos necesarios para la determinación de las condiciones de flujo del gas. En este trabajo se desarrollan los códigos necesarios para este fin, para la posterior programación tanto de un microprocesador (en este caso un ARM) en lenguaje Visual Studio.Net como de un microcontrolador en lenguaje C. Estos equipos deben comunicarse utilizando los protocolos MODBUS TCP y MODBUS RTU, respectivamente. La programación en ambas arquitecturas tiene como finalidad la comparación en cuanto a velocidad y rendimiento, pues uno de los dos productos presenta un tamaño considerablemente reducido, pudiendo esto ser una ventaja ante el otro.

LISTA DE TABLAS

TABLA	pág.
1. Rangos característicos de mezclas de gas consistentes en el reporte No. 8 de las normas AGA.	16
2. Rangos nominales característicos del gas natural de datos experimentales disponibles para factor de compresibilidad.	20
3. Composición de gases naturales.	82
4. Resultados AGA 8. Método de caracterización detallada. Aplicación en PC.	83
5. Resultados AGA 8. Método de caracterización detallada. Aplicación en ARM.	84
6. Resultados AGA 8. Método de caracterización detallada. Aplicación en PIC.	85
7. Parámetros de entrada para método de caracterización aproximada. Métodos 1 y 2.	86
8. Resultados AGA 8. Método de caracterización aproximada. Aplicación en PC.	87
9. Resultados AGA 8. Método de caracterización aproximada. Aplicación en ARM.	88
10. Resultados AGA 8. Método de caracterización aproximada. Aplicación en PIC.	89
11. Resultados AGA 3. Aplicación en PC.	90
12. Resultados AGA 3. Aplicación en ARM.	91
13. Resultados AGA 3. Aplicación en PIC.	93

LISTA DE FIGURAS

FIGURA	pág.
1. Esquema general del proyecto.	4
2. Incertidumbre para factores de compresibilidad para gas natural usando el método de caracterización detallada.	17
3. Medición de orificio.	23
4. Esquema de un medidor de placa orificio	25
5. Diagrama esquemático. Metodología diseñada.	39
6. Diagrama de flujo. Método de caracterización detallada. AGA 8.	40
7. Diagrama de flujo. Método de caracterización aproximada. AGA 8.	42
8. Diagrama de flujo. AGA 8. Método de caracterización aproximada. Método 1.	45
9. Diagrama de flujo. AGA 8. Método de caracterización aproximada. Método 2.	47
10. Diagrama de flujo. AGA 3.	48
11. Entrada de datos. AGA 8, método de caracterización detallada.	51
12. Resultados AGA 8. Método de caracterización detallada. Entrada de datos para AGA 3.	52
13. Resultados AGA 3.	53
14. Entrada de datos. AGA 8, método de caracterización aproximado	54
15. Resultados AGA 8. Método de caracterización aproximado. Entrada de datos para AGA 3.	54
16. Resultados AGA 3.	55
17. Ejemplo de mensaje de error.	55
18. Archivo de texto que registra resultados de cálculos.	56
19. Diagrama de bloques. Comunicación Modbus TCP entre ARM y computador.	58

20. Diagrama de bloques. Comunicación Modbus RTU entre microcontrolador PIC y computador.	60
21. Diagrama de flujo. Programa principal (Main).	61
22. Diagrama de flujo. Subrutina read_function_request .	64
23. Trama del buffer a enviar al esclavo.	65
24. Diagrama de flujo. Subrutina request_wait_data .	66
25. Diagrama de flujo. Subrutina Bytes2Float .	68
26. Diagrama de flujo. Subrutina Float2Bytes .	70
27. Diagrama de flujo. Subrutina write_multiple_registers .	71
28. Trama del buffer generada por subrutina write_multiple_registers .	72
29. Diagrama de flujo. Subrutina TX1buffer .	73
30. Diagrama de flujo. Subrutina int_rda (interrupción serial).	74
31. Diagrama de flujo. Subrutina int_timer2 (interrupción del timer 2).	75
32. Diagrama de flujo. Subrutina int_timer3 (interrupción del timer 3).	76
33. Diagrama de flujo. Subrutina process_modbus_response .	77
34. Diagrama de flujo. Subrutina check_modbus_response .	78
35. Diagrama de flujo. Subrutina read_holding_registers .	80
36. Vista de simulador de dispositivo esclavo ModSim.	95
37. Monitor de puertos. Comunicación Modbus RTU.	96
38. Vista de simulador de dispositivo maestro ModScan.	97
39. Aplicación de ISaGRAF para Modbus TCP.	98

SIGLAS

AGA:	American Gas Association o Asociación Americana de Gas.
GERG:	Geochemical and Environmental Research Group
GRI:	Global Reporting Initiative.
IEEE:	Institute of Electrical and Electronics Engineers o Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.
UCV:	Universidad Central de Venezuela.

ACRÓNIMOS

ARM:	Advanced RISC Machine
ASCII:	American Standard Code for Information Interchange ó Código Estadounidense Estándar para el Intercambio de Información.
CAN:	Controller Area Network
CPU:	Central Processing Unit o Unidad Central de Proceso.
DSP:	Digital Signal Processor o Procesador Digital de Señales.
DSR:	Dynamic Source Routing.
GSM:	Global System for Mobile communications o Sistema Global para Comunicaciones Móviles.
I ² C:	Inter-Integrated Circuit o Circuitos Inter-Integrados.
I ² S:	Integrated Interchip Sound.
IP:	Internet Protocol o Protocolo de Internet.
Irda:	Infrared Data Association.
LIN:	Local Interconnect Network o Red de Interconexión Local.
MSSP:	Managed Security Service Provider.
OSI:	Open Systems Interconnection o Modelo de Referencia de Interconexión de Sistemas Abiertos.
PWM:	Pulse-Width Modulation o Modulación Por Ancho de Pulso.
PLL:	Phase-Locked Loops o Lazos de Seguimiento de Fase.
RISC:	Reduced instruction set computer o Computadora con Conjunto de Instrucciones Reducido
RTU:	Remote Terminal Unit o Unidad de Terminal Remota
SCADA:	Supervisory Control and Data Adquisition o Control supervisorio y adquisición de datos.
SPI:	Serial Peripheral Interface o Interfaz Serial de Periféricos.

TCP: Transmission Control Protocol o Protocolo de Control de Transmisión.
USART: Universal Synchronous/Asynchronous Receiver Transmitter
USB: Universal Serial Bus o Bus de Serie Universal.
WiFi Wireless Fidelity.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de medición, control y facturación (transferencia y custodia) para gas y petróleo son indispensables para la industria petrolera; estos equipos, además, deben ser normalizados en cuanto a la forma de efectuar los cálculos. Todos estos sistemas requieren de un muestreo de datos que normalmente se efectúa por medio de dispositivos especializados, tales como cromatógrafos en línea, sensores de presión y temperatura. Estos parámetros aplicados a los algoritmos para el cálculo de flujo conforman un sistema llamado computador de flujo, el cual sólo es óptimo si se logran practicar dichos algoritmos con la precisión, el tiempo de adquisición y los métodos de cálculo impuestos por las normas AGA.

En el presente trabajo se plantea un proyecto cuya finalidad consiste en la implementación de las normas AGA3 y AGA8 en un sistema basado en microcontrolador y microprocesador, mediante algoritmos de cálculo iterativos, y que ambos equipos manejen comunicación mediante protocolos Modbus TCP y Modbus RTU, para el microprocesador y para el microcontrolador respectivamente.

El reporte No. 3 de las normas AGA describe los cálculos métricos para la medición de flujo de gas natural aplicando la técnica de placa orificio, mientras que el reporte No. 8 normaliza los métodos de cálculo para los factores de compresibilidad y densidad de gas natural y otros gases hidrocarburos. Estos métodos pueden ser aplicados en el cálculo de volumen y flujo de gas multicomponente.

La técnica de placa orificio, sobre la cual se basa la normativa AGA3, consiste en una placa perforada que se instala en la tubería por donde fluye el gas.

Cuando se trata de gases reales, la presión indicada por el registrador de presión es menor que la presión a la que se encontraría el gas si fuera ideal pues hay que descontar las interacciones entre las moléculas; por otra parte, el volumen disponible para el movimiento de las moléculas es menor que el volumen del recipiente, pues no se puede despreciar el volumen que ocupan las mismas.

El factor de compresibilidad (Z) es un factor que compensa la no idealidad del gas, de modo que la ley de los gases ideales se convierte en una ecuación de estado generalizada.

Los factores de compresibilidad y de supercompresibilidad de un gas se pueden considerar factores de corrección para que la ecuación de estado se pueda seguir aplicando a gases reales. En realidad, Z corrige los valores de presión y volumen leídos para llevarlos a los verdaderos valores de presión y volumen que se obtendrían si el mol de gas se comportara, a determinada temperatura, como un gas ideal. Estos factores dependen del tipo de gas y de las condiciones de presión y temperatura a la que se encuentra; cuando estas condiciones son bajas, próximas a las condiciones normales, Z se considera igual a uno, es decir, el gas es considerado como gas ideal.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Debido a la creciente industria petrolera en el país, el uso principal al cual será destinado este instrumento es la medición de volumen de gas extraídos y destinados a la venta hacia grandes consumidores, así como también a la extracción de petróleo por inyección de gas.

El objetivo principal de este proyecto fue sustituir los equipos de medición actuales por un equipo denominado Computador de Flujo, el cual se encargará de realizar los cálculos pertinentes adaptados a las normativas legales vigentes en materia de hidrocarburos gaseosos (normas AGA).

Los equipos de medición de flujo de gas que cumplen con los lineamientos de las normas AGA sólo se consiguen en el exterior y presentan costos elevados. El desarrollo de este equipo en Venezuela constituye un crecimiento importante en el desarrollo de tecnología venezolana.

DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

En las tuberías de los pozos petroleros, por las que circulan gases, se ubican sensores de presión, temperatura y composición del gas, cuyas mediciones serán enviadas al computador de flujo por medio de Modbus TCP en el caso del ARM y Modbus RTU en el caso del Microcontrolador. Es en este punto donde ocurrirá el procesamiento de estos datos, a modo de efectuar el cálculo del flujo de gas que pasa por la tubería y posteriormente se enviarán los resultados vía Modbus TCP y Modbus RTU, respectivamente.

El equipo hará siempre un muestreo de los registros Modbus, luego el sistema calculará los parámetros AGA8 en su totalidad y los almacenará en los registros Modbus correspondientes, seguidamente hará lo mismo con los parámetros AGA3.

El la figura 1 se puede observar el esquema general del proyecto.

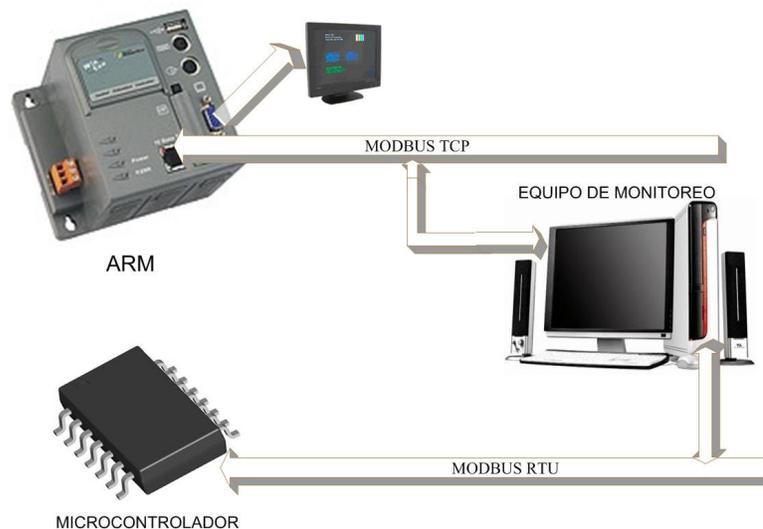


Figura 1. Esquema general del proyecto.

OBJETIVOS

1. Objetivo General

Diseño e implementación de un computador de flujo el cual cumple con la normativa AGA3 y AGA8 sobre una arquitectura de microcontrolador y una arquitectura de microprocesador.

2. Objetivos Específicos

- Diseñar algoritmos de cálculo para la medición de flujo de gas natural aplicando la técnica de placa orificio según los lineamientos de la normativa AGA3.
- Diseñar algoritmos de cálculo de los factores de compresibilidad y densidad de gases naturales y otros gases hidrocarburos siguiendo los lineamientos de la normativa AGA8.
- Diseño de un algoritmo que maneje el protocolo Modbus con el fin de conectar el equipo con los dispositivos de entrada salida.
- Implementar el protocolo de comunicación Modbus-RTU.
- Implementar el protocolo de comunicación Modbus-TCP.
- Diseñar y codificar rutinas para el almacenamiento de los datos en una memoria.
- Diseñar y codificar rutinas para descargar los datos adquiridos en una memoria CompactFlash, por medio del puerto disponible en el ARM.
- Diseñar y codificar rutinas para descargar los datos adquiridos en un Pendrive, por medio del puerto USB disponible en el ARM.

RECURSOS Y/O HERRAMIENTAS DISPONIBLES EN SEEBECK PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO

El proyecto se desarrolló en las instalaciones de Seebeck (Tecnopolis USB), donde se dispone de todos los recursos mencionados a continuación y apoyo por parte de personal especializado. Los equipos, materiales y componentes electrónicos necesarios para el desarrollo de este proyecto, así como también los gastos que generó el mismo, fueron cubiertos por Seebeck.

- Especificaciones técnicas de los distintos microcontroladores existentes.
- Hardware para micro controlador PIC.
- Herramientas de desarrollo para microcontrolador PIC.
- Programador de microcontroladores PIC ICD PIC C CCS.
- Equipos de laboratorio, fuentes de poder, multímetro, osciloscopio y frecuencímetro.
- Suministro de los componentes necesarios para la construcción del equipo.
- Hardware basado en microprocesador ARM.
- Herramientas de programación y desarrollo para ARM.
- Módulos I/O para pruebas.
- Documentación Modbus.
- Herramientas para desarrollo bajo Modbus TCP para ARM.
- Herramientas para desarrollo bajo Modbus RTU para PIC.
- Normas AGA.
- Uso de distintos lenguajes de programación como lenguaje C, y PIC C.
- Computadora Personal.
- Acceso a Internet y a impresora.
- Impresora.
- Acceso a biblioteca de Seebeck.

METODOLOGÍA

El desarrollo de este proyecto se dividió en las siguientes etapas:

Fase 1. Investigación y documentación, en la cual se recopiló información acerca de:

- Los diferentes microcontroladores y microprocesadores existentes en el mercado que manejen comunicación USB, SERIAL, Ethernet con stack TCP.
- Funcionamiento y programación de las aplicaciones AGA3 y AGA8.
- Investigación y desarrollo de los Protocolos de comunicación Modbus-RTU y Modbus-TCP.
- Otras herramientas necesarias para el desarrollo del equipo.

Fase 2. Desarrollo, en la cual se diseñaron los módulos que comprenden el computador de flujo. Estos módulos se pueden diseñar y comprobar su funcionamiento de forma separada para posteriormente ser integrados en un solo módulo.

Fase 3. Integración de los módulos y pruebas de funcionamiento del software. Comprobar el funcionamiento del equipo bajo todas las características definidas por las normas AGA.

Fase 4. Presentación de resultados y conclusiones, elaboración del informe final que presente las etapas del proyecto, su respectivo desarrollo, recomendaciones y conclusiones.

CAPÍTULO II

MARCO REFERENCIAL TEÓRICO

Para la mejor comprensión del tema tratado en este trabajo, se presentan a continuación una serie de definiciones de algunos términos de interés: [1]

- Termodinámica

Es una rama de la física que estudia principalmente el flujo de energía en sus distintas formas, y permite definir las características que posee un sistema en un estado determinado.

- Temperatura

La temperatura es un parámetro termodinámico que, junto con otros, define el estado de un sistema en un momento determinado. La temperatura no es una propiedad del sistema, es un parámetro que define un estado. A la temperatura medida en grados Kelvin se le denomina “temperatura absoluta”.

- Presión

Se define como la fuerza ejercida perpendicularmente por un fluido sobre una superficie. En este sentido, las unidades de presión corresponden a unidades de fuerza sobre área. Si la fuerza es medida en Newton (N) y el área en metros cuadrados (m^2), se tiene la unidad conocida como Pascal (Pa). Su equivalente en el sistema inglés es el psi. La presión puede ser medida de forma absoluta (presión total) o relativa (presión por encima de la presión atmosférica, también llamada

manométrica). Se puede ir de una a otra, simplemente sumando o restando la presión atmosférica, según sea el caso.

- Volumen

El volumen se define como el espacio que ocupa un cuerpo. Es denotado, generalmente, con una “V” mayúscula.

- Mol

El mol es la unidad básica para contabilizar cantidad de sustancia. Un mol corresponde a $6,023 \times 10^{23}$ partículas de una sustancia, que bien podrían ser átomos, moléculas, iones, electrones, según sea el caso. El número $6,023 \times 10^{23}$ es conocido como Número de Avogadro.

- Volumen Molar

El volumen molar es una propiedad de un material definida como el volumen que ocupa cada mol. Generalmente se denota con “v” minúscula.

- Densidad

La densidad es la propiedad inversa del volumen molar, y se define como la cantidad de materia que ocupa una unidad de volumen. La densidad puede ser molar (d, número de moles entre unidad de volumen) o másica (ρ , masa entre unidad de volumen).

- Comportamiento PVT de las Sustancias

Diversos cálculos en la industria parten de la determinación de datos volumétricos o del conocimiento de la relación Presión-Temperatura-Volumen para la sustancia en análisis.

Cada sustancia posee un comportamiento particular en cuanto a las relaciones que existen entre dos parámetros. Este comportamiento es comúnmente representado en diagramas conocidos como P-V y P-T. Estos diagramas muestran las divisiones donde ocurre un cambio de fase entre vapor y líquido, el cual describe una zona en forma de domo, dentro de la cual se encuentran en equilibrio ambos estados (dos fases). Se han desarrollado ecuaciones funcionales que relacionan a P, T y V en las zonas de una fase. Estas ecuaciones se conocen como “ecuaciones de estado”. La más sencilla de estas ecuaciones es la del gas ideal ($P \cdot V = n \cdot R \cdot T$), cuya validez es muy restringida.

- Factores de Compresibilidad

Si se generaliza la ecuación de los gases ideales para condiciones de mayor presión y para fluidos no ideales, se debe definir un nuevo término conocido como *Factor de Compresibilidad*, cuya expresión matemática es la siguiente:

$$Z = \frac{P \cdot V}{n \cdot R \cdot T} \quad (1)$$

Este valor es característico para cada sustancia y para las condiciones termodinámicas en el momento del cálculo. Este valor es adimensional.

- Factores de Supercompresibilidad

El factor de supercompresibilidad se define como el cociente resultante de dividir el factor de compresibilidad a condiciones estándar de presión y temperatura (temperatura de 288,71 K y presión de 0,10156 MPa) entre el factor de compresibilidad a las condiciones del fluido.

- Hidrocarburos

Se conocen con este nombre todos aquellos compuestos químicos formados de átomos de carbono e hidrógeno.

- Gas Natural

El gas natural está constituido principalmente por hidrocarburos extraídos directamente de formaciones geológicas. Normalmente, el gas natural se encuentra acompañando depósitos de petróleo o carbón en rocas porosas.

- Fracción Molar

También conocida como porcentaje molar, la fracción molar de un compuesto es la relación entre el número de moles del mismo y el número de moles totales de las especies que forman la mezcla (incluyendo el compuesto en cuestión). La fracción molar de un compuesto no varía con cambios de presión, temperatura o volumen. La ecuación Ec. 1.2 a continuación define este concepto:

$$x_{\text{compuesto}} = \frac{n_{\text{compuesto}}}{n_{\text{totales}}} \quad (2)$$

- Fracciones Másicas

La fracción másica de un compuesto es la relación entre la masa del mismo y la masa total de las especies que forman la mezcla, incluyendo el compuesto en cuestión. Al igual que las fracciones molares, este valor no varía ante cambios de presión, temperatura o volumen. La ecuación Ec. 1.3 define la fracción másica de un compuesto:

$$X_{compuesto} = \frac{m_{compuesto}}{m_{total}} \quad (3)$$

- Punto de Rocío

Es el valor de presión y temperatura en el cual, bien sea por aumento de la presión o disminución de la temperatura, aparece la primera gota de líquido en una fase de vapor.

- Fases

Una fase se considera líquida en general, si se produce vaporización a partir de la reducción de presión a temperatura constante. Una fase se considera gas si se produce una condensación a partir de la reducción de temperatura a presión constante.

- Punto Crítico

Es el punto de presión y temperatura por encima del cual no ocurren procesos de cambio de fase líquido-vapor. En el punto crítico las fases líquidas y gaseosas poseen las mismas propiedades y son indiferenciables. La zona de presión y temperatura mayores a las críticas se conoce como región de fluido.

- Masa Molar

También conocida como peso molecular, la masa molar es la masa de un mol de átomos o moléculas de una sustancia en particular, expresada en gramos. Sus unidades son gramos entre mol (g/mol).

- Valor Calórico

El valor calórico de un gas es el valor energético desprendido en la reacción de combustión del mismo.

- Normas AGA

La Asociación Americana de Gas (*AGA, American Gas Association*), fundada en 1.918, establece una serie de normas en las cuales se especifican los procedimientos adecuados y necesarios para realizar mediciones de mezclas de gas.

1. Reporte N° 8 de las Normas AGA. Factores de Compresibilidad de Gas Natural y otros Gases Hidrocarburos. [2]

Este manual proporciona toda la información técnica necesaria para el cálculo de los factores de compresibilidad y supercompresibilidad, así como las densidades para el gas natural y otros gases hidrocarburos relacionados.

- 1.1. Antecedentes.

Las investigaciones realizadas en 1.928 y 1.929, bajo la dirección del Sr. Howard S. Bean del *Nacional Bureau of Standards* proporcionaron a la industria del gas natural sus primeros datos de factores de compresibilidad, abarcando presiones de hasta 600 psia (4 MPa). Sin embargo, no fue hasta 1.954 que fueron publicadas

extensas tablas de factores de supercompresibilidad para gas natural, basadas en pruebas supervisadas por el Profesor Samuel R. Beitler de la *Ohio State University*. Las tablas de factor de supercompresibilidad de gas fueron ampliadas, y se desarrolló una ecuación de estado entre 1.956 y 1.962 bajo la dirección del Sr. Zimmerman de la *Ohio State University*. Los resultados de este proyecto, denominado PAR Project NX-19, aparecen en el “*Manual for Determination of Supercompressibility Factors for Natural Gas*”, de la AGA, publicado en 1.962.

La investigación que generó el reporte N° 8 de las normas AGA (*Compressibility Factors for Natural Gas and Other Related Hydrocarbon Gases*) se inicia en 1.981 bajo el respaldo de la GRI, en alianza con la AGA *Transmission Measurement Committee*. Esta investigación, desarrollada bajo la dirección del Profesor Kenneth E. Starling de la *University of Oklahoma*, fue dirigida a extender las capacidades para el cálculo preciso del factor de compresibilidad más allá de los rangos de temperatura, presión y composición del proyecto PAR Project NX-19. Los resultados para la calidad de la tubería del gas natural (pipeline quality natural gases), completados en 1.984, proporcionaron la base para el reporte de 1.985.

La investigación inicial entre 1.981 y 1.984 utilizó datos de presión de hasta aproximadamente 900 psi (6 MPa), obtenidos de la literatura y proporcionados por la GERG. Sin embargo, el banco de datos de la GERG fue considerablemente ampliado en el período comprendido entre 1.985 y 1.990. Los nuevos datos mostraron que la ecuación de estado original, desarrollada entre 1.981 y 1.984, necesitaba ser mejorada. Adicionalmente, los datos de velocidad del sonido, obtenidos bajo el patrocinio de la GRI durante 1.985 hasta 1.989, mostraron que los cálculos para gases ricos no eran suficientemente precisos para aplicaciones de flujo crítico. Las nuevas ecuaciones de estado presentadas en esta revisión incluyen los datos más recientes de la GRI y la GERG de factores de compresibilidad para mezclas de gases naturales. Adicionalmente, el método revisado posee una metodología de correlación ampliada

y revisada por investigadores bajo la dirección del Profesor Richard T. Jacobsen de la *University of Idaho*.

1.2. Campo de Aplicación

A continuación se establecen las propiedades de gas cuyos cálculos están definidos en esta norma, así como los tipos de gas para los cuales puede ser aplicada dicha normativa.

1.2.1. Tipos de Propiedades

La información detallada en este reporte acerca del cálculo de factores de compresibilidad, factores de supercompresibilidad y densidad, puede ser aplicada directamente en cálculos de volumen de gas y velocidad del flujo de gas. Estos cálculos pueden ser usados además en otras instancias, donde es importante la relación entre temperatura, presión y volumen del gas. Un ejemplo pertinente son los cálculos de los reservorios de gas. Las propiedades termodinámicas derivadas que pueden ser calculadas usando la información en este reporte incluyen capacidad calorífica, entalpía, entropía, velocidad del sonido, factor de flujo crítico y potencial químico de los componentes. Las aplicaciones del uso de estas propiedades incluyen cálculos de toberas, cálculos de compresores, cálculos de intercambiadores de calor, cálculos de reacciones de equilibrio de mezclas de gases y cálculos de componentes de fugacidad para mezclas de gases (para su uso en cálculos de equilibrio líquido-vapor).

1.2.2. Tipos de Gases

Este reporte se ha realizado para gases naturales y otros gases de hidrocarburos relacionados. La información en este reporte sólo puede ser usada para el cálculo de factores de compresibilidad y densidades de metano, etano, nitrógeno,

dióxido de carbono, hidrógeno y sulfuro de hidrógeno puros, y para mezclas de gases de hasta 21 compuestos. En la tabla 1 se identifican los rangos de las características de las mezclas de gas para las cuales la incertidumbre promedio esperada se corresponde con la incertidumbre mostrada en la figura 2.

Tabla 1. Rangos Característicos de Mezclas de Gas Consistentes con este Reporte.

Cantidad	Rango Normal	Rango Expandido
Densidad relativa*	0,554 a 0,87	0,07 a 1,52
Valor de calefacción aproximado**	477 a 1150 Btu/sfc	0 a 1800 Btu/scf
Valor de calefacción aproximado***	18,7 a 45,1 MJ/m ³	0 a 66 MJ/m ³
Fracción molar de Metano	45,0 a 100,0	0 a 100,0
Fracción molar de Nitrógeno	0 a 50,0	0 a 100,0
Fracción molar de Dióxido de Carbono	0 a 30,0	0 a 100,0
Fracción molar de Etano	0 a 10,0	0 a 100,0
Fracción molar de Propano	0 a 4,0	0 a 12,0
Fracción molar de Butanos totales	0 a 1,0	0 a 6,0
Fracción molar de Pentanos totales	0 a 0,3	0 a 4,0
Fracción molar de Hexanos	0 a 0,2	0 a punto de rocío
Fracción molar de Helio	0 a 0,2	0 a 3,0
Fracción molar de Hidrógeno	0 a 10,0	0 a 100,0
Fracción molar de Monóxido de Carbono	0 a 3,0	0 a 3,0
Fracción molar de Argón	+	0 a 1,0
Fracción molar de Oxígeno	+	0 a 21,0
Fracción molar de Agua	0 a 0,05	0 a punto de rocío
Fracción molar de Sulfuro de Hidrógeno	0 a 0,02	0 a 100,0
* Condición de Referencia: densidad relativa a 333,15 K y 0,1015598 MPa. ** Condiciones de Referencia: combustión a 333,15 K y 0,1015598 MPa; densidad a 333,15 K y 0,1015598 MPa. *** Condiciones de Referencia: combustión a 298,15 K y 0,101325 MPa; densidad a 273,15 K y 0,101325 MPa. + El rango normal se considera cero (0) para estos compuestos.		

El rango expandido de las características de gas posee una incertidumbre asociada que se espera sea mayor, especialmente fuera de la región 1 de la figura 2. El uso de este reporte no se recomienda para los cálculos de las propiedades físicas de gases con porcentajes molares de componentes fuera de los rangos dados en la tabla 1.

Actualmente no se dispone de una base de datos aceptable para determinar la incertidumbre de las propiedades del gas calculadas para el agua, hidrocarburos pesados y sulfuro de hidrógeno en gases naturales. Por lo tanto, para fines prácticos, la única limitación es que los cálculos son para la fase gaseosa. Así, los límites son el punto de rocío de los hidrocarburos para el porcentaje molar de los hidrocarburos pesados, y para el sulfuro de hidrógeno puro. La presentación de los diversos métodos de cálculo, usando los métodos de caracterización de hidrocarburos pesados usados en la industria del hidrocarburo, está fuera del alcance de este reporte.

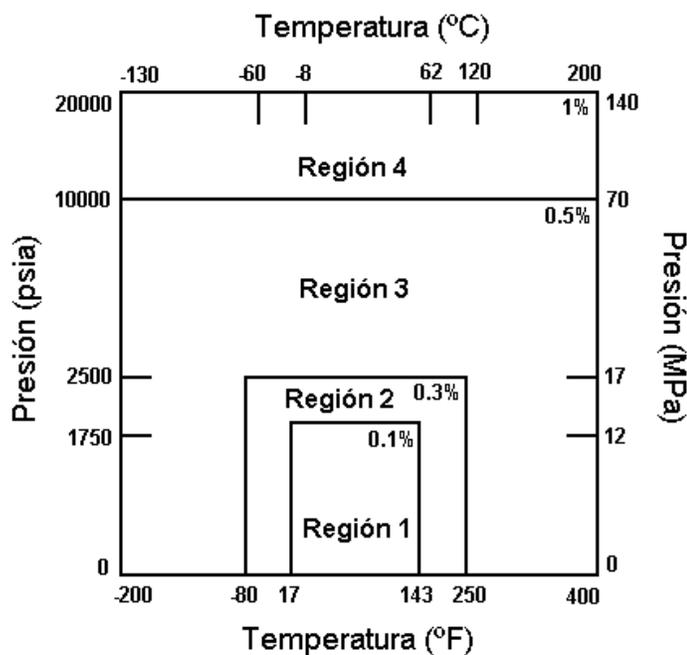


Figura 2. Incertidumbre para factores de compresibilidad para gas natural usando el método de Caracterización Detallada.

1.2.3. Tipos de Condiciones

Este reporte sólo es válido para la fase gaseosa. Puede ser ampliado para temperaturas desde 144,26 K hasta 677,59 K (-130 °C a 400 °C) a presiones de hasta 280 MPa. La aplicación en condiciones extremas debe ser verificada por otras vías (por ejemplo, verificación experimental). El uso de los métodos de cálculo no se recomienda cerca de la vecindad del punto crítico.

1.3. Descripción de los métodos de cálculo del Factor de Compresibilidad

El reporte N° 8 de las Normas AGA proporciona métodos recomendados para el cálculo altamente preciso de factores de compresibilidad y densidades para los procesos de transferencia y custodia de gas natural y otras aplicaciones de medición de gas. Se proporcionan dos métodos de ecuaciones de estado. Toda la información necesaria para la eficiente implementación del método apropiado está contenida en este reporte.

Los dos métodos se diferencian en los parámetros de entrada necesarios para los cálculos de la ecuación de estado. Un método usa el conocimiento detallado de la composición del gas para calcular el factor de compresibilidad (por ejemplo, usando el análisis del gas). Este método es referenciado en lo sucesivo como “Método de Caracterización Detallada”. Puede ser aplicado para todo el rango de temperatura, presión y composiciones referido en la sección 1.2 (Campos de aplicación). El segundo método aplica un conocimiento agregado o aproximado de la composición del gas natural (dado por el valor calórico y/o la densidad relativa y la información del contenido de diluyente) para calcular el factor de compresibilidad. Este método es referido en lo sucesivo como “Método de Caracterización Aproximada”. El Método de Caracterización Aproximada puede ser aplicado en una región limitada de temperatura y presión para la composición de gas natural mostrada en la columna de rango normal de la tabla 1. Ambos métodos requieren del uso de temperatura y

presión en unidades absolutas y de un análisis del gas para inicialmente determinar el método aplicable.

1.3.1. Método de Caracterización Detallada

Fue desarrollado para describir con exactitud el comportamiento temperatura-presión-densidad de la fase gaseosa de las mezclas de gas natural en un amplio rango de condiciones. El método también puede predecir con exactitud el comportamiento presión-temperatura-densidad de la fase gaseosa de los componentes metano, etano, dióxido de carbono, nitrógeno e hidrógeno puros y mezclas de estos componentes. Adicionalmente, se desarrolla una correlación a baja densidad para el propano, hidrocarburos más pesados y mezclas binarias de estos componentes con metano, etano, nitrógeno y dióxido de carbono.

1.3.2. Método de Caracterización Aproximada

Este método fue desarrollado usando la base de datos de características de gas natural, presentadas en la tabla 2, para calcular precisamente los factores de compresibilidad para gases naturales húmedos y secos.

1.4. Recomendaciones

El Método de Caracterización Aproximada, debido a su simplicidad, es recomendado para cálculos de factores de compresibilidad de gas natural y densidades para temperaturas entre 273,15 K hasta 328,15 K (0 °C hasta 55 °C), para presiones de hasta 8.3 MPa (1200 psi), y para características del gas natural dentro del rango normal definido en la tabla 1. Para todas las otras condiciones y composiciones del gas natural, se recomienda el Método de Caracterización Detallada. En aquellos casos en los que las condiciones de operación excedan la

presión, temperatura o límites de composición del Método de Caracterización Aproximada, se recomienda el Método de Caracterización Detallada.

Tabla 2. Rangos Nominales Característicos del gas natural de datos experimentales disponibles para factor de compresibilidad usados para probar Métodos de Caracterización Detallada y Aproximada.

Cantidad	Rango
Densidad relativa*	0,554 a 0,87
Valor calórico aproximado**	477 a 1150 Btu/scf
Valor calórico aproximado***	18,7 a 45,1 MJ/m ³
Fracción molar de Metano	45,2 a 98,3
Fracción molar de Nitrógeno	0,3 a 53,6
Fracción molar de Dióxido de Carbono	0,04 a 28,94
Fracción molar de Etano	0,24 a 9,53
Fracción molar de Propano	0,02 a 3,57
Fracción molar de Butanos totales	0,01 a 1,08
Fracción molar de Pentanos totales	0,002 a 0,279
Fracción molar de Hexanos	0,0005 a 0,1004
Fracción molar de Helio	0 a 0,158
* Condición de Referencia: densidad relativa a 288,70 K y 0,1015598 MPa.	
** Condiciones de Referencia: combustión a 288,70 K y 0,1015598 MPa; densidad a 288,70 K y 0,1015598 MPa.	
*** Condiciones de Referencia: combustión a 298,15 K y 0,101325 MPa; densidad a 273,15 K y 0,101325 MPa.	
† El rango normal se considera cero (0) para estos compuestos.	

2. Reporte N° 3 Normas AGA. Medición de Orificio de Gas Natural y otros Fluidos Hidrocarburos Relacionados. [3]

El reporte N° 3 de las Normas AGA se aplica a fluidos que, para todos los propósitos prácticos, se consideran limpios, en una sola fase, homogéneos y Newtonianos. Se describen los antecedentes y el desarrollo de la ecuación para el coeficiente de descarga de medidores de orificio concéntricos de borde cuadrado, con medición de presión en la abrazadera, y se recomienda un procedimiento de cálculo para la velocidad de flujo. Los procedimientos recomendados proporcionan resultados de cálculo consistentes para la cuantificación del flujo bajo condiciones

definidas, sin importar el punto de origen o destino, o las unidades de medición requeridas por los estatutos o aduanas gubernamentales. Los procedimientos permiten diferentes usos con diferentes lenguajes de programación en diferentes hardwares para obtener resultados casi idénticos usando los mismos valores de entrada estandarizados.

El reporte N° 3 de las Normas AGA describe los cálculos métricos para la medición de flujo de gas natural aplicando la técnica de placa orificio. La técnica de placa orificio consiste en una placa perforada que se instala en la tubería; para captar la presión diferencial que origina la placa orificio es necesario conectar dos tomas, aguas arriba y aguas abajo de la placa. La disposición de las tomas puede ser en las bridas, en la vena contraída o en la tubería; esta disposición dependerá del tamaño de la tubería.

2.1. Antecedentes

Este reporte ha sido desarrollado a través de los esfuerzos cooperativos de muchos individuos de la industria, bajo el patrocinio de la American Gas Association (AGA), el American Gas Petroleum Institute, y la Gas Processors Association, con la contribución de la Chemical Manufacturers Association, la Canadian Gas Association, la European Community, Noruega, Japón y otros.

2.2. Campo de Aplicación

A continuación se definen los tipos de fluidos a los que puede ser aplicada esta normativa, así como también se señalan las especificaciones para los medidores de orificio para la determinación del flujo de los gases contenidos en las tuberías.

2.2.1. Fluidos Aplicables

Este estándar se aplica a fluidos con condiciones de flujo en estado de equilibrio con número de Reynolds para la tubería de 4000 o mayor. Todos los gases, la mayoría de los líquidos y de los fluidos de fase densa asociados con el petróleo, petroquímica e industrias de gas natural, son generalmente considerados fluidos Newtonianos.

2.2.2. Tipos de Medidores

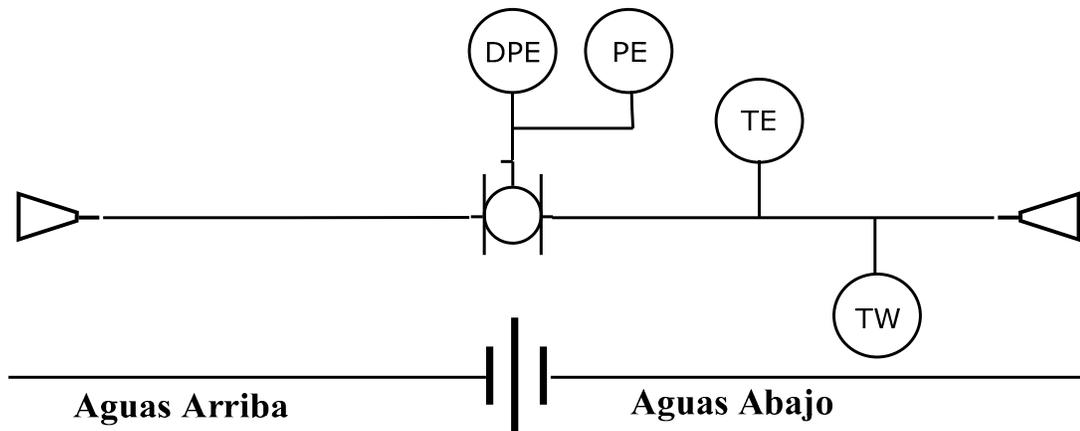
Este estándar provee las especificaciones de diseño, construcción e instalación para medidores de orificio con medición de presión en la abrazadera, concéntricos, de borde cuadrado, de diámetros nominal de 2 pulgadas y diámetros superiores de la tubería.

El medidor de orificio es un dispositivo ideado para medir determinado flujo, que produce una presión diferencial para inferir la velocidad del fluido. El medidor consta de los siguientes elementos (ver figura 3):

- Una placa orificio delgada, concéntrica y de borde cuadrado.
- Un recipiente de placa orificio que consiste en una serie de orificios en la abrazadera (o un agujero adecuado) equipados con los medidores de presión diferencial apropiados.
- Un tubo de medición que consta de las secciones de tuberías adyacentes (con o sin acondicionadores de flujo).

Los dispositivos auxiliares o secundarios necesarios para la precisa determinación de la velocidad de flujo están fuera del alcance de este estándar. Estos dispositivos son, generalmente, instrumentos que miden presión diferencial y presión

estática, temperatura del fluido, densidad del fluido y/o densidad relativa, así como dispositivos de registro mecánico o calculadoras electrónicas.



Sujetador de la Placa Orificio



Pestaña de Soldadura



Elemento de Medición de Presión Diferencial



Elemento de Medición de Presión Estática Aguas Abajo



Elemento de Medición de Temperatura Aguas Abajo



Termopozo

Figura 3. Medición de Orificio.

2.3. Método de Cálculo

El estándar AGA 3 proporciona los métodos de implementación de cálculo estandarizado recomendados para la cuantificación de caudal de un fluido bajo determinadas condiciones.

Los siguientes dos métodos de implementación recomendados se han preparado para ilustrar el juego de expresiones matemáticas y secuencias estandarizadas, incluyendo las técnicas de iteración:

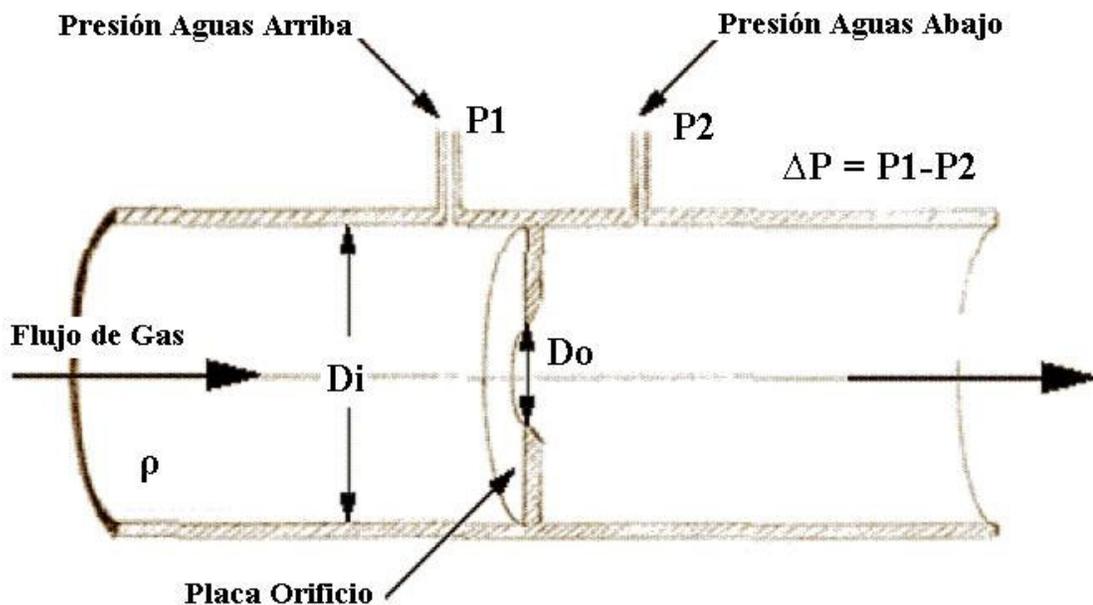
- Caudal másico
- Caudal volumétrico estándar

2.4. Definiciones

Este reporte refleja las aplicaciones de la medición de orificio para medición de flujo. Las definiciones siguientes enfatizan el significado particular de los términos usados en este reporte.

2.4.1. Elemento Primario

El elemento primario se define como la placa orificio, el recipiente de la placa orificio con sus sensores de presión diferencial asociados, y el tubo de medición. Un esquema general de un sistema de medición de placa orificio se puede apreciar en la figura 4.



D_o = Diámetro del Orificio ΔP = Presión Diferencial
 D_i = Diámetro Interno de la Tubería
 ρ = Densidad del Gas

Figura 4. Esquema de un Medidor de Placa Orificio

2.4.2. Determinación de la velocidad del fluido

A continuación se describen las diferentes mediciones de velocidad de flujo que establece la norma.

2.4.2.1. Velocidad de flujo a través del orificio (q_m , q_v , Q_v)

Es el flujo másico o volumétrico que pasa a través de un medidor de orificio por unidad de tiempo.

2.4.2.2. Coeficiente de descarga de la placa orificio (C_d)

Es la velocidad de flujo verdadero respecto al flujo teórico, y es aplicado a la ecuación de flujo teórico para así obtener el flujo real (verdadero).

2.4.2.3. Velocidad de acercamiento (E_v)

El factor de velocidad de acercamiento es una expresión matemática que relaciona la velocidad del fluido en la sección de acercamiento del medidor de orificio (aguas arriba del tubo de medición) a la velocidad del fluido en el orificio de la placa.

2.4.2.4. Factor de expansión (Y)

Es una expresión empírica usada para corregir el efecto sobre la velocidad de flujo que tiene la reducción de densidad que experimenta un fluido compresible, cuando pasa a través del orificio de una placa.

2.4.2.5. Número de Reynolds en una tubería (Re_D)

El Número de Reynolds en una tubería es una tasa adimensional de las fuerzas, usada para correlacionar las variaciones en el coeficiente de descarga de la placa orificio (C_d) que ocurren con los cambios en las propiedades del fluido, de la velocidad del flujo y de la geometría del medidor de orificio.

3. Sistemas embebidos [4]

Un sistema embebido se define como un sistema informático destinado a un uso determinado y que forma parte de un dispositivo mayor. Estos sistemas embebidos son utilizados para fines diferentes a los de un computador personal.

Ejemplos de sistemas embebidos se encuentran en los sistemas de información integrados en automóviles, trenes o aviones, y en controladores de proceso en sistemas de producción industrial.

Debido a que los sistemas integrados son fabricados en lotes de gran cantidad de unidades, es importante la búsqueda de la reducción de costos. Los sistemas integrados suelen usar un procesador pequeño y una memoria pequeños para poder así reducir costos. Sin embargo, existe el problema de que un fallo en un elemento implica la necesidad de reparar la tarjeta madre completa.

Es importante resaltar que, a pesar de contar con procesadores pequeños, no implica que los sistemas integrados trabajen a la velocidad del reloj. Lo que se busca es simplificar la arquitectura del computador para reducir los costos.

3.1. Componentes de un sistema embebido

3.1.1. En la parte central se encuentra la CPU o unidad que aporta inteligencia al sistema; nos referimos al microprocesador, microcontrolador y DSP entre otros. Dependiendo del sistema empleado, puede incluir memoria interna o externa, o un micro con arquitectura específica de acuerdo a los requerimientos.

3.1.2. La comunicación cumple un papel importante en los sistemas integrados. Comúnmente el sistema se comunica mediante interfaces estándar cableadas o inalámbricas. De acuerdo con esto, un sistema embebido normalmente incorpora puertos de comunicaciones del tipo RS232, RS485, SPI, I²C, USB, IP, WiFi, GSM, DSR.

3.1.3. El sistema de presentación puede ser cualquier pantalla, bien sea gráfica, táctil, de cristal líquido (LCD) o alfanumérica.

- 3.1.4. Un sistema embebido cuenta también con actuadores, que son elementos electrónicos que el sistema debe controlar. Ejemplos de actuador se encuentran en un motor eléctrico, un conmutador tipo relé, entre otros. El actuador encontrado con más frecuencia en los sistemas embebidos consiste en una salida de señal PWM para control de la velocidad de motores de corriente continua.
- 3.1.5. Los módulos de Entradas/Salidas analógicas y digitales se emplean para digitalizar señales analógicas que provienen de sensores, activar diodos LED, reconocer el estado abierto o cerrado de un conmutador o pulsador.
- 3.1.6. El módulo de reloj es quien genera las señales de reloj a partir de un único oscilador principal. La elección del tipo de oscilador apropiado es importante por diversas razones: la frecuencia, estabilidad y el consumo de corriente requeridos. Los osciladores que cuenta con las más óptimas características de estabilidad y costo son los basados en resonador de cristal de cuarzo, mientras que los que requieren menor consumo son los RC. Los sistemas PLL permiten generar otras frecuencias con la misma estabilidad que el oscilador patrón.
- 3.1.7. El módulo de energía es el encargado de generar las diferentes tensiones y corrientes necesarias para la alimentación de los circuitos que conforman el sistema embebido. Generalmente se trabaja con un rango de tensiones de entrada que, utilizando convertidores de corriente AC/DC o DC/DC, generan las tensiones necesarias para alimentar los componentes activos del circuito.
- 3.1.8. Además de los convertidores AC/DC y DC/DC, se encuentran otros módulos comunes, tales como filtros, circuitos integrados supervisores de alimentación, etc. El consumo de energía puede ser determinante en el desarrollo de algunos sistemas embebidos que se alimentan únicamente con baterías cuya

sustitución no es posible, de manera que la vida del sistema se reduce a la vida de las baterías.

3.2. Microprocesadores y sistemas embebidos

Un microprocesador es una implementación de la CPU (Unidad Central de Proceso) de un computador en forma de circuito integrado. Los microprocesadores se encuentran en presentaciones con diversos consumos de potencia, complejidad y costo.

Un microcontrolador es un circuito integrado formado por un CPU, unidades de memoria y circuitos de Entrada/Salida. Entre los circuitos de E/S que incorporan los microcontroladores podemos citar los temporizadores, los convertidores analógico a digital (ADC) y digital a analógico (DAC), así como los canales de comunicaciones serie.

En general, un sistema embebido es un sistema conformado por un microprocesador cuyo hardware y software están diseñados y optimizados para resolver un problema específico de manera eficiente. Generalmente los sistemas embebidos son empleados para supervisar determinados procesos utilizando una serie de sensores. Un sistema embebido simple dispone también de memoria, algunos periféricos de E/S y un programa que se almacena en la memoria de forma permanente y que está destinado a una aplicación en específico. El término embebido implica el hecho de que el microprocesador está encerrado dentro de un sistema mayor, siendo no aparente su existencia como microcomputador.

Un sistema embebido complejo puede utilizar un sistema operativo como apoyo para la ejecución de sus programas, sobre todo cuando se requiere la ejecución simultánea de los mismos. Cuando se utiliza un sistema operativo es muy probable que se trate de un sistema operativo en tiempo real (RTOS), que es un sistema

operativo diseñado y optimizado para manejar fuertes restricciones de tiempo asociadas con eventos en aplicaciones de tiempo real. En una aplicación de tiempo real compleja la utilización de un RTOS multitarea puede simplificar el desarrollo del software.

3.3. Ventajas de un sistema embebido sobre las soluciones industriales tradicionales

- Posibilidad de utilización de sistemas operativos potentes que ya realizan numerosas tareas: comunicaciones por redes de datos, soporte gráfico, concurrencia con lanzamiento de *threads*. Estos sistemas operativos pueden ser los mismos que para PCs compatibles (Linux, Windows, MS-DOS) con fuertes exigencias en hardware, o bien ser una versión reducida de los mismos con características orientadas a los PCs embebidos.
- Al utilizar dichos sistemas operativos se pueden encontrar fácilmente herramientas de desarrollo de software potentes, así como numerosos programadores que las dominan, dada la extensión mundial de las aplicaciones para PCs compatibles.
- Reducción en el precio de los componentes del hardware y software, debido a la gran cantidad de PCs en el mundo.

4. Computador de Flujo

Los computadores de flujo son equipos utilizados para la medición de volumen de gas. La medición del flujo, así como los valores de presión, temperatura y densidad, son concentrados en el computador de flujo; éste realiza la integración de la señal de flujo para obtener el volumen bruto y a partir de los valores de temperatura, presión y densidad, realiza el cálculo para la obtención del volumen neto. Todos estos datos operativos pueden ser enviados desde el computador de flujo a las estaciones de monitoreo y control para su registro y posterior explotación. [5]

5. ARM (*Advanced RISC Machines*) [6]

Se denomina ARM a una familia de microprocesadores RISC diseñados por la empresa *Acorn* y desarrollados por *Advanced RISC Machines Ltd*, una empresa derivada de la anterior.

5.1. Historia

El diseño de ARM comenzó en 1.983 como un proyecto de desarrollo en la empresa *Acorn Computers Ltd*. Roger Wilson y Steve Furber lideraban el equipo, cuya meta en un principio consistía en el desarrollo de un procesador avanzado, pero conservando una arquitectura similar a la del MOS 6502. La razón de esto es que *Acorn* tenía una extensa línea de ordenadores personales basados en dicho micro, por lo que tenía sentido desarrollar uno con el que los fabricantes se sintieran cómodos.

El mayor uso de la tecnología de procesadores ARM se alcanzó con el procesador ARM7TDMI, con millones de unidades en teléfonos móviles y sistemas de videojuegos portátiles. Con una velocidad de reloj de 233 MHz, este procesador consume sólo 1 watt de potencia (este consumo de energía se ha reducido en versiones más recientes). Esta tecnología pasó posteriormente a manos de *Intel*, como fruto de un acuerdo jurídico, que la integró en su línea de procesadores Intel i960 e hizo más ardua la competencia.

5.2. Diseño

El juego de instrucciones del ARM es similar al del MOS 6502, pero incluye características adicionales que le permiten conseguir un mejor rendimiento en su ejecución. Para poder mantener el concepto tradicional del RISC, se incluyó el comando de ejecución en un tiempo significativamente óptimo, siendo, por lo general, en un ciclo. La característica más interesante es el uso de los 4 bits como código

condicional en la parte superior de cada instrucción, permitiendo que cada instrucción pueda ser una condición.

Este corte permite aumentar el espacio para algunos desplazamientos en el acceso a la memoria, pero permite también evitar caer en ciclos fuera de control cuando la aplicación es para pequeñas instrucciones condicionadas.

El procesador ARM también tiene algunas características que no son comunes en otras arquitecturas también consideradas RISC, tales como el direccionamiento relativo y el pre y post incremento en el modo de direccionamiento.

El ARM cuenta con dos modos de funcionamiento: el ARMI, con instrucciones que ocupan 4 bytes, más rápidas y potentes (hay instrucciones que sólo están en este modo) pero con mayor consumo de memoria y de electricidad, y el modo THUMB, más limitado, con instrucciones que ocupan 2 bytes y con menor consumo de corriente.

5.3. StrongARM

El procesador StrongARM fue fruto de la colaboración en 1.995 entre ARM y DEC, la que luego fue adquirida por Compaq.

DEC fabricó varios microprocesadores StrongARM basados en los núcleos de procesador RISC a 32 bits, que se utilizaban en terminales de redes. A finales del año 1.997, Intel compró la tecnología StrongARM, y poco después anunciaba su intención de utilizar los procesadores de StrongARM en dispositivos personales como los entonces emergentes PDA.

6. Microcontrolador PIC [7]

Los PIC son una familia de microcontroladores tipo RISC fabricador por *Microchip Technology Inc.* y derivados del PIC1650, originalmente desarrollado por la división de microelectrónica de *General Instruments*.

El nombre actual no es un acrónimo. De hecho, el nombre completo es PICmicro, aunque generalmente se utiliza como *Peripheral Interface Controller* (controlador de interfaz periférico).

6.1. Juego de instrucciones y entorno de programación

El PIC usa un juego de instrucciones tipo RISC, cuyo número puede variar desde 35, para PICs de gama baja, hasta 70 para los de gama alta. Las instrucciones se clasifican en aquéllas que realizan operaciones entre el acumulador y una constante, entre el acumulador y una posición de memoria, instrucciones de condicionamiento y de salto/retorno, implementación de interrupciones, y una para pasar a modo de bajo consumo llamada *sleep*.

Microchip proporciona un entorno de desarrollo freeware llamado MPLAB, que incluye un simulador de software y un ensamblador. Otras empresas desarrollan compiladores C y BASIC.

6.2. Programación del PIC

Para transferir el código de un computador al PIC, normalmente se usa un dispositivo llamado programador. La mayoría de PICs que Microchip distribuye hoy en día incorporan ICSP (*In Circuit Serial Programming*, programación serie incorporada) o LVP (Low Voltage Programming, programación a bajo voltaje), lo que permite programar el PIC directamente en el circuito destino. Existen muchos

programadores de PICs, desde los más simples, que dejan al software los detalles de comunicaciones, hasta los más complejos, que pueden verificar el dispositivo a diversas tensiones de alimentación e implementan en hardware casi todas las funcionalidades.

6.3. Características

Los PICs actuales vienen con una amplia gama de mejoras de hardware incorporada:

- Núcleos de CPU de 8/16 bits con arquitectura Harvard modificada.
- Memoria Flash y ROM disponible desde 256 bytes hasta 256 kB.
- Puertos de E/S (típicamente 0 a 5,5 V).
- Temporizadores de 8/16 bits.
- Tecnología Nanowatt para módulos de control de energía.
- Periféricos serie sincrónicos y asincrónicos: USART, AUSART, EUSART.
- Conversores analógico/digital de 10-12 bits.
- Comparadores de tensión.
- Módulos de captura y comparación PWM.
- Controladores LCD.
- Periférico MSSP para comunicaciones I²C, SPI y I²S.
- Memoria EEPROM interna con duración de hasta un millón de ciclos de lectura/escritura.
- Periféricos de control de motores.
- Soporte de interfaz USB.
- Soporte de controlador Ethernet.
- Soporte de controlador CAN.
- Soporte de controlador LIN.
- Soporte de controlador Irda.

7. MODBUS [8]

Modbus es un protocolo de comunicaciones ubicado en el nivel 7 (capa de aplicación) del modelo OSI, basado en la arquitectura maestro/esclavo o cliente/servidor, y fue diseñado por Modicon en 1.979 para su gama de PLCs (controladores lógicos programables). Convertido en un protocolo de comunicaciones estándar de facto en la industria, es el que brinda mayor disponibilidad para la conexión de dispositivos electrónicos industriales. Las razones por las que el uso de este protocolo de comunicaciones es superior a otros son las siguientes: es público, su implementación es sencilla y requiere de poco desarrollo, y maneja bloques de datos sin suponer restricciones.

Modbus permite el control de una red de dispositivos. También se usa para la conexión de un computador de supervisión con una unidad remota (RTU) en sistemas de supervisión y adquisición de datos (SCADA). Modbus cuenta con versiones para puerto serie y Ethernet (Modbus TCP).

Modbus RTU es una representación binaria compacta de los datos. Modbus ASCII es una representación legible del protocolo, pero es menos eficiente que Modbus RTU. Ambas implementaciones del protocolo son para puerto serie. El formato RTU finaliza la trama con una suma de CRC (control de redundancia cíclica), mientras que el formato ASCII utiliza una suma de LRC (control de redundancia longitudinal). La versión Modbus TCP es muy parecida al formato RTU, pero establece la transmisión mediante paquetes TCP/IP.

Cada dispositivo de la red Modbus posee una dirección única. Cualquier dispositivo puede enviar órdenes Modbus, aunque lo habitual es permitirlo sólo a un dispositivo maestro. Cada comando Modbus contiene la dirección del dispositivo destinatario de la orden. Todos los dispositivos reciben la trama, pero sólo el destinatario la ejecuta (salvo un modo especial denominado “Broadcast”). Cada uno

de los mensajes incluye información redundante que asegura su integridad en la recepción. Los comandos básicos Modbus permiten controlar un dispositivo RTU para modificar el valor de alguno de sus registros o bien solicitar el contenido de los mismos.

Todas las implementaciones presentan variaciones respecto al estándar oficial. Algunas de las variaciones más habituales son las siguientes:

- Tipos de datos:
 - ✓ Coma flotante IEEE.
 - ✓ Entero de 32 bits.
 - ✓ Datos de 8 bits.
 - ✓ Tipos de datos mixtos.
 - ✓ Campos de bits en enteros.
 - ✓ Multiplicadores para cambio de datos a/de entero.

- Extensiones del protocolo
 - ✓ Direcciones de esclavo de 16 bits.
 - ✓ Tamaño de datos de 32 bits (1 dirección = 32 bits de datos devueltos).

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

1. Diseño de la Metodología

Para la realización de este proyecto se diseñó una metodología que permitió llevar un orden secuencialmente lógico para obtener resultados óptimos en cuanto al desarrollo de los programas planteados. El criterio empleado para este fin consiste en diversas etapas, las cuales se definen a continuación:

1.1. Investigación y documentación

Esta etapa consiste en el conocimiento a fondo sobre las normas AGA a implementar, así como los equipos a utilizar y el protocolo de comunicación que se desea desarrollar. Se recopiló entonces la información contenida en los Reportes N°3 y N°8 de las Normas AGA, donde se definen las ecuaciones y procedimientos necesarios para los cálculos de los factores de compresibilidad, densidad y flujo de gas. Para la comunicación entre los equipos se hizo un estudio de las especificaciones del protocolo Modbus TCP y Modbus RTU. Por último se realizó un estudio de los diferentes tipos de procesadores a utilizar (microprocesador ARM y microcontrolador PIC) para así hacer la elección del equipo más adecuado para el desarrollo del proyecto.

1.2. Desarrollo

Es en esta etapa en la cual se desarrollaron los programas para la implementación de las normas y de los protocolos de comunicación en el microcontrolador y en el microprocesador. Para la implementación de los programas fue necesario realizar previamente los diagramas de flujo que esquematizan la secuencia a seguir para cada aplicación. Se contemplan entonces en esta etapa de la metodología la programación de una aplicación para PC (a modo de referencia), el desarrollo de los programas para la aplicación en el ARM, la implementación del software para el microcontrolador PIC, con su respectiva programación del protocolo de comunicación Modbus RTU. Más adelante, en el punto 2, se explica detalladamente cómo fueron realizados dichos programas.

1.3. Integración de los módulos.

En esta etapa, luego de realizados los programas, se realizan las pruebas de su correcto funcionamiento, y es en esta fase donde se integran los módulos cuyo funcionamiento por separado ha sido comprobado; es decir, se integra el software con las normas AGA implementado en el ARM con el módulo de Entrada/Salida (en este caso, representado por un computador) mediante Modbus TCP, se integra la aplicación en el microcontrolador que ejecuta los cálculos de las normas AGA con el módulo del programa, también en el microcontrolador, que define la comunicación Modbus RTU entre el PIC y un computador.



Figura 5. Diagrama Esquemático. Metodología diseñada.

2. Aplicación de la Metodología

Una vez diseñada la metodología adecuada para el desarrollo del proyecto, se procedió a su aplicación. Se explican ahora con más detalle cada uno de los programas realizados en la etapa de desarrollo, con sus respectivos diagramas de flujo que facilitan la codificación de los mismos.

2.1. Procedimientos de cálculo para implementación de normas AGA.

A continuación se muestran en las figuras 6, 7, 8, 9 y 10 los diagramas de flujo que describen los procedimientos de cálculo establecidos por las normas AGA3 y AGA8.

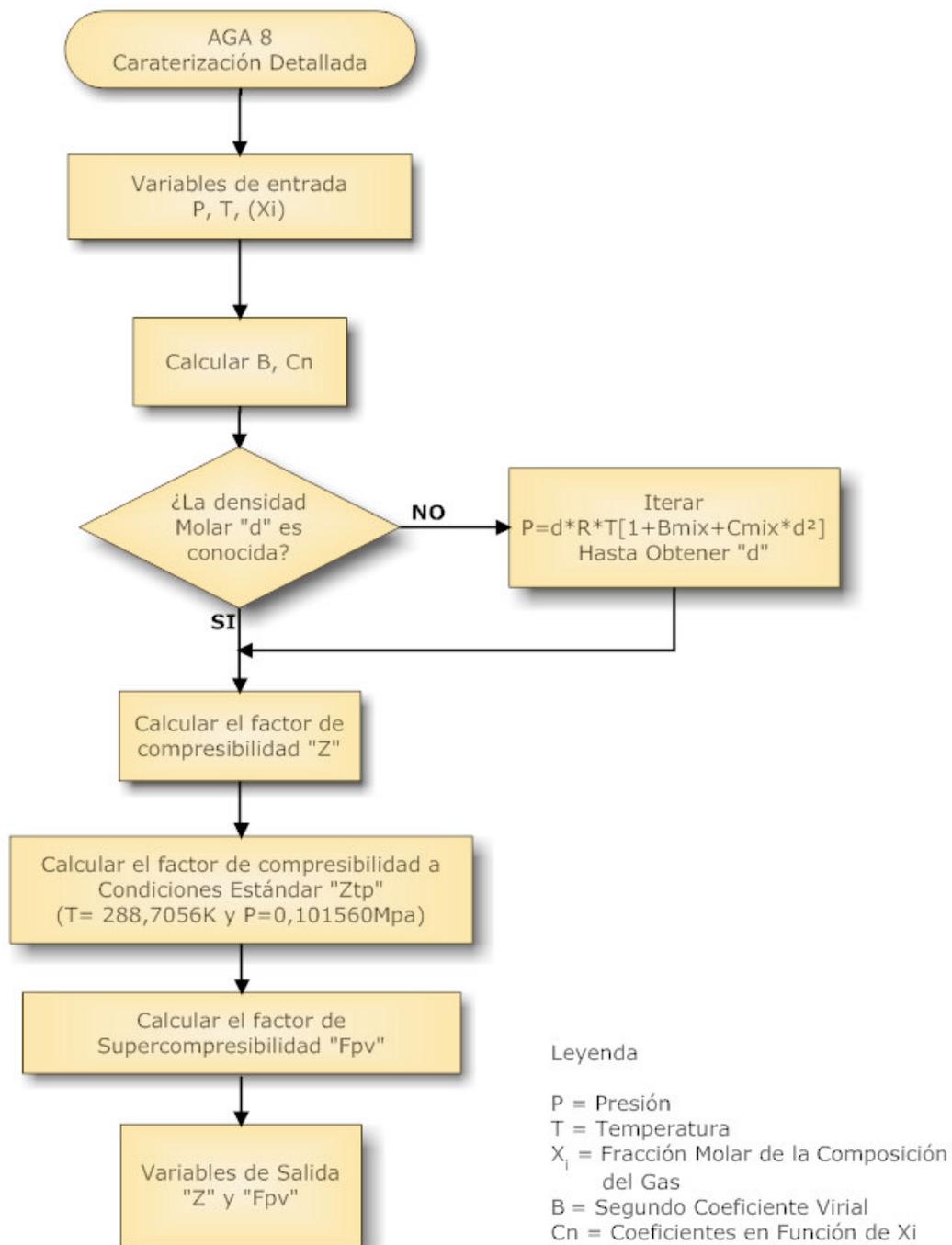


Figura 6. Diagrama de Flujo. Método de Caracterización Detallada. AGA8.

- AGA8. Método de Caracterización Detallada.

La figura 6 muestra el diagrama de flujo para el cálculo de los factores de compresibilidad (Z) y de supercompresibilidad (Ztp) usando el método de caracterización detallada definido en la norma AGA8. La primera fase consiste en tomar las variables de entrada necesarias para realizar los cálculos, que son temperatura (T), presión (P) y fracción molar del componente i en la mezcla de gas (Xi), para posteriormente realizar el cálculo del segundo coeficiente Virial (B) y del coeficiente Cn, el cual es función de la composición del gas. Para poder hallar el valor de la densidad molar (d) se debe iterar la ecuación de estado (ecuación 1) para la presión.

$$P = dRT \left[1 + Bd - D \sum_{n=13}^{58} C_n^* T^{-u_n} + \sum_{n=13}^{58} C_n^* T^{-u_n} (b_n - c_n k_n D^{k_n}) D^{b_n} \exp(-c_n D^{k_n}) \right] \quad (4)$$

Cuando son conocidas la presión, temperatura y composición del gas, la única cantidad desconocida en la ecuación es la densidad molar, la cual es determinada usando el método matemático iterativo conocido como bisección ya que este método es simple y presenta una convergencia lo suficientemente rápida para los cálculos realizados. El criterio de convergencia en el proceso iterativo para el cálculo de d, podría ser la concordancia de la presión calculada usando la ecuación 1, con la presión especificada, dentro de una desviación relativa absoluta de 1×10^{-6} o la concordancia de dos valores sucesivos de d dentro de una desviación relativa absoluta 1×10^{-6} . Una vez obtenida la densidad molar se procede a realizar el cálculo del factor de compresibilidad (Z) y el factor de supercompresibilidad Ztp.

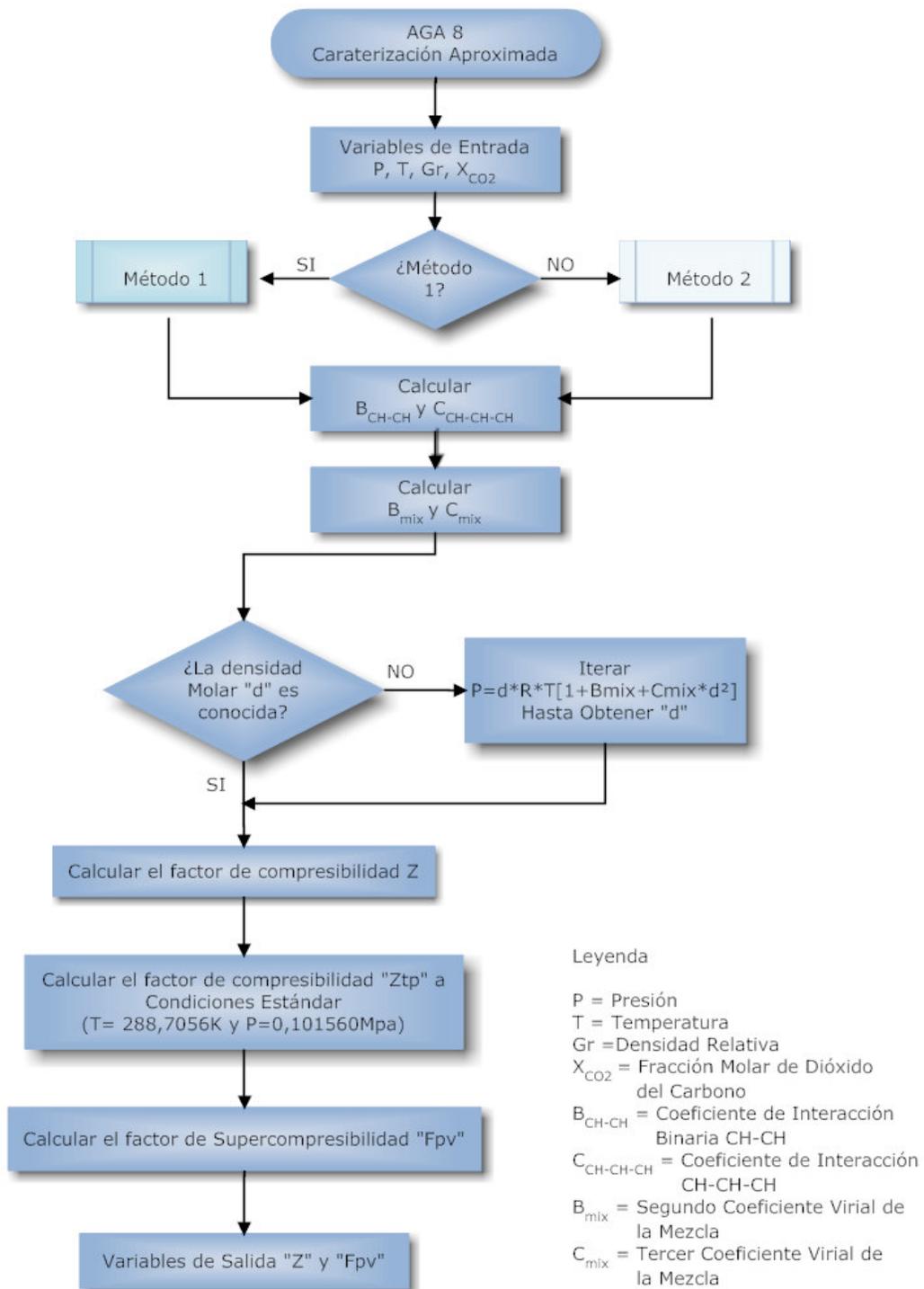


Figura 7. Diagrama de Flujo. Método de Caracterización Aproximada. AGA8.

- AGA8. Método de Caracterización Aproximada.

La figura 7 muestra el diagrama de flujo para el cálculo del factor de compresibilidad Z y el factor de supercompresibilidad Z_{tp} usando el método de caracterización aproximado definido en la norma AGA8. Al igual que en la caracterización detallada, la primera fase consiste en tomar las variables de entrada necesarias para realizar los cálculos las cuales son temperatura (T), presión (P), densidad relativa (Gr) y la fracción molar de dióxido de Carbono (X_{CO_2}). Posteriormente se procede a seleccionar entre los dos métodos de cálculo (método 1 ó método 2) para así determinar el valor calórico grueso molar del hidrocarburo equivalente (H_{CH}). Una vez realizado este cálculo se procede a calcular el coeficiente de interacción binaria CH-CH (B_{CH-CH}), el coeficiente de interacción CH-CH-CH ($C_{CH-CH-CH}$), el segundo coeficiente virial de la mezcla (B_{mix}) y el tercer coeficiente virial de la mezcla (C_{mix}). La ecuación de estado para la presión por el método de caracterización aproximada es:

$$P = dRT + B_{mix} RTd^2 + C_{mix} RTd^3 \quad (5)$$

Para poder hallar el valor de la densidad molar (d) se debe iterar la ecuación de estado para la presión. Cuando son conocidas la presión, la temperatura del gas, el segundo coeficiente virial de la mezcla (B_{mix}) y el tercer coeficiente virial de la mezcla (C_{mix}), la única cantidad desconocida en la ecuación 2 es la densidad molar, la cual es determinada usando el método iterativo matemático conocido como bisección. La densidad molar d es variada hasta que la presión calculada usando la ecuación 2 concuerda con la presión especificada dentro de un criterio de convergencia de 1×10^{-6} MPa. Una vez obtenida la densidad molar se procede a realizar el cálculo del factor de compresibilidad (Z) y el factor de supercompresibilidad Z_{tp} .

El valor calórico grueso molar (H_{CH}) es necesario para los cálculos de B_{MIX} y C_{MIX} . Para realizar el cálculo de H_{CH} se dispone de dos métodos: el primero

(denominado método 1) utiliza como parámetro de entrada el valor calórico grueso volumétrico (HV), mientras que el segundo (método 2) utiliza como parámetro de entrada la fracción molar de N₂.

Método 1

En esta subrutina (ver figura 8) las variables de entrada son la temperatura, la presión, el valor calórico volumétrico grueso (HV), la densidad relativa (Gr) y la fracción molar del dióxido de carbono (X_{CO_2}). Se inicializa el valor del factor de compresibilidad a las condiciones de referencia ($Z^0 = 1$). Posteriormente se realizan los cálculos de:

- HN^0 = Valor Calórico Molar Grueso del Gas Ideal
- M_f = Masa Molar de la Mezcla
- X_{CH} = Fracción Molar del Hidrocarburo Equivalente
- X_{N_2} = Fracción Molar del Nitrógeno
- H_{CH} = Valor Calórico Grueso Molar del Hidrocarburo Equivalente
- B_{CH-CH} = Coeficiente de Interacción Binaria CH-CH
- B_{mix} = Segundo Coeficiente Virial de la Mezcla
- Z^0_{new} = Factor de Compresibilidad actualizado

Estos cálculos realizados anteriormente son repetidos de forma iterativa, reemplazando Z^0 con Z^0_{new} hasta que el valor absoluto de $((Z^0/Z^0_{new}) - 1)$ sea menor que el criterio de convergencia (5×10^{-11} en precisión doble o 5×10^{-7} en precisión simple). Una vez que se alcance el criterio de convergencia queda determinado el valor de H_{CH} .

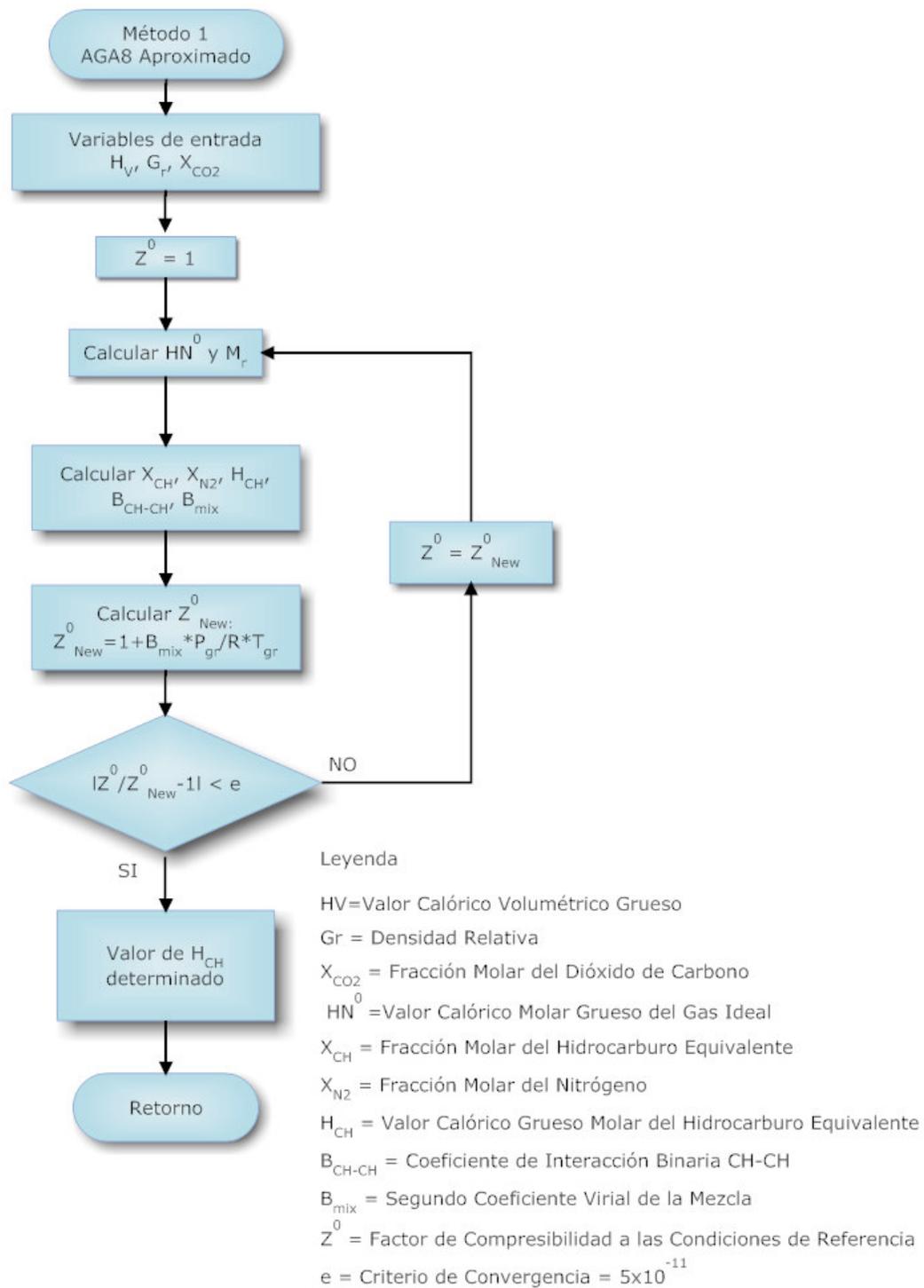


Figura 8. Diagrama de Flujo. AGA8. Método de Caracterización Aproximada. Método 1.

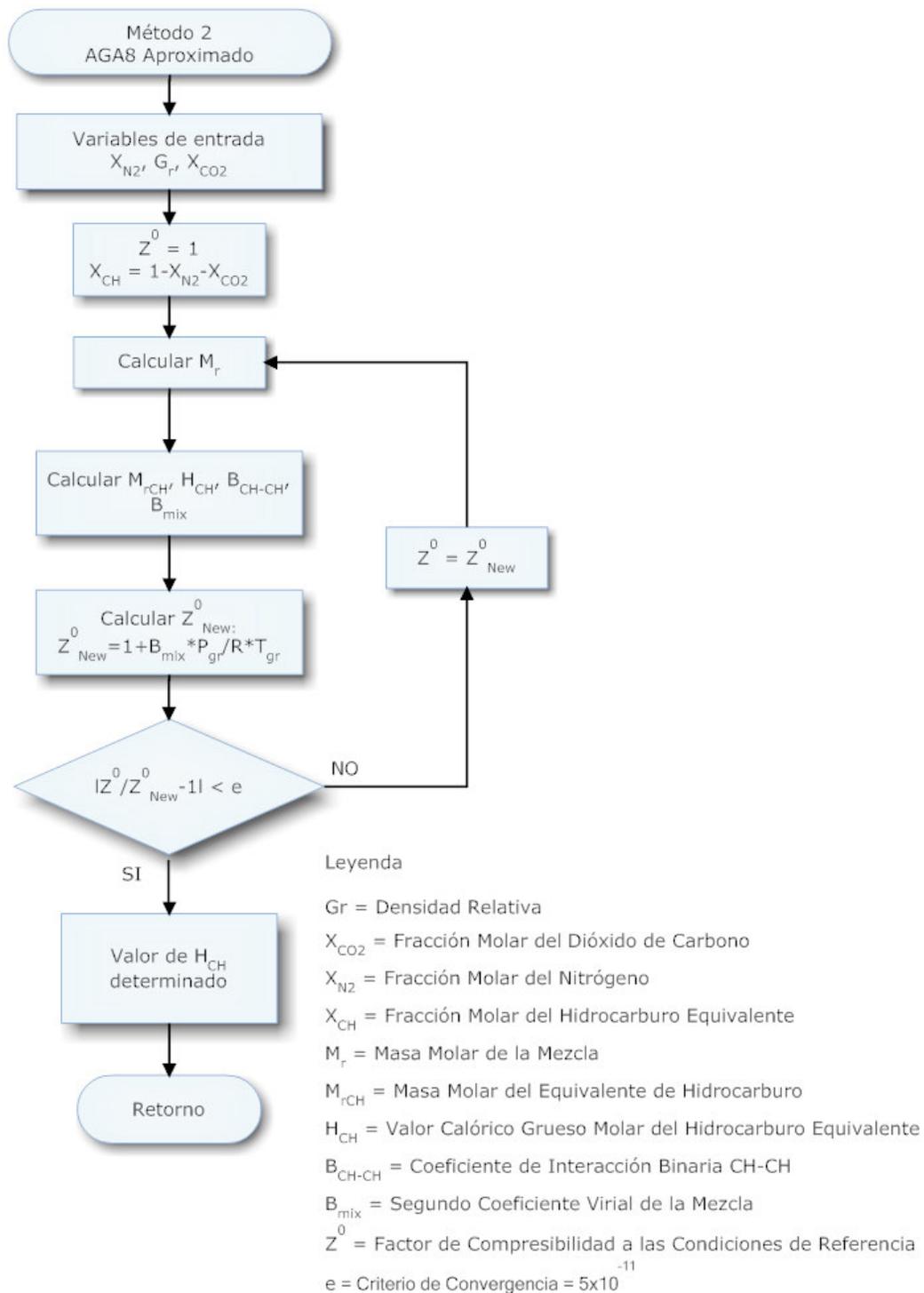


Figura 9. Diagrama de Flujo. AGA8. Método de Caracterización Aproximada. Método 2.

Método 2

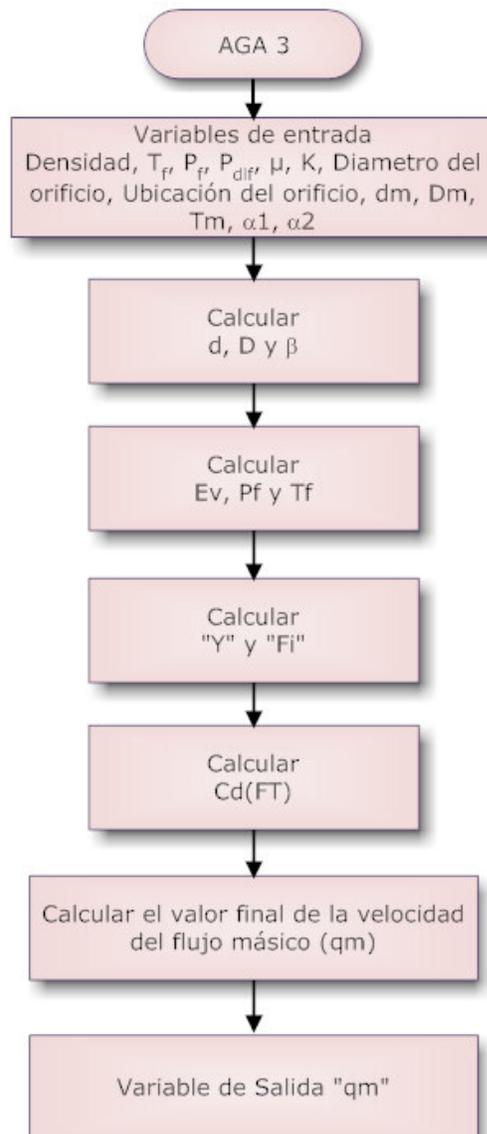
En esta subrutina las variables de entrada son la temperatura, la presión, la fracción molar del nitrógeno (X_{N_2}), la densidad relativa (Gr) y la fracción molar del dióxido de carbono (X_{CO_2}). Se inicializa el valor del factor de compresibilidad a las condiciones de referencia ($Z^0 = 1$) y se calcula la fracción molar del hidrocarburo equivalente (X_{CH}). Posteriormente se realizan los cálculos de:

- M_f = Masa Molar de la Mezcla
- M_{fCH} = Masa Molar del Equivalente de Hidrocarburo
- X_{CH} = Fracción Molar del Hidrocarburo Equivalente
- X_{N_2} = Fracción Molar del Nitrógeno
- H_{CH} = Valor Calórico Grueso Molar del Hidrocarburo Equivalente
- B_{CH-CH} = Coeficiente de Interacción Binaria CH-CH
- B_{mix} = Segundo Coeficiente Virial de la Mezcla
- Z_{new}^0 = Factor de Compresibilidad actualizado

Estos cálculos son repetidos de forma iterativa, reemplazando Z^0 con Z_{new}^0 hasta que el valor absoluto de $((Z^0/Z_{new}^0) - 1)$ sea menor que el criterio de convergencia (5×10^{-11} en precisión doble o 5×10^{-7} en precisión simple). Una vez que se alcance el criterio de convergencia el valor de H_{CH} queda determinado.

2.2. Desarrollo de los Programas contemplados en el proyecto.

A continuación se describen los procedimientos necesarios para la implementación de los programas desarrollados. Esta etapa es subdividida en 4 fases, que representan cada una de las aplicaciones realizadas (programa para PC, programa para ARM, programa para PIC, programa Modbus RTU).



Leyenda

- d = Diámetro del orificio de la placa calculado a la temperatura de flujo Tf
- D = Diámetro interno del tubo de medición calculado a la temperatura de flujo Tf
- β = Fracción del diámetro del orificio al diámetro del tubo de medición (d/D) calculada a la temperatura del flujo Tf.
- Ev = Factor de velocidad de acercamiento
- Pf = Presión estática del fluido a la presión de muestreo
- Tf = Temperatura del fluido a las condiciones de flujo
- Y = Factor de expansión
- Fi = Factor de iteración del flujo
- Cd(TF) = Coeficiente de descarga a un número de Reynolds específico para un medidor de orificio con medición de presión en la abrazadera
- qm = Velocidad de Flujo Másico

Figura 10. Diagrama de Flujo. AGA3.

- AGA 3. Cálculo de Flujo de gas.

Los lineamientos generales de los procedimientos de solución para medidores de orificio con muestreo en la abrazadera según los lineamientos de la norma AGA 3 son los siguientes:

A la temperatura del fluido (T_f) se calculan los términos que dependen sólo de la geometría del orificio como lo son el diámetro del orificio de la placa (d), el diámetro interno del tubo de medición (D), la fracción del diámetro del orificio al diámetro del tubo de medición (β), el factor de velocidad de acercamiento (E_v) y los términos de correlación del coeficiente del orificio. Posteriormente se calcula la presión del fluido (P_f). Se calculan las propiedades requeridas del fluido a la temperatura del fluido (T_f). Luego se procede a calcular el factor de expansión del fluido (Y), el factor de iteración del flujo (F_I) y sus partes componentes F_{Ic} y F_{Ip} , usados en el esquema de convergencia del coeficiente de descarga a un número de Reynolds específico para un medidor de orificio con medición de presión en la abrazadera ($C_d(FT)$). Se determina el valor de convergencia de $C_d(FT)$ usando el procedimiento de cálculo del coeficiente de Descarga de la Placa Orificio con Muestreo en la Abrazadera. Se calcula el valor final de la velocidad del flujo másico (q_m).

2.2.1. Fase 1: Desarrollo de Programa para PC.

Como un primer ensayo, se desarrolló un programa para PC bajo ambiente Windows, el cual se utilizó como patrón para las diversas pruebas a ser realizadas para verificar la eficiencia y los resultados de los programas a implementar en el microprocesador y en el microcontrolador. Para la realización de este primer programa se utilizó como ambiente de programación la herramienta Visual Studio .Net 2003, debido a que el procesador ARM trabaja bajo ambiente Windows CE y en Visual Studio .Net se pueden crear aplicaciones para este sistema operativo. A

diferencia de los programas a implementar en el ARM y en el microcontrolador PIC, el programa desarrollado en PC no maneja comunicación con otros equipos, fue desarrollado únicamente con el fin de verificar que los resultados de las propiedades que indican las normas AGA sean correctos. Sin embargo, posteriormente un PC puede comunicarse con un cromatógrafo en línea, el cual proporciona información detallada de la composición de gas contenida en la tubería; en la actualidad, en Venezuela no se dispone de estos equipos.

Una vez realizadas todas las depuraciones pertinentes en los cálculos establecidos en las normas, se procedió al desarrollo de la interfaz gráfica de los programas realizados. Esta interfaz cuenta con una serie de bloques de entrada de datos, en la que el usuario introduce todos los valores de las propiedades y factores que requiere cada norma para efectuar los cálculos. En el supuesto caso de que el usuario introduzca los datos de manera incorrecta, el programa genera un mensaje de error indicando cuál de los valores de entrada es erróneo. Luego de haber introducido todos los datos de entrada, el usuario debe hacer “click” en el botón correspondiente a la norma que desea aplicar; es de importancia resaltar que la norma AGA3, para poder efectuar los cálculos, utiliza como valores de entrada los factores de compresibilidad calculados por la norma AGA8, de manera que para ser aplicada debe haberse efectuado previamente el cálculo de AGA8, bien sea mediante el método de caracterización detallada o bien aplicando el método de caracterización aproximada. Esto fue considerado a la hora de diseñar el programa, por lo que el botón cuya función es ejecutar la norma AGA3 se encuentra deshabilitado mientras no se haya realizado algún cálculo para AGA8.

Además de los bloques de entrada de datos, el programa genera bloques para la presentación de resultados. Los resultados se muestran indicando la variable calculada con sus respectivas unidades, si se trata de una variable dimensional, así como también se indica la norma que contempla su cálculo. Cada vez que se realiza un cálculo, bien sea de AGA3 o de AGA8, los resultados son registrados en un

archivo de texto, indicando la hora y la fecha de cada cálculo. Adicionalmente, esta interfaz cuenta con un botón de salida, cuya finalidad es el cierre de la aplicación, y un botón para nuevo cálculo, que se usa para borrar de pantalla los cálculos realizados previamente y así regresar a la configuración inicial de la aplicación. En las figuras 11, 12, 13, 14, 15 y 16 se muestran diferentes vistas de este programa, mostrando los pasos necesarios para cada cálculo.

Componente	Fracción Molar
Metano	0.965222
Nitrogeno	0.002595
CO2	0.005956
Etano	0.018186
Propano	0.004596
H2O	0.00
H2S	0.00
Hidrogeno	0.00
CO	0.00
Oxigeno	0.00
i-Butano	0.000977
n-Butano	0.001007
i-Pentano	0.000473
n-Pentano	0.000324
n-Hexano	0.000664
n-Heptano	0.00
n-Octano	0.00
n-Nonano	0.00
n-Decano	0.00
Helio	0.00
Argon	0.00

Figura 11. Entrada de Datos. AGA8, Método de Caracterización Detallada.

En la figura anterior se muestran los bloques de entrada de datos para el cálculo de factores de compresibilidad (AGA8) aplicando el Método de Caracterización Detallada, donde el usuario debe introducir los valores de temperatura y presión, en cualquiera de las unidades disponibles (K, °F, °C para temperatura, y MPa, psi y bar para presión) y las fracciones molares de cada uno de

los componentes del gas. Se observa también que el botón para cálculo de AGA3 está deshabilitado.

En la figura 12 se muestran los resultados del cálculo de AGA8 utilizando el Método de Caracterización Detallada. Al haberse realizado este cálculo, se muestran los bloques de entrada de datos para el cálculo de flujo de gas, es decir, los cálculos correspondientes a AGA3, así como se observa que el botón para su cálculo está habilitado.

The screenshot shows a software window titled "FACTOR DE COMPRESIBILIDAD Y MEDICIÓN DE FLUJO DE GAS NATURAL". It has two tabs: "Caracterización Detallada" (selected) and "Caracterización Aproximada".

Inputs for AGA8:

- Temperatura: Kelvin, Celsius, Fahrenheit. Value: 60. Result: 288.70555556 K.
- Presión: MPa, PSI, bar. Value: 14.73. Result: 0.101559771 MPa.
- Gas composition (mole fractions):

Metano	<input checked="" type="checkbox"/>	0,965222	Hidrogeno	<input type="checkbox"/>	0,00	n-Hexano	<input checked="" type="checkbox"/>	0,000664
Nitrogeno	<input checked="" type="checkbox"/>	0,002595	CO	<input type="checkbox"/>	0,00	n-Heptano	<input type="checkbox"/>	0,00
CO2	<input checked="" type="checkbox"/>	0,005956	Oxigeno	<input type="checkbox"/>	0,00	n-Octano	<input type="checkbox"/>	0,00
Etano	<input checked="" type="checkbox"/>	0,018186	i-Butano	<input checked="" type="checkbox"/>	0,000977	n-Nonano	<input type="checkbox"/>	0,00
Propano	<input checked="" type="checkbox"/>	0,004596	n-Butano	<input checked="" type="checkbox"/>	0,001007	n-Decano	<input type="checkbox"/>	0,00
H2O	<input type="checkbox"/>	0,00	i-Pentano	<input checked="" type="checkbox"/>	0,000473	Helio	<input type="checkbox"/>	0,00
H2S	<input type="checkbox"/>	0,00	n-Pentano	<input checked="" type="checkbox"/>	0,000324	Argon	<input type="checkbox"/>	0,00

Inputs for AGA3:

- Sistema de Unidades: U.S., IP, S.I., Métrico.
- Densidad: A condiciones de Flujo (Ftp), Densidad Relativa de Gas Ideal (Gi). Value: 0,65 (kg/m³).
- Tf: 30 (°C)
- Pf: 13,74 (bar)
- Pdif: 49,8 (millibar)
- μ: 0,010268 (cP)
- K: 1,3
- Diámetros del Orificio y del Tubo: Medido, Referencia. dm: 50,8 (mm).
- Ubicación del Orificio: Abrazadera, Esquina, Radial.
- α1: 0,00001665 (mm/mm-°C)
- Dm: 102,24 (mm)
- α2: 0,00001116 (mm/mm-°C)
- Trm: 15 (°C)

Buttons: AGA8 (Z), AGA3 (q), Salir, Nuevo Cálculo.

Resultados de AGA8:

Z	0,997857366	V/V	d	0,0424	mol/dm ³
Z(T,P)	0,997857366	V/V	d	0,7123	Kg/m ³
Fpv	1,000000000	V/V	MW	16,7994	Kg/mol
			Px	0,101560	MPa

Figura 12. Resultados AGA8, Método de Caracterización Detallada. Entrada de datos para AGA3.

En la figura 13 mostrada a continuación, se presentan los resultados generados al efectuar el cálculo de AGA3.

FACTOR DE COMPRESIBILIDAD Y MEDICIÓN DE FLUJO DE GAS NATURAL

Caracterización Detallada | Caracterización Aproximada

Temperatura <input type="radio"/> Kelvin <input type="radio"/> Celsius <input checked="" type="radio"/> Fahrenheit <input type="text" value="60"/> 288,7055556 K	Presión <input type="radio"/> MPa <input checked="" type="radio"/> PSI <input type="radio"/> bar <input type="text" value="14.73"/> 0,101559771 MPa	Metano <input checked="" type="checkbox"/> 0,965222 Nitrogeno <input checked="" type="checkbox"/> 0,002595 CO2 <input checked="" type="checkbox"/> 0,005956 Etano <input checked="" type="checkbox"/> 0,018186 Propano <input checked="" type="checkbox"/> 0,004596 H2O <input type="checkbox"/> 0,00 H2S <input type="checkbox"/> 0,00	Hidrogeno <input type="checkbox"/> 0,00 CO <input type="checkbox"/> 0,00 Oxigeno <input type="checkbox"/> 0,00 i-Butano <input checked="" type="checkbox"/> 0,000977 n-Butano <input checked="" type="checkbox"/> 0,001007 i-Pentano <input checked="" type="checkbox"/> 0,000473 n-Pentano <input checked="" type="checkbox"/> 0,000324	n-Hexano <input checked="" type="checkbox"/> 0,000664 n-Heptano <input type="checkbox"/> 0,00 n-Octano <input type="checkbox"/> 0,00 n-Nonano <input type="checkbox"/> 0,00 n-Decano <input type="checkbox"/> 0,00 Helio <input type="checkbox"/> 0,00 Argon <input type="checkbox"/> 0,00	AGA8 (Z) AGA3 (q) Salir
--	---	---	--	--	-------------------------------

Sistema de Unidades <input type="radio"/> U.S. <input type="radio"/> IP <input type="radio"/> S.I. <input checked="" type="radio"/> Métrico	TF <input type="text" value="30"/> (°C) PF <input type="text" value="13,74"/> (bar) Pdif <input type="text" value="49,8"/> (millibar) μ <input type="text" value="0,010268"/> (cP) K <input type="text" value="1,3"/>	Diámetros del Orificio y del Tubo <input checked="" type="radio"/> Medido <input type="radio"/> Referencia Ubicación del Orificio <input checked="" type="radio"/> Abrazadera <input type="radio"/> Esquina <input type="radio"/> Radial	dm <input type="text" value="50,8"/> (mm) $\alpha 1$ <input type="text" value="0,00001665"/> (mm/mm-°C) Dm <input type="text" value="102,24"/> (mm) $\alpha 2$ <input type="text" value="0,00001116"/> (mm/mm-°C) Tm <input type="text" value="15"/> (°C)
---	---	---	---

Densidad <input type="radio"/> A condiciones de Flujo (Ptp) <input checked="" type="radio"/> Densidad Relativa de Gas Ideal (Gi) <input type="text" value="0,65"/> (kg/m ³)	Resultados de AGA8 Z <input type="text" value="0,997857366"/> V/V Z(T,P) <input type="text" value="0,997857366"/> V/V Fpv <input type="text" value="1,000000000"/> V/V d <input type="text" value="0,0424"/> mol/dm ³ d <input type="text" value="0,7123"/> Kg/m ³ MW <input type="text" value="16,7994"/> Kg/mol Px <input type="text" value="0,101560"/> MPa	Resultados de AGA3 qm <input type="text" value="1.453,19523027"/> kg/hr qv <input type="text" value="141,30242916"/> m ³ /hr qb <input type="text" value="1.820,58977362"/> m ³ /hr
---	--	---

Nuevo Cálculo

Figura 13. Resultados AGA3.

En las figuras 14, 15 y 16 se muestra una secuencia similar a la anterior, pero esta vez aplicando el Método de Caracterización Aproximada. En la figura 14 se muestran los bloques de entrada de datos para el cálculo de AGA8, es decir, los valores de temperatura, presión, de acuerdo al método usado (método 1 ó 2) el valor calórico aproximado o la fracción molar de N₂, respectivamente, la densidad relativa del gas, la fracción molar de CO₂, y los valores de temperatura y presión de referencia.

FACTOR DE COMPRESIBILIDAD Y MEDICIÓN DE FLUJO DE GAS NATURAL

Caracterización Detallada Caracterización Aproximada

Valores de Entrada

Temperatura
 Kelvin
 C
 F
 K

Presión
 MPa
 PSI
 MPa

Metodo 1 Metodo 2

HV KJ/dm³
 Gr Densidad Relativa
 XCO2 Mole %

Valores de Referencia

Th K Ph MPa
 Td K Pd MPa
 Tgr K Pgr MPa

AGAs (Z)
 AGAs (q)
 Salir

Nuevo Cálculo

Figura 14. Entrada de Datos. AGA8, Método de Caracterización Aproximada.

FACTOR DE COMPRESIBILIDAD Y MEDICIÓN DE FLUJO DE GAS NATURAL

Caracterización Detallada Caracterización Aproximada

Valores de Entrada

Temperatura
 Kelvin
 C
 F
 K
 K

Presión
 MPa
 PSI
 MPa
 MPa

Metodo 1 Metodo 2

HV KJ/dm³
 Gr Densidad Relativa
 XCO2 Mole %

Valores de Referencia

Th K Ph MPa
 Td K Pd MPa
 Tgr K Pgr MPa

AGAs (Z)
 AGAs (q)
 Salir

Sistema de Unidades
 U.S. IP S.I. Métrico

Densidad
 A condiciones de Flujo (Ptp)
 Densidad Relativa de Gas Ideal (Gi)

Tf
 Pf
 Pdif
 μ
 K

Diámetros del Orificio y del Tubo
 Medido Referencia

Ubicación del Orificio
 Abrazadera
 Esquina
 Radial

Resultados de AGA8

Z	0,997853849	V/V	HCH	917,2397
Ztp	0,997853849	V/V	d	0,0424 mol/dm ³
Fpv	1,000000000	V/V	d	0,7123 Kg/m ³
Px	0,101560	MPa	MW	16,8004 Kg/mol

Nuevo Cálculo

Figura 15. Resultados AGA8, Método de Caracterización Aproximada. Entrada de datos para AGA3.

FACTOR DE COMPRESIBILIDAD Y MEDICIÓN DE FLUJO DE GAS NATURAL

Caracterización Detallada | Caracterización Aproximada

Valores de Entrada

Temperatura: Kelvin, C, F, K, MPa, PSI

Presión: MPa, PSI

Metodo 1 Metodo 2

HV: 38,6022 KJ/dm³
Gr: 0,581078 Densidad Relativa
XCO2: 0,005956 Mole %

Valores de Referencia

Th: 288,71 K Ph: 0,10156 MPa
Td: 288,71 K Pd: 0,10156 MPa
Tgr: 288,71 K Pgr: 0,10156 MPa

Sistema de Unidades: U.S., IP, S.I., Métrico

Densidad: A condiciones de Flujo (Ptp), Densidad Relativa de Gas Ideal (Gi)

Tf: 30 (°C), Pf: 13,74 (bar), Pdif: 49,8 (millibar), μ: 0,010268 (cP), K: 1,3

Diámetros del Orificio y del Tubo: Medido, Referencia

Ubicación del Orificio: Abrazadera, Esquina, Radial

dm: 50,8 (mm), α1: 0,00001665 (mm/mm-°C), Tr: 102,24 (mm), α2: 0,00001116 (mm/mm-°C), Dr: 15 (°C)

Resultados de AGA8

Z	0,997853849	V/V	HCH	917,2397
Ztp	0,997853849	V/V	d	0,0424
Fpv	1,000000000	V/V	d	0,7123
Px	0,101560	MPa	MW	16,8004
				Kg/mol

Resultados de AGA3

qm	1.453,19778716	kg/hr
qv	141,30217976	m ³ /hr
qb	1.820,58656017	m ³ /hr

Nuevo Cálculo

Figura 16. Resultados AGA3.

En la figura 17 se muestra un ejemplo de mensaje de error, producido por el valor incorrecto de Densidad para el cálculo de AGA3.

FACTOR DE COMPRESIBILIDAD Y MEDICIÓN DE FLUJO DE GAS NATURAL

Caracterización Detallada | Caracterización Aproximada

Temperatura: Kelvin, Celsius, Fahrenheit, K, MPa, PSI, bar

Metano 0,965222, Nitrogeno 0,002595, CO2 0,005956, Etano 0,018186, Propano 0,004596, H2O 0,00, H2S 0,00, Hidrogeno 0,00, CO 0,00, Oxigeno 0,00, i-Butano 0,000977, n-Butano 0,001007, i-Pentano 0,000473, n-Pentano 0,000324, n-Hexano 0,000664, n-Heptano 0,00, n-Octano 0,00, n-Nonano 0,00, n-Decano 0,00, Helio 0,00, Argon 0,00

Sistema de Unidades: U.S., IP, S.I., Métrico

Densidad: A condiciones de Flujo (Ptp), Densidad Relativa de Gas Ideal (Gi)

Tf: 30 (°C), Pf: 13,74 (bar), Pdif: 49,8 (millibar), μ: 0,0102, K: 1,3

Diámetros del Orificio y del Tubo: Medido, Referencia

dm: 50,8 (mm), α1: 0,00001665 (mm/mm-°C), Dm: 102,24 (mm), α2: 0,00001116 (mm/mm-°C), Tm: 15 (°C)

Resultados de AGA8

Z	0,997857366	V/V	d	0,0424	mol/dm ³
Z(T,P)	0,997857366	V/V	d	0,7123	Kg/m ³
Fpv	1,000000000	V/V	MW	16,7994	Kg/mol
			Px	0,101560	MPa

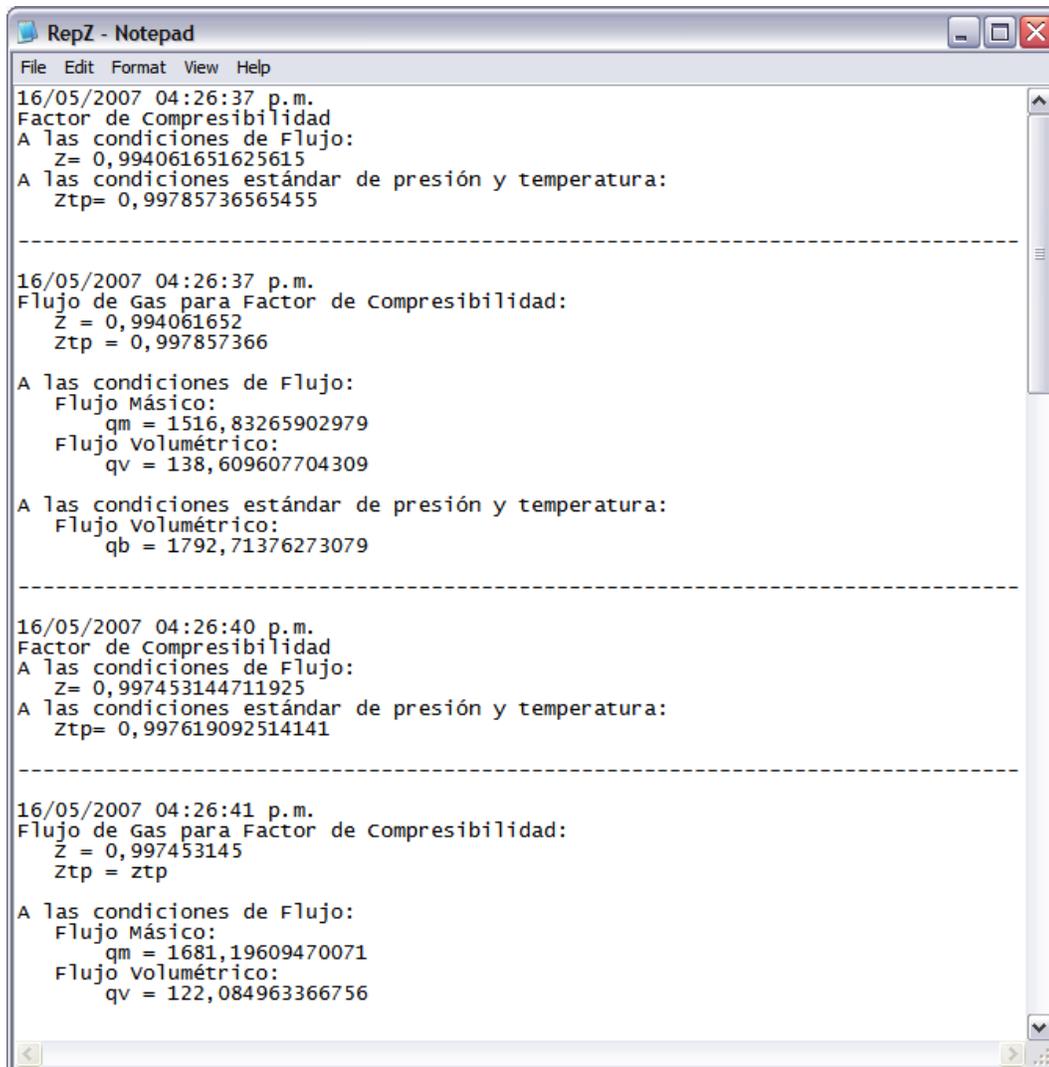
Densidad: 0,0102 (kg/m³)

Introducir Valor Correcto de Densidad

Nuevo Cálculo

Figura 17. Ejemplo de mensaje de error.

En la figura 18 se muestra el archivo de texto generado por el programa. Este archivo se crea en el disco duro C, y el nombre del archivo es RepZ. Se observa en la figura que se muestran las variables calculadas, la fecha y la hora del cálculo.



```
RepZ - Notepad
File Edit Format View Help
16/05/2007 04:26:37 p.m.
Factor de Compresibilidad
A las condiciones de Flujo:
  Z= 0,994061651625615
A las condiciones estándar de presión y temperatura:
  Ztp= 0,99785736565455
-----
16/05/2007 04:26:37 p.m.
Flujo de Gas para Factor de Compresibilidad:
  Z = 0,994061652
  Ztp = 0,997857366
A las condiciones de Flujo:
  Flujo Másico:
    qm = 1516,83265902979
  Flujo Volumétrico:
    qv = 138,609607704309
A las condiciones estándar de presión y temperatura:
  Flujo Volumétrico:
    qb = 1792,71376273079
-----
16/05/2007 04:26:40 p.m.
Factor de Compresibilidad
A las condiciones de Flujo:
  Z= 0,997453144711925
A las condiciones estándar de presión y temperatura:
  Ztp= 0,997619092514141
-----
16/05/2007 04:26:41 p.m.
Flujo de Gas para Factor de Compresibilidad:
  Z = 0,997453145
  Ztp = ztp
A las condiciones de Flujo:
  Flujo Másico:
    qm = 1681,19609470071
  Flujo Volumétrico:
    qv = 122,084963366756
```

Figura 18. Archivo de texto que registra resultados de cálculos.

2.2.2. Fase 2: Desarrollo de Programa para ARM.

Una vez realizado el programa para PC, y luego de haber comprobado los resultados con las tablas para verificación del programa disponibles en las normas AGA, se procedió a la implementación del software en el procesador ARM. Como el ARM utilizado (Wincon) puede ser programado en Visual Studio .Net, el código ya desarrollado se utilizó para la aplicación en el ARM. Sin embargo, la interfaz gráfica desarrollada en el programa para PC no pudo ser aprovechada para la aplicación del ARM. Esto se debe a que las librerías contenidas en Visual Studio .Net para una aplicación de Windows (*Windows Application*) no son compatibles con las librerías que brinda Visual Studio .Net para aplicaciones en Windows CE. Adicionalmente fue necesario instalar un framework en la PC, el cual permite la creación de proyectos en Visual Studio .Net, bajo el lenguaje Visual Basic, del tipo *OpenNETCF Application* y del tipo *SmartDevice Application*, ya que son éstos los tipos de aplicación que pueden ser procesados en un ambiente Windows CE.

Para este programa no fue necesaria la creación de una interfaz gráfica para el usuario, ya que en este caso los datos de entrada no serán introducidos directamente en la aplicación de Visual Studio .Net. Para las aplicaciones desarrolladas en el ARM deben manejarse los datos de entrada y salida mediante el protocolo Modbus TCP, desde un computador. Para hacer posible la comunicación entre ambos equipos (el ARM y la PC), debe desarrollarse una aplicación en ISaGRAF, en la cual se crea un proyecto que contiene las variables utilizadas en la aplicación, donde se definen las direcciones en las que se encuentra cada una de ellas. Esta aplicación de ISaGRAF se encarga de enviar la información de cada variable a la aplicación del ARM, utilizando un archivo del tipo “dll” denominado Quicker. Quicker es un paquete de programas de software integrados que combina OPC, Modbus TCP, y servicios de Modbus RTU. Quicker permite trazar automáticamente un mapa físico de variables de Entrada/Salida a una dirección específica de Modbus. Por otra parte, la PC maneja los datos de entrada utilizando un simulador de

dispositivo maestro Modbus denominado ModScan. De esta forma, el proyecto creado en ISaGRAF debe estar sincronizado con la aplicación de ModScan, y las variables deben tener asignadas las mismas direcciones. Para esta aplicación, la comunicación Modbus se maneja mediante comandos programados en la aplicación de Visual Studio .Net.

Para una mejor ilustración del funcionamiento de la comunicación Modbus entre ambos equipos, en la figura 19 se muestra un diagrama de bloques representativo de dicho procedimiento.

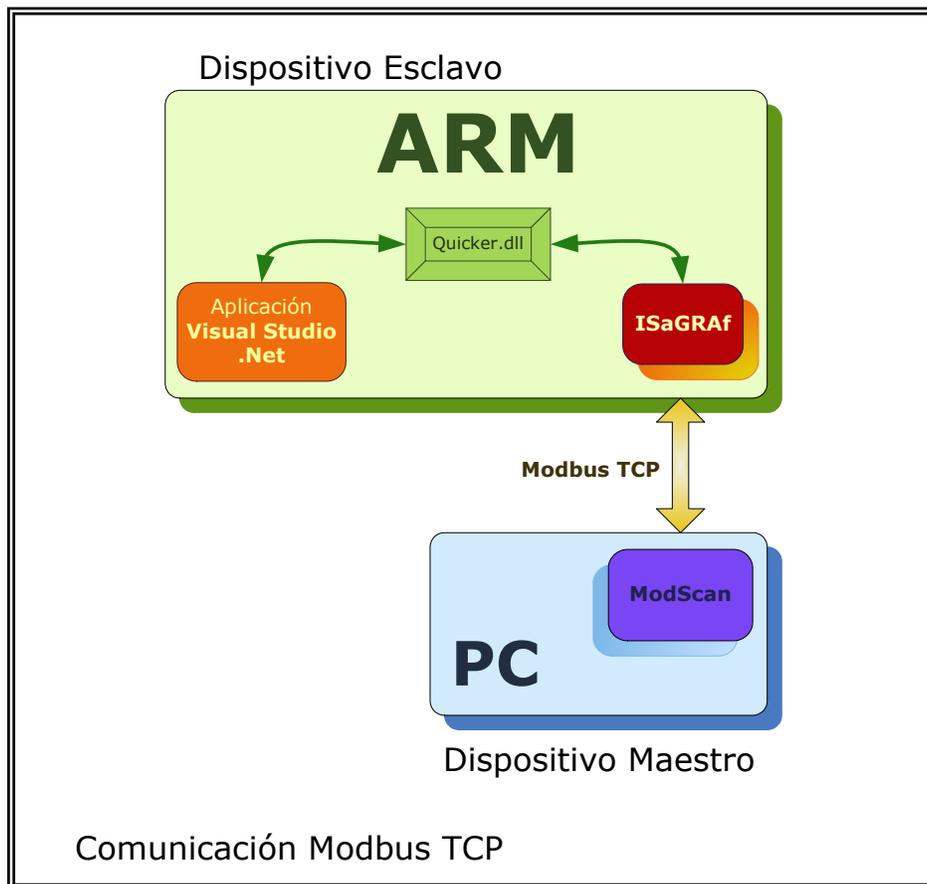


Figura 19. Diagrama de bloques. Comunicación Modbus TCP entre ARM y computador.

2.2.3. Fase 3: Desarrollo del Programa para Microcontrolador PIC.

Esta fase consiste en el desarrollo del software de las normas AGA3 y AGA8, así como el software para comunicación Modbus RTU, para una aplicación en un microcontrolador PIC. Para este fin se utilizó como herramienta de programación el compilador CCS PIC-C Compiler. El lenguaje de programación manejado por este compilador es el Lenguaje C. De esta forma, el código ya desarrollado en lenguaje Visual Basic de las normas AGA para las aplicaciones anteriormente descritas fue traducido en Lenguaje C. Para la comunicación de esta aplicación en el PIC fue necesario programar y desarrollar los códigos que definen el protocolo Modbus RTU.

Se escogió como microcontrolador el PIC 18F8720 de Microchip, debido a que éste presenta la mayor capacidad de memoria de programa tipo FLASH de 128Kbytes y de memoria RAM de los ofrecidos por este fabricante y una frecuencia de operación de hasta 40MHz. También presenta dos puertos para comunicación serial, dos temporizadores de 8 bits y tres temporizadores de 16 bits, necesarios para la comunicación Modbus. Para la comunicación de esta aplicación en el PIC fue necesario programar y desarrollar los códigos que definen el protocolo Modbus RTU por uno de sus puertos seriales, mientras que el puerto serial restante se programó para la conexión del microcontrolador a una computadora y mostrar los resultados de los cálculos por medio del hiperterminal. Otro de los motivos para la escogencia de este microcontrolador fue que la compañía poseía módulos de aprendizaje de este microcontrolador.

2.2.4. Fase 4: Desarrollo del Código para Modbus RTU.

Una vez desarrollados los programas que efectúan los cálculos establecidos en las normas AGA, se procedió a la implementación del protocolo de comunicación entre el microcontrolador PIC, definido como maestro, y el computador que trabaja

como esclavo. De esta forma, se desea que el PIC realice peticiones periódicas de los datos de entrada al dispositivo esclavo, esta vez simulado por ModSim (simulador de dispositivo esclavo), y éste posteriormente envíe respuesta de la solución de los cálculos efectuados. Previo al desarrollo de este programa, fue necesaria la realización de los diagramas de flujo de cada uno de los procedimientos a implementar. En las páginas siguientes se muestran dichos diagramas y sus respectivas explicaciones.

En la figura 20 se hace un esquema general de la comunicación Modbus RTU entre el microcontrolador PIC (dispositivo maestro) y el dispositivo esclavo (ModSim, en PC), así como también la conexión con el hiperterminal para la presentación de resultados almacenados en memoria.

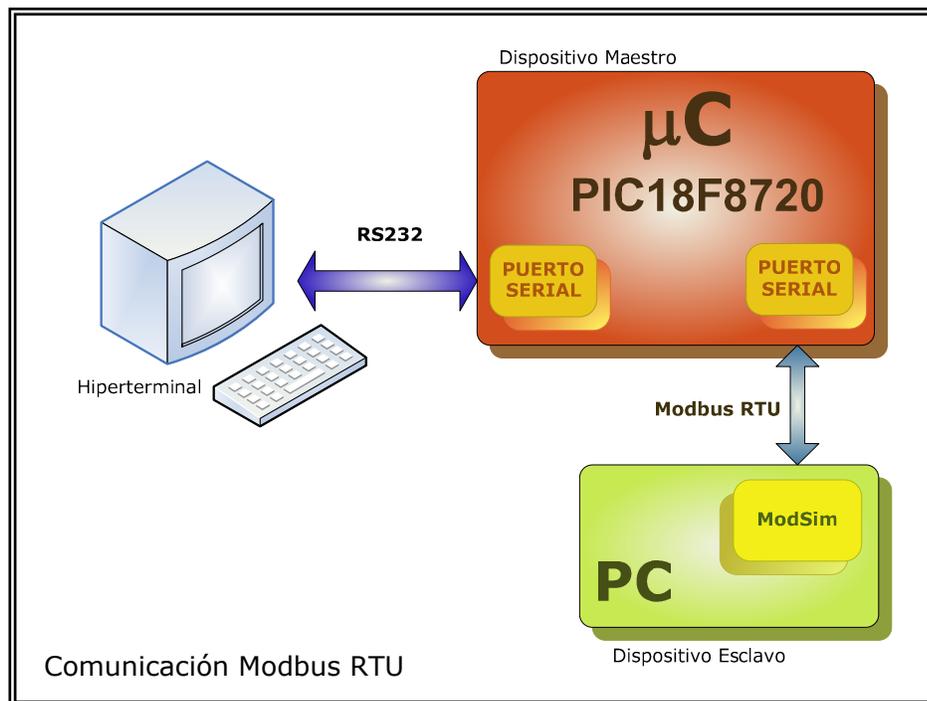


Figura 20. Diagrama de bloques. Comunicación Modbus RTU entre microcontrolador PIC y computador.

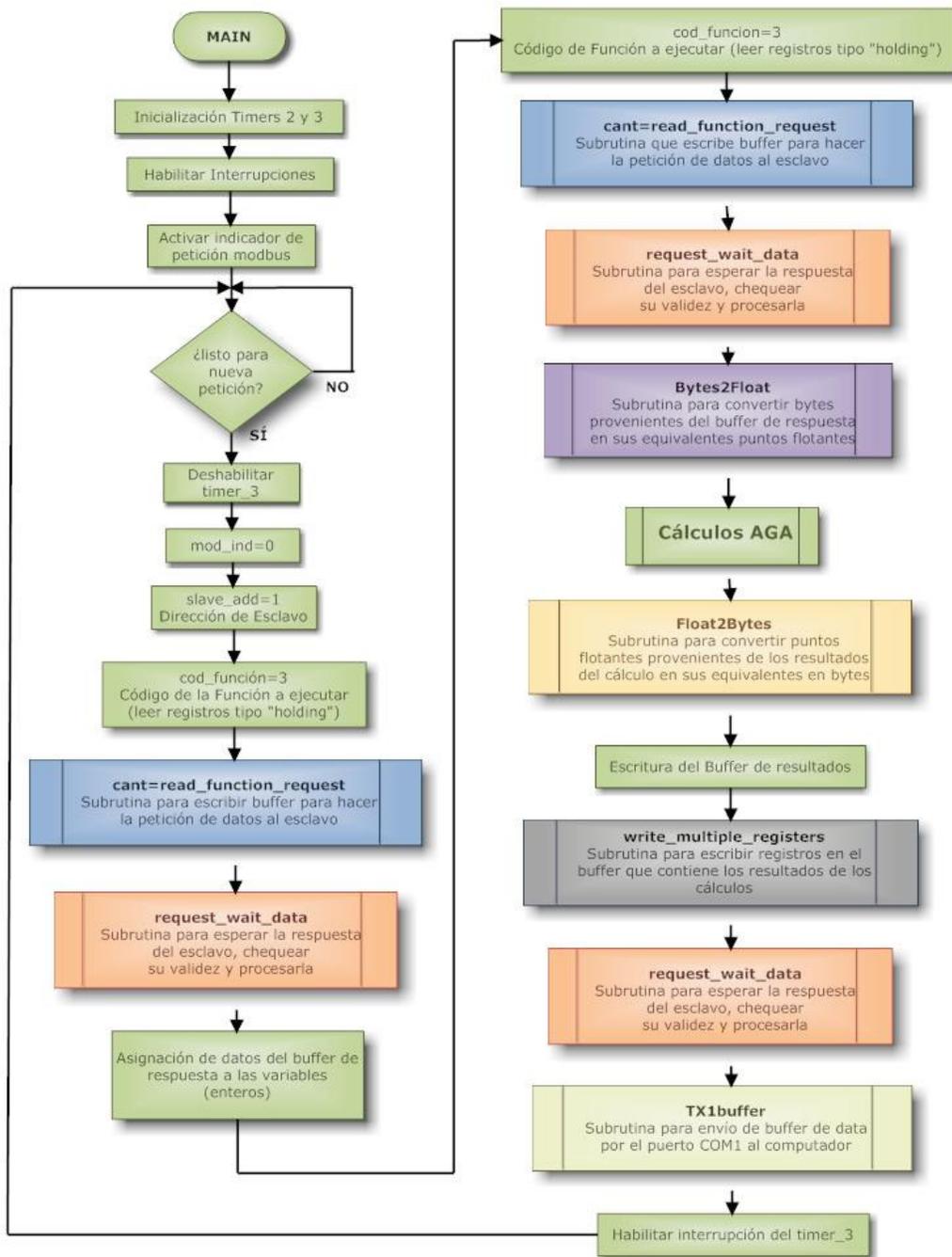


Figura 21. Diagrama de Flujo. Programa Principal (Main).

- Programa Principal (Main)

El diagrama de flujo de la figura 21 representa la secuencia considerada para el programa principal. En primer lugar, se hace la configuración de los timers 2 y 3, los cuales se encargan de llevar la cuenta del timeout (tiempo máximo de espera de respuesta) y del tiempo de scan (tiempo máximo que puede transcurrir entre pregunta y pregunta), respectivamente. El tiempo de espera de respuesta, o timeout, debe ser suficiente para asegurar que el PIC haya realizado los cálculos; de esta forma, para la implementación de la norma AGA8 mediante el método de caracterización detallada, cuyo cálculo toma un tiempo de aproximadamente 3 minutos y 45 segundos, se fijó como valor del timeout un tiempo de 4 minutos, asegurando así que los cálculos son realizados en su totalidad; para el caso del método de caracterización aproximada, cuyos cálculos son considerablemente más rápidos que para el caso del método de caracterización detallada, el valor del timeout se redujo a un tiempo de medio segundo. Para el tiempo de scan, éste puede considerarse de 0,5 segundos, ya que el PIC debe realizar peticiones al esclavo de forma periódica. Entonces, se hará una verificación constante de la expiración del tiempo de scan.

Si el PIC está listo para hacer una nueva petición, se asigna la dirección del dispositivo esclavo, que es en este caso el simulador ModSim ejecutado en PC, para luego hacer un llamado a la subrutina **read_function_request**, que se encarga de la escritura del buffer que contiene la información necesaria para realizar la petición. Luego de esta acción, se ejecuta la subrutina denominada **request_wait_data**, mediante la cual el maestro espera la respuesta del esclavo, y una vez recibida, verifica que sea válida, para luego ser procesada. Luego de efectuar estos pasos, el dispositivo maestro, es decir, el PIC, ha recibido los datos de entrada que ha solicitado al esclavo. Corresponde ahora la asignación de estos datos a las variables que serán empleadas a la hora de realizar los cálculos. Para los datos de entrada cuyo valor es un número decimal, debe hacerse la conversión pertinente de los valores recibidos en el buffer de recepción, que se encuentran en bytes, a sus equivalentes en

punto flotante. Esta conversión se realiza mediante la subrutina **Bytes2Float**, que se explica más adelante. Al haber recibido todas las variables de entrada mediante el protocolo Modbus RTU, el PIC procede a la aplicación de las normas AGA, donde se realizan todos los cálculos explicados en el punto 2.1 de este capítulo. Una vez efectuados los cálculos, los resultados deben ser enviados, vía Modbus RTU, al dispositivo esclavo ModSim. Para este fin, debe primero realizarse una conversión de los resultados en punto flotante a sus equivalentes en bytes, para así poder ser enviados en el buffer de transmisión; para esto, se ejecuta la subrutina **Float2Bytes**. Luego de esto, se procede a la escritura del buffer que contiene los resultados a ser enviados al dispositivo esclavo; una vez escrito el buffer, se hace un llamado a la subrutina **write_multiple_registers**, cuya función es la escritura del buffer con la información necesaria para poder realizar el envío de resultados al esclavo. Nuevamente, se llama a la subrutina **request_wait_data**, para verificar que el esclavo ha recibido correctamente los datos. Luego de verificar la validez de los datos, se ejecuta la subrutina denominada **TX1buffer**, la cual se encarga de enviar al puerto COM1 al PC los resultados de los cálculos.

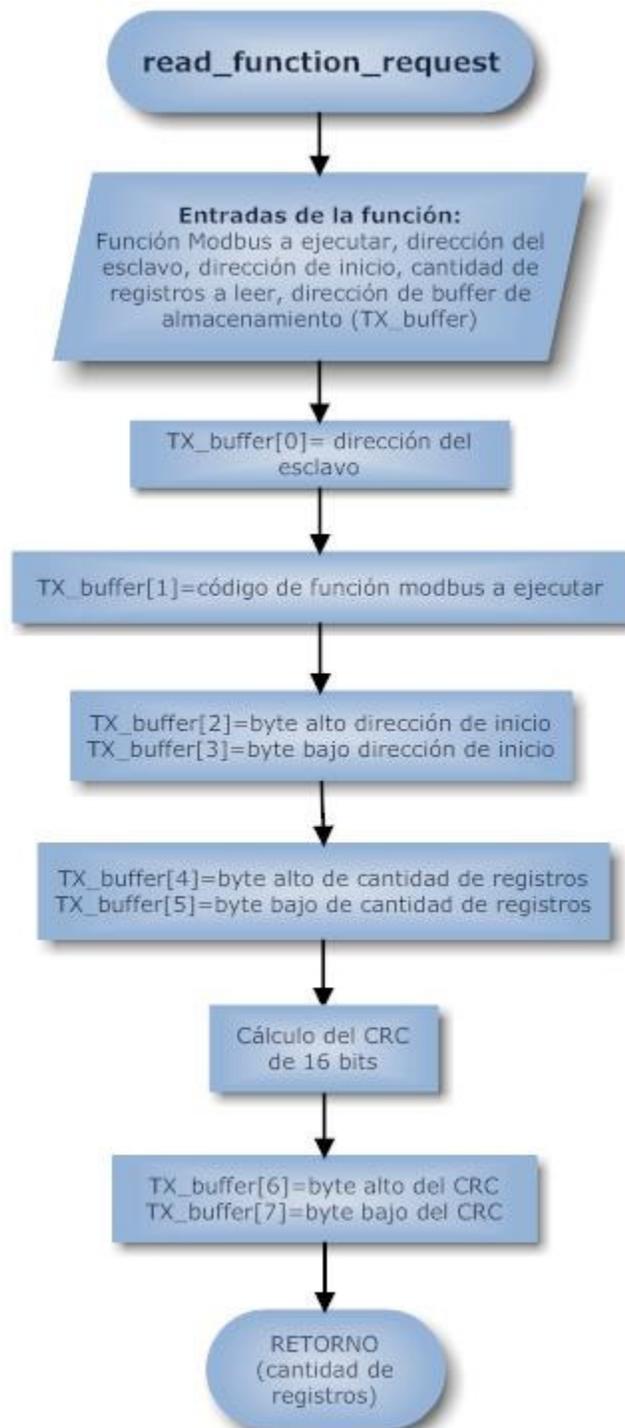


Figura 22. Diagrama de Flujo. Subrutina **read_function_request**.

- Subrutina **read_function_request**.

El diagrama de flujo correspondiente a esta subrutina se muestra en la figura 22. Los datos de entrada para esta función son los siguientes: el código de la función a realizar, la dirección del dispositivo esclavo, dirección de inicio de datos, cantidad de registros pedidos y el buffer en el cual está contenida la data requerida. La función de este subprograma consiste en la escritura en un buffer de toda la información necesaria para que el maestro realice una petición al esclavo. Este buffer debe contener, en el mismo orden, la dirección del esclavo, el código de la función Modbus a ejecutar, la dirección a partir de la cual se tomarán los datos, la cantidad de registros que se desean leer, y por último los bytes correspondientes a la verificación de errores, calculados mediante un Control de Redundancia Cíclica (CRC de 16 bits), tal como se muestra a continuación en la figura 23.

Dir. Esclavo	Cód. Función	Dirección inicial		Cantidad de Registros		CRC 16 bits	
1 byte	1 byte	2 bytes		2 bytes		2 bytes	
		Dir. Hi	Dir. Lo	Cant. Hi	Cant. Lo	CRC Hi	CRC Lo

Figura 23. Trama del buffer a enviar al esclavo.

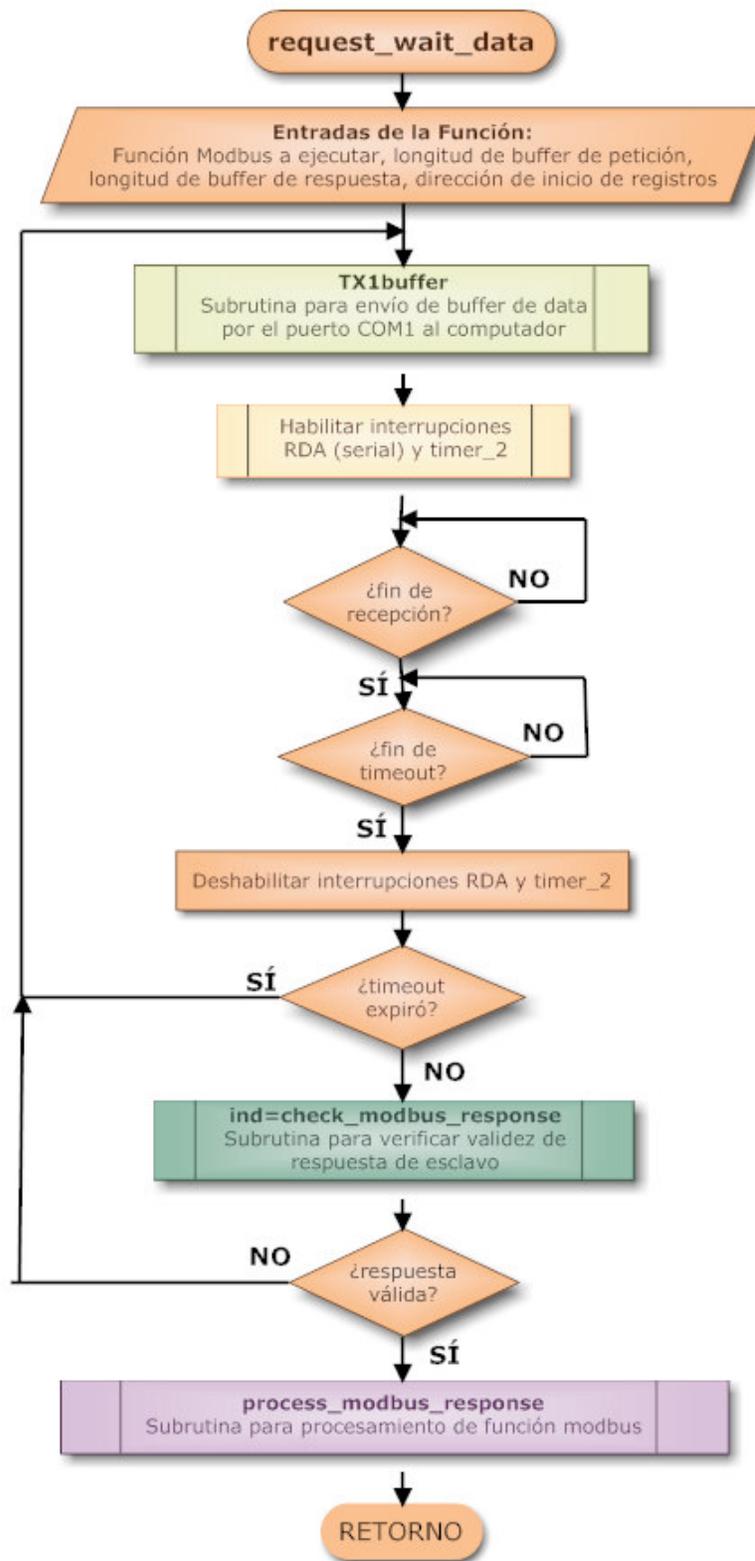


Figura 24. Diagrama de Flujo. Subrutina **request_wait_data**.

- Subrutina **request_wait_data**.

Los valores de entrada a esta subrutina, cuyo diagrama de flujo está representado en la figura 24, son los siguientes: el código de la función Modbus a ser ejecutada, la longitud del buffer que hace la petición al dispositivo esclavo, la longitud esperada del buffer de respuesta y por último la dirección de inicio de los registros. La función principal de este programa consiste en el procesamiento de la respuesta del esclavo, previa verificación de la respuesta de la misma. La secuencia de ejecución de los comandos de esta subrutina se describe a continuación: en primer lugar, se ejecuta la subrutina **TX1buffer**, la cual se encarga de enviar el buffer de datos, escrito en la subrutina anterior, por el puerto COM al dispositivo esclavo; una vez enviado el buffer de transmisión, se procede a habilitar las interrupciones serial y del timer 2, la primera encargada de recibir la respuesta del esclavo mediante el puerto COM y la segunda encargada de generar la cuenta del timeout, que es el tiempo de espera de respuesta; ya activadas las interrupciones, se debe verificar que el buffer proveniente del dispositivo esclavo se recibió en su totalidad, así como también que ha transcurrido el tiempo máximo de espera de respuesta; si la respuesta es recibida antes de haber expirado el tiempo de espera, entonces se procede a la verificación de la respuesta enviada por el esclavo, mediante la subrutina **check_modbus_response**, en caso de haber expirado el timeout, entonces debe reiniciarse todo el procedimiento a partir del envío de la data aplicando la subrutina **TX1buffer**; si al verificar la respuesta del esclavo resulta válida, entonces ésta es procesada ejecutando la función **process_modbus_response**, mientras que al ser inválida debe reiniciarse la secuencia de la función **request_wait_data**. Luego de haber recibido y procesado la respuesta válida del esclavo, entonces los datos de entrada se encuentran almacenados en memoria RAM del dispositivo maestro (PIC) en el buffer de recepción.

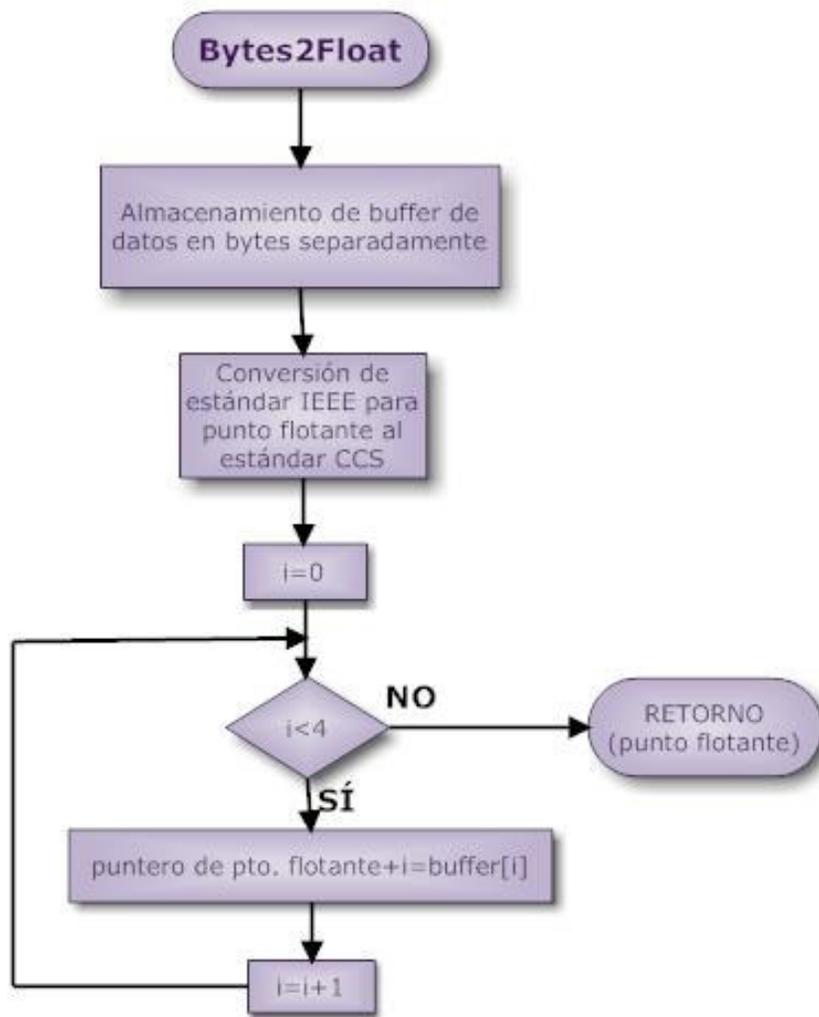


Figura 25. Diagrama de Flujo. Subrutina **Bytes2Float**.

- Subrutina **Bytes2Float**.

Esta subrutina (ver figura 25) tiene como finalidad la conversión de un bloque de 4 bytes a su valor equivalente en punto flotante. El maestro PIC ejecuta este subprograma luego de haber recibido del esclavo una serie de valores de entrada con formato de punto flotante. El estándar que utiliza el simulador de dispositivo esclavo, ModSim, para la transformación de un número en punto flotante a un entero de 4 bytes, es el establecido por la IEEE (IEEE-754), mientras que el compilador utilizado define su propio estándar. Es importante entonces, previo a la transformación de 4 bytes a punto flotante, realizar la conversión pertinente entre un estándar y otro. Esta conversión consiste básicamente en el cambio de las posiciones de los bits que representan el signo del número y el campo del exponente. Una vez realizada la conversión del estándar, entonces se efectúa la transformación de 4 bytes a un valor en punto flotante. Para esta conversión, se crea una variable como punto flotante, a la cual se le asigna un puntero de 8 bits, el cual indica la posición de la memoria RAM donde son almacenados los 4 bytes a convertir en float. El puntero hace una rotación de 8 bits a medida que va almacenando cada uno de los 4 bytes, y una vez almacenados, genera como salida el valor en punto flotante que se encuentra en la dirección asignada por dicho puntero.

- Subrutina **Float2Bytes**.

Esta subrutina, esquematizada en la figura 26, es el equivalente inverso a la subrutina **Bytes2Float**. En este caso, debe convertirse un número con formato de punto flotante a su equivalente de 4 bytes. Para este caso, para una variable de entrada tipo float, también se asigna un puntero de 8 bits que indica la dirección de la memoria RAM donde se almacena dicha variable. En este caso, el procedimiento es opuesto, el byte contenido en la dirección del puntero se va almacenando en un buffer de 4 bytes y la posición del puntero se incrementa al mismo tiempo que la posición del buffer, que contendrá el equivalente en bytes del número flotante. Este buffer

contendrá el equivalente al float de acuerdo al estándar propio del compilador, razón por la cual debe realizarse la transformación al estándar IEEE para que el dispositivo esclavo pueda recibir los datos correctamente.

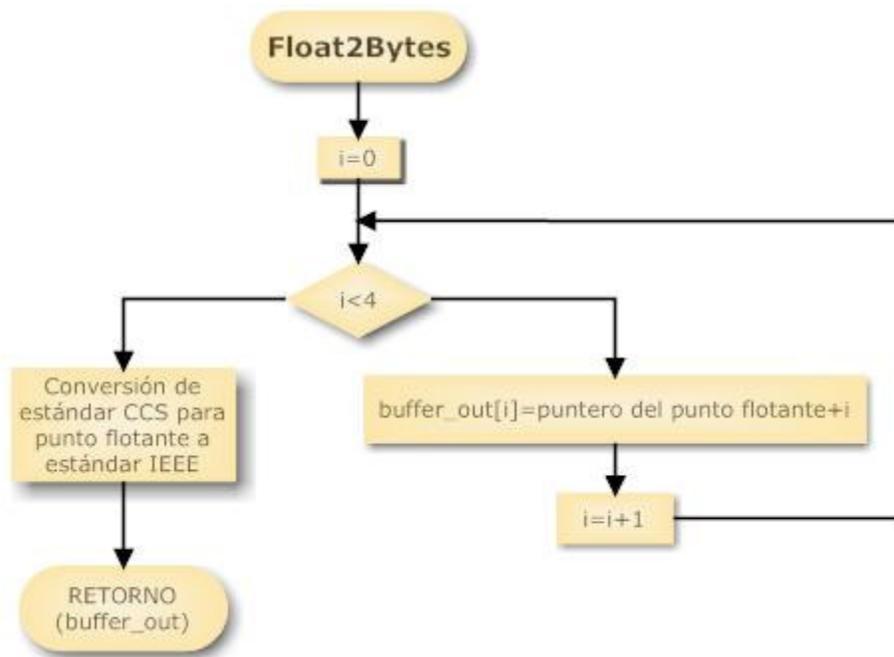


Figura 26. Diagrama de Flujo. Subrutina. **Float2Bytes**.

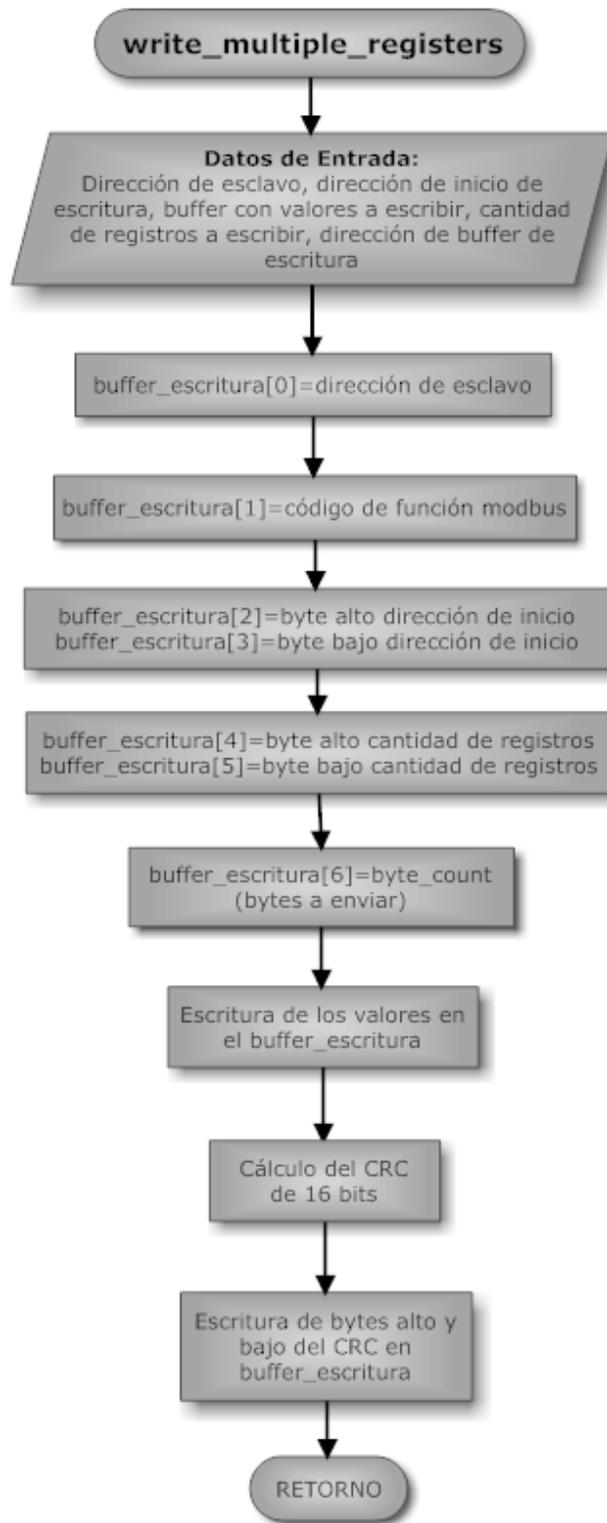


Figura 27. Diagrama de Flujo. Subrutina **write_multiple_registers**.

- Subrutina **write_multiple_registers**.

La función **write_multiple_registers**, tal y como se indica en el diagrama de flujo de la figura 27, tiene como valores de entrada los siguientes: la dirección del dispositivo esclavo, la dirección a partir de la cual se hará la escritura de registros, el buffer donde se encuentran los bytes de los registros que se desean escribir, la cantidad de registros que se desean escribir y la dirección de del buffer que contiene la información que será enviada al dispositivo esclavo. Esta subrutina, tal y como su nombre lo indica, permite la escritura consecutiva de múltiples registros para luego ser enviados al dispositivo esclavo. El buffer generado por este subprograma cumple con una secuencia específica en el orden de los bytes, empezando por la dirección del esclavo, luego el código de la función Modbus (en este caso 10H), los dos bytes siguientes corresponden a la dirección de inicio, seguidamente se escriben los dos bytes que indican el número de registros a escribir, luego se indica en un byte la cantidad de bytes que contendrá el buffer (**byte_count**), posteriormente se escriben todos los registros indicados para luego terminar la trama con los dos bytes correspondientes al chequeo de errores mediante el CRC de 16 bits. Esta trama se ilustra a continuación en la figura 28.

Dir. Esclavo	Cód. Función	Dirección de Inicio		Cantidad de Registros		Byte_Count	Registros	CRC 16 bits	
1 byte	1 byte	2 bytes		2 bytes		1 byte (2*cant. reg)	Hasta 123 registros (246 bytes)	2 bytes	
		Dir. Hi	Dir. Lo	Cant. Hi	Cant. Lo			CRC Hi	CRC Lo

Figura 28. Trama de buffer generado por subrutina **write_multiple_registers**.

- Subrutina **TX1buffer**.

Esta subrutina, representada en el diagrama de la figura 29, tiene como finalidad el envío de un buffer de datos, caracter por caracter, a través del puerto COM desde el dispositivo maestro (o sea, el microcontrolador PIC) hasta el dispositivo esclavo (es decir, el simulador ModSim ejecutado en PC). Esta rutina es aplicada cuando el maestro ha finalizado los cálculos de las normas AGA y ha generado los resultados, que luego son enviados a la PC; también se ejecuta este subprograma cuando el maestro desea leer los datos contenidos en el dispositivo esclavo, y envía la petición con todos los datos pertinentes para este fin.

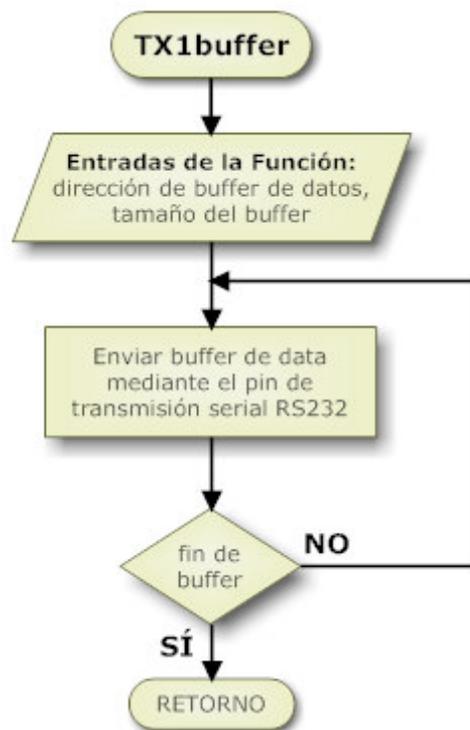


Figura 29. Diagrama de Flujo. Subrutina **TX1buffer**.

- Subrutina **int_rda** (interrupción serial).

La figura 30 ilustra la subrutina para la recepción de datos por el puerto serial del microcontrolador PIC. Este subprograma consiste en el almacenamiento en un buffer de recepción de los datos provenientes del puerto COM del PIC. Para una recepción óptima, se debe indicar la longitud del buffer a recibir, y al haber finalizado la recepción de datos, se activa un bit indicador de que el buffer fue escrito completamente.

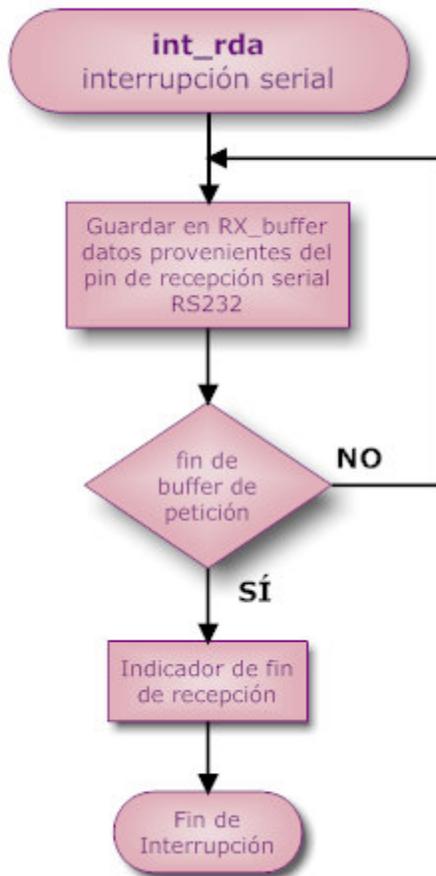


Figura 30. Diagrama de Flujo. Subrutina **int_rda** (interrupción serial).

- Subrutina **int_timer2** (interrupción del timer 2)

Esta subrutina (ver diagrama de flujo de figura 31) está diseñada para que realice el conteo del tiempo de espera de respuesta del dispositivo esclavo ante la petición previamente ejecutada por el dispositivo maestro. Si sucede que el tiempo de respuesta o timeout ha culminado y el maestro aún no recibe la respuesta proveniente del esclavo, entonces se activa un bit que indica que el tiempo de espera ha expirado. En este caso, debe repetirse todo el proceso de petición del maestro al esclavo.



Figura 31. Diagrama de Flujo. Subrutina **int_timer2** (interrupción del timer 2).

- Subrutina **int_timer3** (interrupción del timer 3)

Esta rutina, cuyo diagrama de flujo está representado en la figura 32, es muy similar a la rutina anterior, interrupción del timer 2. En este caso, a diferencia del anterior, se activa una cuenta para el tiempo de espera entre peticiones del maestro al dispositivo esclavo, es decir, el tiempo de scan. De igual manera, existe un indicador que sirve para conocer si el tiempo de scan ha expirado antes de que el dispositivo maestro vuelva a hacer una petición; en este caso, debe reiniciarse todo el procedimiento de petición de maestro a esclavo.

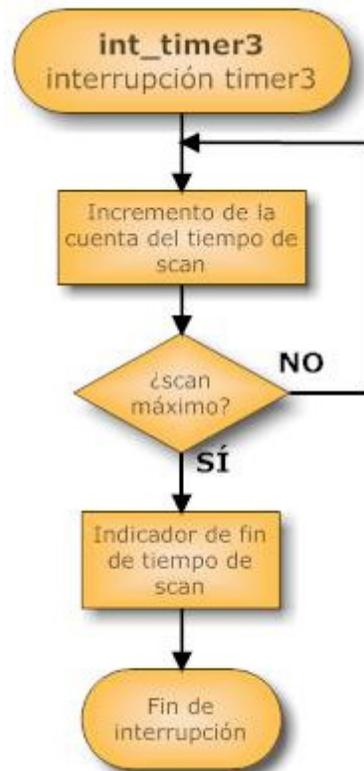


Figura 32. Diagrama de Flujo. Subrutina **int_timer3** (interrupción del timer 3).

- Subrutina **process_modbus_response**.

La figura 33 describe el funcionamiento de este programa, el cual se encarga de verificar cuál es la función Modbus que el maestro ha solicitado al dispositivo esclavo. Para el punto donde se realiza esta función, ya se ha verificado que la respuesta enviada por el dispositivo esclavo es válida, de manera que su única función es direccionar el buffer proveniente del esclavo para ejecutar la función Modbus indicada en la trama. Para la aplicación concerniente a este proyecto, sólo se emplearon las funciones de lectura y escritura de registros tipo holding, sin embargo, el protocolo Modbus RTU define muchas otras funciones que pueden ser efectuadas de acuerdo a las necesidades de cada aplicación.

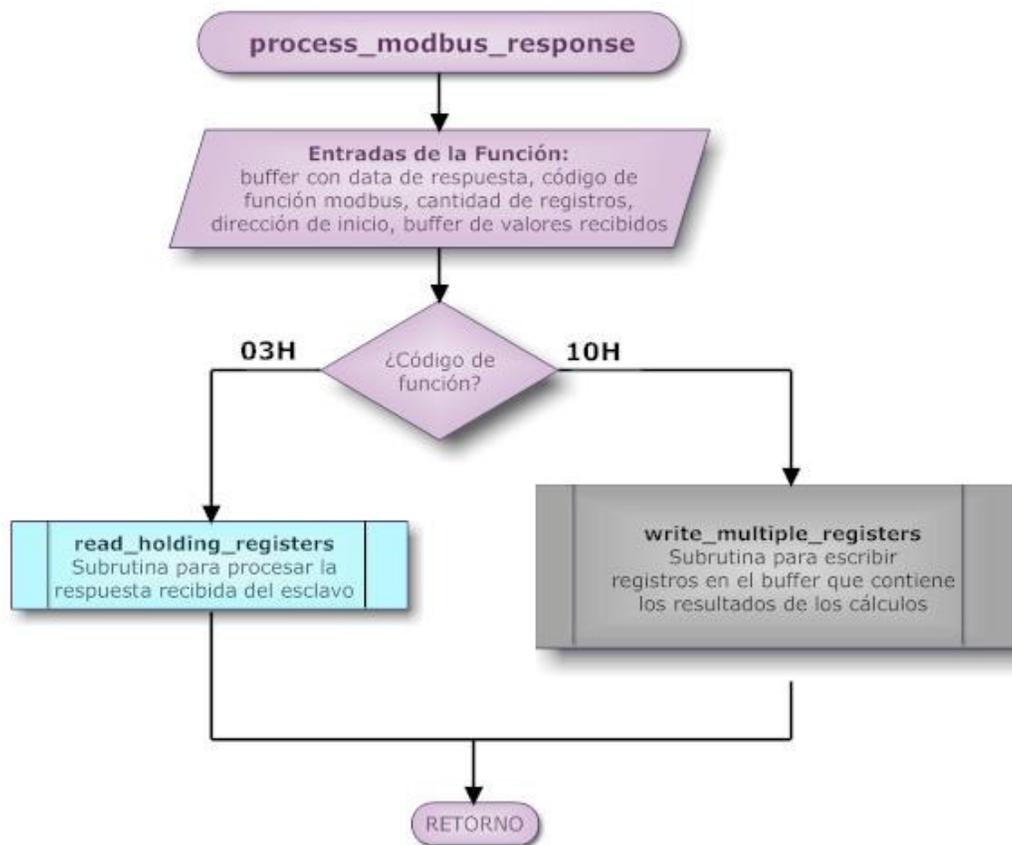


Figura 33. Diagrama de Flujo. Subrutina **process_modbus_response**.

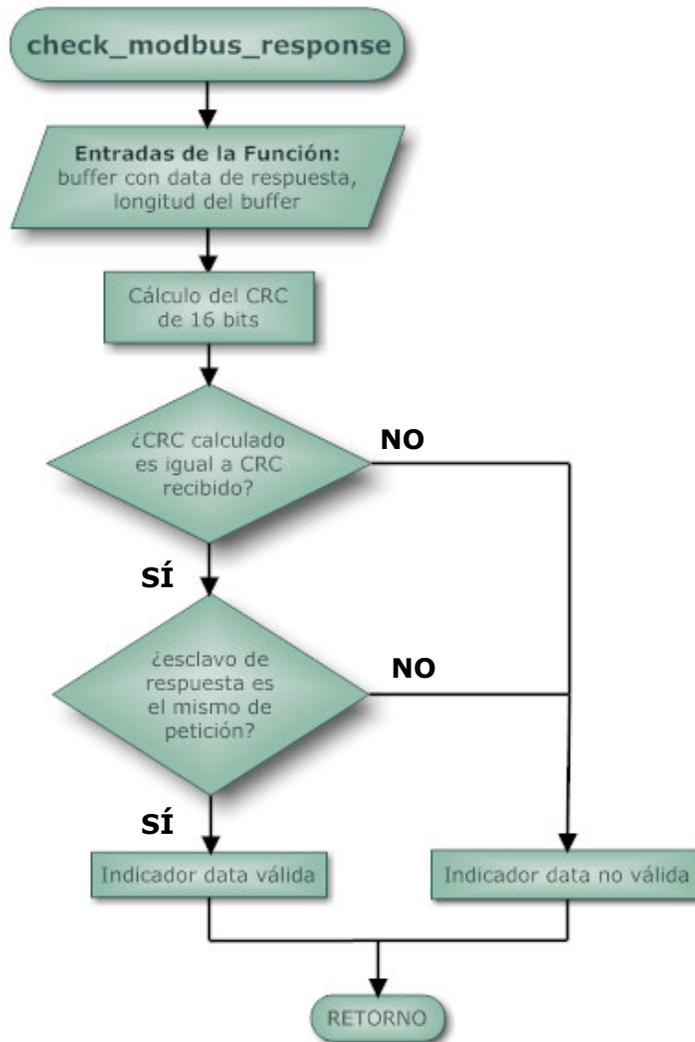


Figura 34. Diagrama de Flujo. Subrutina **check_modbus_response**.

- Subrutina **check_modbus_response**.

La rutina **check_modbus_response**, representada en el diagrama de flujo de la figura 34, tiene como función la verificación de la validez de la respuesta Modbus enviada por el dispositivo esclavo. Se observa que se hacen dos chequeos: en primer lugar se verifica que el CRC del buffer enviado sea igual al CRC del buffer recibido, así como también que el esclavo que envía la respuesta sea el mismo esclavo al cual se le envió la petición. Se generan entonces bits de data válida o de data no válida, según sea el caso.

- Subrutina **read_holding_registers**.

La finalidad de este subprograma, representado en la figura 35, consiste en procesar la respuesta que el maestro PIC recibe del esclavo. En primer lugar se debe verificar que la cantidad de bytes que recibe el maestro coincida con la cantidad de bytes que ha solicitado previamente; en caso de fallo, debe enviarse un mensaje de error, pero si la respuesta es correcta, se procede al almacenamiento de los bytes recibidos en un buffer.

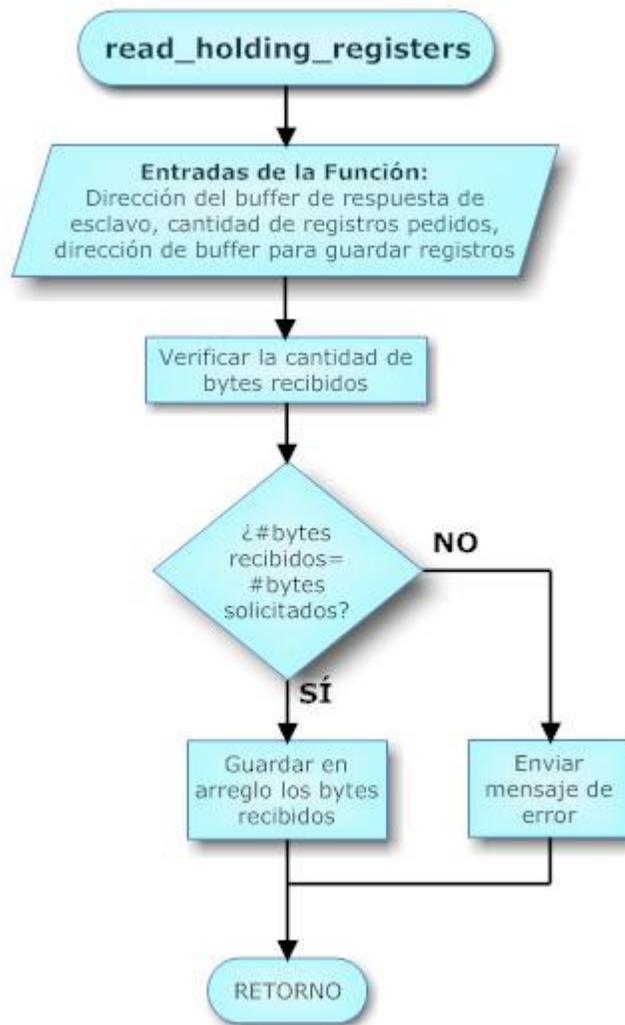


Figura 35. Diagrama de Flujo. Subrutina **read_holding_registers**.

2.3. Pruebas de los Resultados

Luego de haber realizado los programas anteriormente descritos, debe hacerse un estudio de los resultados obtenidos, para así perfeccionar el funcionamiento de cada aplicación. Los resultados obtenidos fueron comparados con ejemplos de cálculos que ofrecen las normas AGA. Debido a que los comandos encargados de la ejecución de las normas AGA8 y AGA3 cambian de una aplicación a otra únicamente en el lenguaje de programación, es prioritaria la comparación de los datos de referencia contenidos en las normas AGA con la aplicación que brinde la mejor precisión. Esta precisión varía de un equipo a otro debido a que no todos trabajan con la misma cantidad de decimales para los cálculos que involucren variables del tipo punto flotante. De esta forma, al ser depurado el programa cuya precisión es mayor, se asegura que los códigos desarrollados a partir de éste (ya sea por traducción entre lenguajes de programación o bien porque la aplicación es ejecutada en un equipo menos preciso) son también más exactos. De acuerdo con esto, las comparaciones de los resultados obtenidos con las tablas de resultados dispuestas en las normas AGA se realizaron utilizando como referencia la aplicación en Visual Studio .Net para PC, la cual brinda la mejor precisión en los cálculos.

En las tablas que se presentan a continuación se muestran los resultados obtenidos comparados con los que brinda la norma. Se hace un cálculo del error porcentual para cada resultado, para comprobar que la desviación máxima admitida por la norma (ver figura 1) no se sobrepasa en los resultados obtenidos. La comparación de los resultados obtenidos se hace para cada una de las normas en las 3 aplicaciones realizadas, es decir, se muestran los resultados de AGA8 mediante ambos métodos, Caracterización Detallada y Caracterización Aproximada, y los resultados de AGA3, para las aplicaciones en PC, en ARM y en microcontrolador PIC.

En la tabla 3, mostrada a continuación, se describe la composición molar de cada uno de los gases utilizados para las pruebas (gas Gulf Coast, gas amarillo, gas Ekofisk, gas con alta concentración de N₂ y gas con alta concentración de CO₂-N₂).

Tabla 3. Composición de Gases Naturales.

Componente	Fracción Molar para los gases indicados				
	Gulf Coast	Amarillo	Ekofisk	Alto N ₂	Alto CO ₂ -N ₂
Metano	0,965222	0,906724	0,859063	0,814410	0,812110
Nitrógeno	0,002595	0,031284	0,010068	0,134650	0,057020
Dióxido de Carbono	0,005956	0,004676	0,014954	0,009850	0,075850
Etano	0,018186	0,045279	0,084919	0,033000	0,043030
Propano	0,004596	0,008280	0,023015	0,006050	0,008950
i-Butano	0,000977	0,001037	0,003486	0,001000	0,001510
n-Butano	0,001007	0,001563	0,003506	0,001040	0,001520
i-Pentano	0,000473	0,000321	0,000509	0,000000	0,000000
n-Pentano	0,000324	0,000443	0,000480	0,000000	0,000000
n-Hexano	0,000664	0,000393	0,000000	0,000000	0,000000
n-Heptano	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
n-Octano	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000

Tabla 4. Resultados. AGA8. Método de Caracterización Detallada.
Aplicación en PC.

Condiciones de Entrada	Variable calculada	Resultado obtenido	Resultado AGA	Error %	Error máximo admitido
T= 32 °F	Z	0,997405	0,997406	0,000100 %	0,1% (región 1)
P= 14,73 psi					
Gas: Gulf Coast					
T= 50 °F	Z	0,997707	0,997707	0,000000 %	0,1% (región 1)
P= 14,73 psi					
Gas: Gulf Coast					
T= 32 °F	Z	0,963133	0,963200	0,006956 %	0,1% (región 1)
P= 200 psi					
Gas: Amarillo					
T= 100 °F	Z	0,998291	0,998294	0,000300 %	0,1% (región 1)
P= 14,73 psi					
Gas: Amarillo					
T= 32 °F	Z	0,818610	0,819226	0,075193 %	0,1% (región 1)
P= 800 psi					
Gas: Ekofisk					
T= 130 °F	Z	0,998292	0,998296	0,000401 %	0,1% (región 1)
P= 14,73 psi					
Gas: Ekofisk					
T= 50 °F	Z	0,944614	0,945093	0,050683 %	0,1% (región 1)
P= 400 psi					
Gas: Alto N ₂					
T= 100 °F	Z	0,998543	0,998556	0,001302 %	0,1% (región 1)
P= 14,73 psi					
Gas: Alto N ₂					
T= 100 °F	Z	0,975891	0,976194	0,031039 %	0,1% (región 1)
P= 200 psi					
Gas: Alto CO ₂					
T= 130 °F	Z	0,961256	0,961787	0,055209 %	0,1% (región 1)
P= 400 psi					
Gas: Alto CO ₂					

Tabla 5. Resultados. AGA8. Método de Caracterización Detallada.
Aplicación en ARM.

Condiciones de Entrada	Variable calculada	Resultado obtenido	Resultado AGA	Error %	Error máximo admitido
T= 32 °F	Z	0,997403	0,997406	0,000301 %	0,1% (región 1)
P= 14,73 psi					
Gas: Gulf Coast					
T= 50 °F	Z	0,997706	0,997707	0,000100 %	0,1% (región 1)
P= 14,73 psi					
Gas: Gulf Coast					
T= 32 °F	Z	0,963133	0,963200	0,006956 %	0,1% (región 1)
P= 200 psi					
Gas: Amarillo					
T= 100 °F	Z	0,998291	0,998294	0,000300 %	0,1% (región 1)
P= 14,73 psi					
Gas: Amarillo					
T= 32 °F	Z	0,818610	0,819226	0,075193 %	0,1% (región 1)
P= 800 psi					
Gas: Ekofisk					
T= 130 °F	Z	0,998292	0,998296	0,000401 %	0,1% (región 1)
P= 14,73 psi					
Gas: Ekofisk					
T= 50 °F	Z	0,944614	0,945093	0,050683 %	0,1% (región 1)
P= 400 psi					
Gas: Alto N ₂					
T= 100 °F	Z	0,998543	0,998556	0,001302 %	0,1% (región 1)
P= 14,73 psi					
Gas: Alto N ₂					
T= 100 °F	Z	0,975891	0,976194	0,031039 %	0,1% (región 1)
P= 200 psi					
Gas: Alto CO ₂					
T= 130 °F	Z	0,961256	0,961787	0,055209 %	0,1% (región 1)
P= 400 psi					
Gas: Alto CO ₂					

Tabla 6. Resultados. AGA8. Método de Caracterización Detallada.
Aplicación en microcontrolador PIC.

Condiciones de Entrada	Variable calculada	Resultado obtenido	Resultado AGA	Error %	Error máximo admitido
T= 32 °F	Z	0,997548	0,997406	0,014237 %	0,1% (región 1)
P= 14,73 psi					
Gas: Gulf Coast					
T= 50 °F	Z	0,997822	0,997707	0,011526 %	0,1% (región 1)
P= 14,73 psi					
Gas: Gulf Coast					
T= 32 °F	Z	0,964247	0,963200	0,108700 %	0,1% (región 1)
P= 200 psi					
Gas: Amarillo					
T= 100 °F	Z	0,998364	0,998294	0,007012 %	0,1% (región 1)
P= 14,73 psi					
Gas: Amarillo					
T= 32 °F	Z	0,795665	0,819226	2,876006 %	0,1% (región 1)
P= 800 psi					
Gas: Ekofisk					
T= 130 °F	Z	0,998372	0,998296	0,007613 %	0,1% (región 1)
P= 14,73 psi					
Gas: Ekofisk					
T= 50 °F	Z	0,943450	0,945093	0,173845 %	0,1% (región 1)
P= 400 psi					
Gas: Alto N ₂					
T= 100 °F	Z	0,998597	0,998556	0,004106 %	0,1% (región 1)
P= 14,73 psi					
Gas: Alto N ₂					
T= 100 °F	Z	0,976367	0,976194	0,017722 %	0,1% (región 1)
P= 200 psi					
Gas: Alto CO ₂					
T= 130 °F	Z	0,960326	0,961787	0,151905 %	0,1% (región 1)
P= 400 psi					
Gas: Alto CO ₂					

Para el Método de Caracterización Aproximada, también se muestra una tabla (tabla 7) con los valores de las variables de entrada (HV o fracción molar de N₂, de acuerdo al método empleado, Gr, fracción molar de CO₂) para cada tipo de gas (gas Gulf Coast, gas amarillo, gas Ekofisk, gas con alta concentración de N₂ y gas con alta concentración de CO₂-N₂).

Tabla 7. Parámetros de entrada para Método de Caracterización Aproximada. Métodos 1 y 2.

Variable	Valores de las variables para cada tipo de gas				
	Gulf Coast	Amarillo	Ekofisk	Alto N ₂	Alto CO ₂ -N ₂
HV (kJ/dm³)	38,6022	38,5574	41,2871	33,7797	34,7672
Gr	0,581078	0,608657	0,649521	0,644869	0,686002
N₂ (fracción molar)	0,002595	0,0031284	0,010068	0,134650	0,057021
CO₂ (fracción molar)	0,005956	0,004676	0,014954	0,009850	0,075851

Tabla 8. Resultados. AGA8. Método de Caracterización Aproximada.
Aplicación en PC.

Condiciones de Entrada	Variable calculada	Resultado obtenido	Resultado AGA	Error %
T= 32 °F	Z	0,997409	0,997407	0,000201 %
P= 14,73 psi				
Gas: Gulf Coast				
T= 50 °F	Z	0,997705	0,997704	0,001002 %
P= 14,73 psi				
Gas: Gulf Coast				
T= 32 °F	Z	0,963329	0,963300	0,003010 %
P= 200 psi				
Gas: Amarillo				
T= 100 °F	Z	0,998292	0,998294	0,000200 %
P= 14,73 psi				
Gas: Amarillo				
T= 32 °F	Z	0,819952	0,819545	0,049661 %
P= 800 psi				
Gas: Ekofisk				
T= 130 °F	Z	0,998295	0,998299	0,000401 %
P= 14,73 psi				
Gas: Ekofisk				
T= 50 °F	Z	0,945342	0,945320	0,002327 %
P= 400 psi				
Gas: Alto N₂				
T= 100 °F	Z	0,998555	0,998556	0,000100 %
P= 14,73 psi				
Gas: Alto N₂				
T= 100 °F	Z	0,976410	0,976284	0,012906 %
P= 200 psi				
Gas: Alto CO₂				
T= 130 °F	Z	0,962345	0,961840	0,052504 %
P= 400 psi				
Gas: Alto CO₂				

Tabla 9. Resultados. AGA8. Método de Caracterización Aproximada.
Aplicación en ARM.

Condiciones de Entrada	Variable calculada	Resultado obtenido	Resultado AGA	Error %
T= 32 °F	Z	0,997409	0,997407	0,000201 %
P= 14,73 psi				
Gas: Gulf Coast				
T= 50 °F	Z	0,997705	0,997704	0,001002 %
P= 14,73 psi				
Gas: Gulf Coast				
T= 32 °F	Z	0,963329	0,963300	0,003010 %
P= 200 psi				
Gas: Amarillo				
T= 100 °F	Z	0,998292	0,998294	0,000200 %
P= 14,73 psi				
Gas: Amarillo				
T= 32 °F	Z	0,819952	0,819545	0,049661 %
P= 800 psi				
Gas: Ekofisk				
T= 130 °F	Z	0,998295	0,998299	0,000401 %
P= 14,73 psi				
Gas: Ekofisk				
T= 50 °F	Z	0,945342	0,945320	0,002327 %
P= 400 psi				
Gas: Alto N₂				
T= 100 °F	Z	0,998555	0,998556	0,000100 %
P= 14,73 psi				
Gas: Alto N₂				
T= 100 °F	Z	0,976410	0,976284	0,012906 %
P= 200 psi				
Gas: Alto CO₂				
T= 130 °F	Z	0,962345	0,961840	0,052504 %
P= 400 psi				
Gas: Alto CO₂				

Tabla 10. Resultados. AGA8. Método de Caracterización Aproximada.
Aplicación en PIC.

Condiciones de Entrada	Variable calculada	Resultado obtenido	Resultado AGA	Error %
T= 32 °F	Z	0,997569	0,997407	0,016242 %
P= 14,73 psi				
Gas: Gulf Coast				
T= 50 °F	Z	0,997857	0,997704	0,015335 %
P= 14,73 psi				
Gas: Gulf Coast				
T= 32 °F	Z	0,999298	0,963300	3,736946 %
P= 200 psi				
Gas: Amarillo				
T= 100 °F	Z	1,000015	0,998294	0,172394 %
P= 14,73 psi				
Gas: Amarillo				
T= 32 °F	Z	0,868048	0,819545	5,918284 %
P= 800 psi				
Gas: Ekofisk				
T= 130 °F	Z	0,998816	0,998299	0,051788 %
P= 14,73 psi				
Gas: Ekofisk				
T= 50 °F	Z	1,130566	0,945320	19,596116 %
P= 400 psi				
Gas: Alto N₂				
T= 100 °F	Z	1,005183	0,998556	0,663658 %
P= 14,73 psi				
Gas: Alto N₂				
T= 100 °F	Z	1,015472	0,976284	4,013996 %
P= 200 psi				
Gas: Alto CO₂				
T= 130 °F	Z	1,035637	0,961840	7,672482 %
P= 400 psi				
Gas: Alto CO₂				

Por último, los resultados obtenidos en los cálculos de AGA3 para cada una de las tres aplicaciones (PC, ARM y PIC) se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 11. Resultados. AGA3. Aplicación en PC.

Condiciones de Entrada	Variable calculada	Resultado obtenido	Resultado AGA	Error %
P=21,56 bar; ΔP=457,01 milibar; ρ _{tp} =22,573Kg/m ³ ; T=55,3°C; D=279,6mm; d=173,27mm; μ=0,012cP; k=1,3; HV=37,5kJ/dm ³	Qm	21,97628 kg/s	21,99611 kg/s	0,09015 %
P=1,01325 bar; ΔP=271,159 milibar; ρ _{tp} =941,75Kg/m ³ ; T=98,89°C; D=59,262mm; d=36,909mm; μ=0,02825cP; k=1,3; HV=38,6022kJ/dm ³	Qm	4,56921 kg/s	4,57551 kg/s	0,12769 %
P=1,01325 bar; ΔP=26,38 milibar; ρ _{tp} =932,276Kg/m ³ ; T=-17,78°C; D=202,729mm; d=45,481mm; μ=0,02825cP; k=1,3; HV=38,5574kJ/dm ³	Qm	2,13814 kg/s	2,13756 kg/s	0,02713 %
P=13,7895 bar; ΔP=139877 milibar; ρ _{tp} =32,783Kg/m ³ ; T=30°C; D=102,27mm; d=67,667mm; μ=0,01325cP; k=1,3; HV=33,7797kJ/dm ³	Qm	2,31039 kg/s	2,31154 kg/s	0,04975 %
P=1,01325 bar; ΔP=271,159 milibar; ρ _{tp} =10,5614Kg/m ³ ; T=98,89°C; D=59,262mm; d=36,909mm; μ=0,02825cP; k=1,3; HV=38,6022kJ/dm ³	Qm	0,40934 kg/s	0,40902 kg/s	0,07824 %
P=33,92 bar; ΔP=427,91 milibar; ρ _{tp} =30,395Kg/m ³ ; T=47,3°C; D=250,7mm; d=143,21mm; μ=0,012cP; k=1,3, HV=38,6022kJ/dm ³	Qm	16,52288 kg/s	16,52974 kg/s	0,04150 %
P=1,01325 bar; ΔP=274,159 milibar; ρ _{tp} =932,26Kg/m ³ ; T=50°C; D=279,6mm; d=173,27mm; μ=0,012cP; k=1,3; HV=38,6022kJ/dm ³	Qm	99,51831 kg/s	99,69724 kg/s	0,17947 %

P=40,7 bar; $\Delta P=390,83$milibar; $\rho_{tp}=27,412$Kg/m³; T=50°C; D=215,64mm; d=110,9mm; $\mu=0,02825$cP; k=1,3198; HV=38,6022kJ/dm³	Qm	8,81952 kg/s	8,81773 kg/s	0,02030 %
P=21,56 bar; $\Delta P=390,83$milibar; $\rho_{tp}=30,395$Kg/m³; T=50°C; D=250,7mm; d=143,21mm; $\mu=0,02825$cP; k=1,3198; HV=38,6022kJ/dm³	Qm	15,77526 kg/s	15,77293 kg/s	0,01477 %
P=13,7895 bar; $\Delta P=139,877$milibar; $\rho_{tp}=27,412$Kg/m³; T=30°C; D=59,262mm; d=36,909mm; $\mu=0,02825$cP; k=1,3, HV=38,6022kJ/dm³	Qm	0,61655 kg/s	0,61604 kg/s	0,08279 %

Tabla 12. Resultados. AGA3. Aplicación en ARM.

Condiciones de Entrada	Variable calculada	Resultado obtenido	Resultado AGA	Error %
P=21,56 bar; $\Delta P=457,01$milibar; $\rho_{tp}=22,573$Kg/m³; T=55,3°C; D=279,6mm; d=173,27mm; $\mu=0,012$cP; k=1,3; HV=37,5kJ/dm³	Qm	21,97628 kg/s	21,99611 kg/s	0,09015 %
P=1,01325 bar; $\Delta P=271,159$milibar; $\rho_{tp}=941,75$Kg/m³; T=98,89°C; D=59,262mm; d=36,909mm; $\mu=0,02825$cP; k=1,3; HV=38,6022kJ/dm³	Qm	4,56921 kg/s	4,57551 kg/s	0,12769 %
P=1,01325 bar; $\Delta P=26,38$milibar; $\rho_{tp}=932,276$Kg/m³; T=-17,78°C; D=202,729mm; d=45,481mm; $\mu=0,02825$cP; k=1,3; HV=38,5574kJ/dm³	Qm	2,13814 kg/s	2,13756 kg/s	0,02713 %
P=13,7895 bar; $\Delta P=139877$milibar; $\rho_{tp}=32,783$Kg/m³; T=30°C; D=102,27mm; d=67,667mm; $\mu=0,01325$cP; k=1,3; HV=33,7797kJ/dm³	Qm	2,31039 kg/s	2,31154 kg/s	0,04975 %

P=1,01325 bar; $\Delta P=271,159$milibar; $\rho_{tp}=10,5614$Kg/m³; T=98,89°C; D=59,262mm; d=36,909mm; $\mu=0,02825$cP; k=1,3; HV=38,6022kJ/dm³ 	Qm	0,40934 kg/s	0,40902 kg/s	0,07824 %
P=33,92 bar; $\Delta P=427,91$milibar; $\rho_{tp}=30,395$Kg/m³; T=47,3°C; D=250,7mm; d=143,21mm; $\mu=0,012$cP; k=1,3, HV=38,6022kJ/dm³ 	Qm	16,52288 kg/s	16,52974 kg/s	0,04150 %
P=1,01325 bar; $\Delta P=274,159$milibar; $\rho_{tp}=932,26$Kg/m³; T=50°C; D=279,6mm; d=173,27mm; $\mu=0,012$cP; k=1,3; HV=38,6022kJ/dm³ 	Qm	99,51831 kg/s	99,69724 kg/s	0,17947 %
P=40,7 bar; $\Delta P=390,83$milibar; $\rho_{tp}=27,412$Kg/m³; T=50°C; D=215,64mm; d=110,9mm; $\mu=0,02825$cP; k=1,3198; HV=38,6022kJ/dm³ 	Qm	8,81952 kg/s	8,81773 kg/s	0,02030 %
P=21,56 bar; $\Delta P=390,83$milibar; $\rho_{tp}=30,395$Kg/m³; T=50°C; D=250,7mm; d=143,21mm; $\mu=0,02825$cP; k=1,3198; HV=38,6022kJ/dm³ 	Qm	15,77526 kg/s	15,77293 kg/s	0,01477 %
P=13,7895 bar; $\Delta P=139,877$milibar; $\rho_{tp}=27,412$Kg/m³; T=30°C; D=59,262mm; d=36,909mm; $\mu=0,02825$cP; k=1,3, HV=38,6022kJ/dm³ 	Qm	0,61655 kg/s	0,61604 kg/s	0,08279 %

Tabla 13. Resultados. AGA3. Aplicación en PIC.

Condiciones de Entrada	Variable calculada	Resultado obtenido	Resultado AGA	Error %
P=21,56 bar; ΔP=457,01milibar; ρ _{tp} =22,573Kg/m ³ ; T=55,3°C; D=279,6mm; d=173,27mm; μ=0,012cP; k=1,3; HV=37,5kJ/dm ³	Qm	21,65618 kg/s	21,99611 kg/s	1,54541 %
P=1,01325 bar; ΔP=271,159milibar; ρ _{tp} =941,75Kg/m ³ ; T=98,89°C; D=59,262mm; d=36,909mm; μ=0,02825cP; k=1,3; HV=38,6022kJ/dm ³	Qm	4,25706 kg/s	4,57551 kg/s	6,95988 %
P=1,01325 bar; ΔP=26,38milibar; ρ _{tp} =932,276Kg/m ³ ; T=-17,78°C; D=202,729mm; d=45,481mm; μ=0,02825cP; k=1,3; HV=38,5574kJ/dm ³	Qm	2,14418 kg/s	2,13756 kg/s	0,30970 %
P=13,7895 bar; ΔP=139877milibar; ρ _{tp} =32,783Kg/m ³ ; T=30°C; D=102,27mm; d=67,667mm; μ=0,01325cP; k=1,3; HV=33,7797kJ/dm ³	Qm	2,12420 kg/s	2,31154 kg/s	8,10455 %
P=1,01325 bar; ΔP=271,159milibar; ρ _{tp} =10,5614Kg/m ³ ; T=98,89°C; D=59,262mm; d=36,909mm; μ=0,02825cP; k=1,3; HV=38,6022kJ/dm ³	Qm	0,45110 kg/s	0,40902 kg/s	10,28801 %
P=33,92 bar; ΔP=427,91milibar; ρ _{tp} =30,395Kg/m ³ ; T=47,3°C; D=250,7mm; d=143,21mm; μ=0,012cP; k=1,3; HV=38,6022kJ/dm ³	Qm	16,35910 kg/s	16,52974 kg/s	1,03232 %
P=1,01325 bar; ΔP=274,159milibar; ρ _{tp} =932,26Kg/m ³ ; T=50°C; D=279,6mm; d=173,27mm; μ=0,012cP; k=1,3; HV=38,6022kJ/dm ³	Qm	94,21843 kg/s	99,69724 kg/s	5,49546 %

P=40,7 bar; $\Delta P=390,83$milibar; $\rho_{tp}=27,412$Kg/m³; T=50°C; D=215,64mm; d=110,9mm; $\mu=0,02825$cP; k=1,3198; HV=38,6022kJ/dm³	Qm	8,75868 kg/s	8,81773 kg/s	0,66967 %
P=21,56 bar; $\Delta P=390,83$milibar; $\rho_{tp}=30,395$Kg/m³; T=50°C; D=250,7mm; d=143,21mm; $\mu=0,02825$cP; k=1,3198; HV=38,6022kJ/dm³	Qm	15,59351 kg/s	15,77293 kg/s	1,13752 %
P=13,7895 bar; $\Delta P=139,877$milibar; $\rho_{tp}=27,412$Kg/m³; T=30°C; D=59,262mm; d=36,909mm; $\mu=0,02825$cP; k=1,3, HV=38,6022kJ/dm³	Qm	0,59350 kg/s	0,61604 kg/s	3,65885 %

En las figuras que se muestran a continuación se representa un ejemplo de la aplicación de AGA8 mediante el Método de Caracterización Detallada y de AGA3 implementado en el microcontrolador PIC, donde se observa la interfaz para introducción de datos y para la muestra de los resultados de los cálculos, ModSim. Asimismo, se muestra el monitor de puertos, mediante el cual se pueden observar los buffer creados para generar las peticiones y respuestas de la comunicación Modbus.

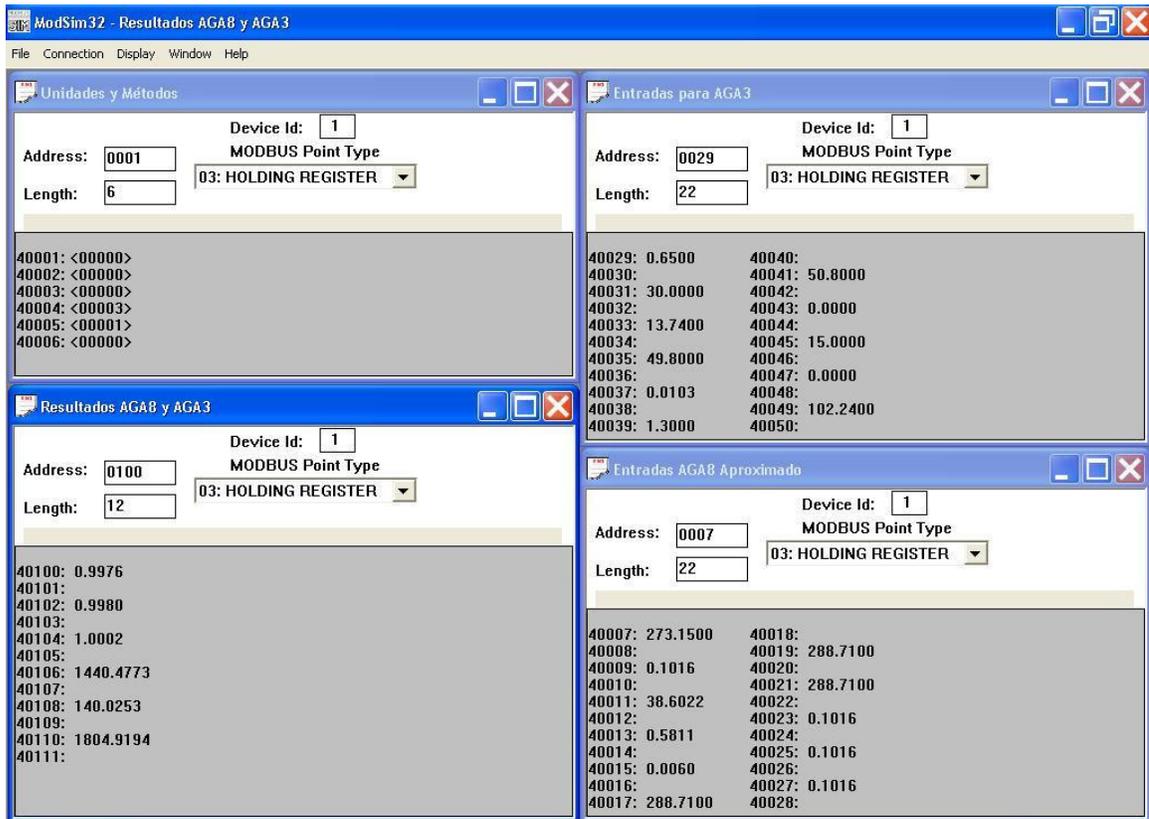


Figura 36. Vista de simulador de dispositivo esclavo ModSim.

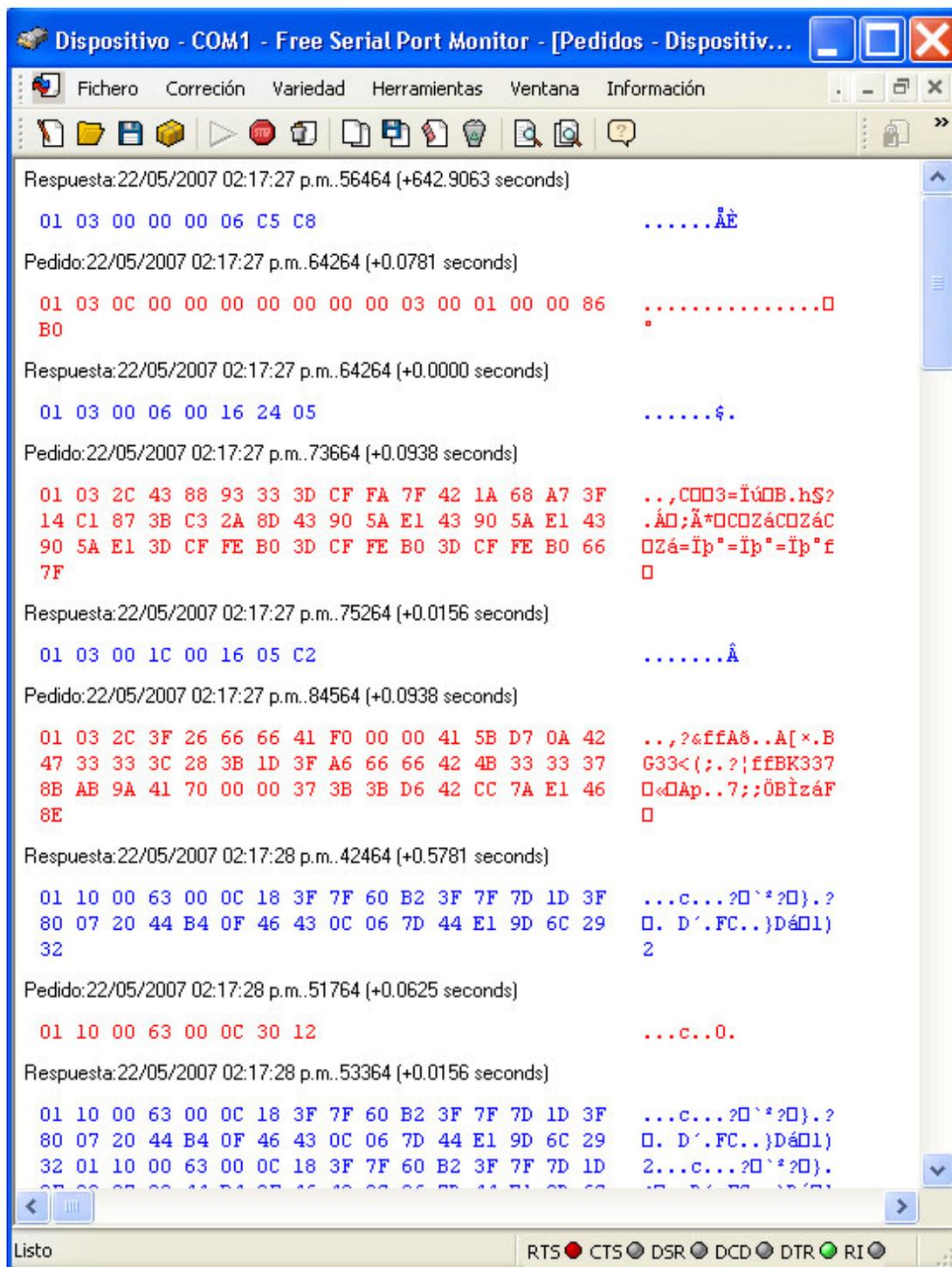


Figura 37. Monitor de Puertos. Comunicación Modbus RTU.

De forma similar, en las figuras 38 y 39, se muestran las aplicaciones del simulador de dispositivo maestro (ModScan) y del ISaGRAF para la comunicación Modbus TCP entre el ARM y el computador. El ejemplo mostrado corresponde a la aplicación de las normas AGA3 y AGA8, utilizando el Método de Caracterización Detallada.

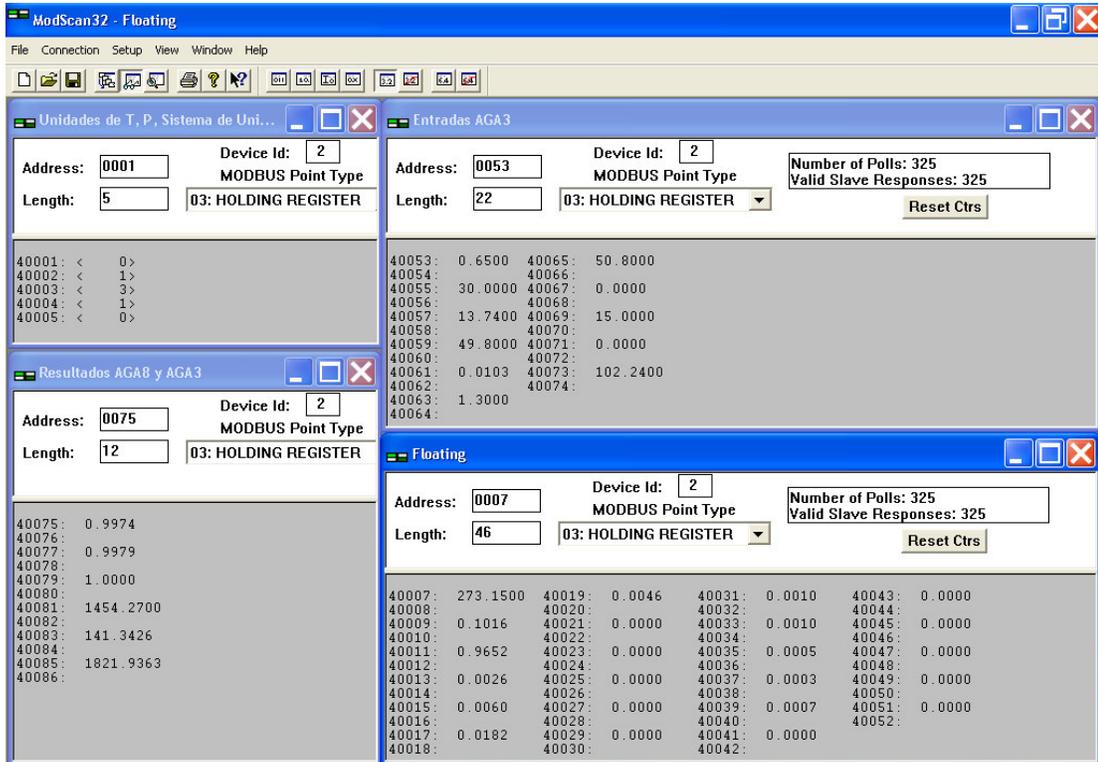


Figura 38. Vista de simulador de dispositivo maestro ModScan

ISaGRAF - AGA8_2 - Global integers/reals

File Edit Tools Options Help

Booleans Integers/Reals Timers Messages FB instances Defined words

Name	Attrib	Addr	Value	Comment
unidT	[internal,integer]	0001	0	Unidad de Temp (0=Kelvin, 1=Celsius, 2=Fahrenheit)
unidP	[internal,integer]	0002	1	Unidad de Presión (0=MPa, 1=psi, 2=bar)
unidades	[internal,integer]	0003	3	Sistema de Unidades para cálculos de AGA3
t_densidad	[internal,integer]	0004	1	Tipo de Dens. (0=Ptp a condiciones de flujo, 1=Gi relativa)
UbicOrif	[internal,integer]	0005	0	Ubicación de orificio (0=abrazadera, 1=esquina, 2=radial)
T	[internal,real]	0007	273.15	Temperatura
P	[internal,real]	0009	0.10165	Presión
X0	[internal,real]	000B	0.965222	Fracción Molar de Metano
X1	[internal,real]	000D	0.002595	Fracción Molar de Nitrógeno
X2	[internal,real]	000F	0.005956	Fracción Molar de CO2
X3	[internal,real]	0011	0.018186	Fracción Molar de Etano
X4	[internal,real]	0013	0.004596	Fracción Molar de Propano
X5	[internal,real]	0015	0	Fracción Molar de H2O
X6	[internal,real]	0017	0	Fracción Molar de H2S
X7	[internal,real]	0019	0	Fracción Molar de Hidrógeno
X8	[internal,real]	001B	0	Fracción Molar de CO
X9	[internal,real]	001D	0	Fracción Molar de Oxígeno
X10	[internal,real]	001F	0.000977	Fracción Molar de i-Butano
X11	[internal,real]	0021	0.001007	Fracción Molar de n-Butano
X12	[internal,real]	0023	0.000473	Fracción Molar de n-Pentano
X13	[internal,real]	0025	0.000324	Fracción Molar de n-Pentano
X14	[internal,real]	0027	0.000664	Fracción Molar de n-Hexano
X15	[internal,real]	0029	0	Fracción Molar de n-Heptano
X16	[internal,real]	002B	0	Fracción Molar de n-Octano
X17	[internal,real]	002D	0	Fracción Molar de n-Nonano
X18	[internal,real]	002F	0	Fracción Molar de n-Decano
X19	[internal,real]	0031	0	Fracción Molar de Helio
X20	[internal,real]	0033	0	Fracción Molar de Argón
Densidad	[internal,real]	0035	0.65	Valor de la Densidad
Tf	[internal,real]	0037	30	Temperatura de flujo
Pf	[internal,real]	0039	13.74	Presión de flujo
Pdif	[internal,real]	003B	49.8	Presión Diferencial
u	[internal,real]	003D	0.010268	Permeabilidad
K	[internal,real]	003F	1.3	Coefficiente Isentrópico
dor	[internal,real]	0041	50.8	Diámetro del orificio
alfa1	[internal,real]	0043	1.665E-005	(no recuerdo esta propiedad)

Figura 39. Aplicación de ISaGRAF para Modbus TCP.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Con el fin de realizar un análisis comparativo de los resultados obtenidos con las diferentes aplicaciones implementadas, se realizó un resumen del comportamiento de cada aplicación por separado.

3. Aplicación para PC.

Los resultados de esta aplicación están registrados en las tablas 4, 8 y 11, para los cálculos de AGA8 utilizando el Método de Caracterización Detallada, el Método de Caracterización Aproximada, y los cálculos de AGA3, respectivamente.

Para el cálculo de los factores de compresibilidad utilizando el Método de Caracterización Detallada, se observa que en cada una de las muestras registradas los resultados se encuentran dentro del margen de error admitido por la norma para los valores de temperatura y presión bajo los cuales se han efectuado los cálculos. Sin embargo, se observa que los errores porcentuales con valores más elevados coinciden con las muestras tomadas a valores más elevados de presión. De una manera similar, pero menos pronunciada, ocurre con los valores elevados de temperatura. Estos resultados permiten comprobar el comportamiento mostrado en la figura 2 (ver página 17), donde se observa que a medida que aumentan los valores de presión y temperatura el margen de error permitido es considerablemente más amplio.

Respecto a las aplicaciones encargadas de los cálculos de AGA8 mediante el Método de Caracterización Aproximada y AGA3, se observa que los errores porcentuales son considerablemente bajos. Para estos cálculos, la norma no especifica

un límite de error, debido a que la incertidumbre de los cálculos depende de las precisiones de cada uno de los instrumentos de medición instalados en la tubería.

Otro aspecto de suma importancia de las aplicaciones para PC, consiste en la rapidez de sus cálculos. Para cada uno de los programas, incluso para aquéllos cuyos cálculos matemáticos involucran procesos iterativos complejos, como es el caso del Método de Caracterización Detallada para la norma AGA8, al ejecutar el comando para iniciar los cálculos (botón), éstos arrojan los resultados asociados a la norma calculada de manera inmediata. Esto obedece a la rapidez de procesamiento con la que cuentan los computadores personales, permitiendo así una rápida ejecución de operaciones de este tipo.

Adicionalmente, las aplicaciones para PC presentan una gran ventaja con respecto a las aplicaciones para ARM y PIC en cuanto al ambiente de trabajo, debido a que cuentan con una interfaz gráfica amigable para el usuario, en la cual se permite la selección e introducción de las variables de entrada de manera directa, es decir, utilizando la misma aplicación, indicando cada uno de los parámetros requeridos en cada cálculo. Sin embargo, estos programas no pueden ser conectados con otros equipos mediante un protocolo de comunicación, por lo que no cuenta con una sincronización entre una posible unidad remota y la aplicación del operador; los cálculos deben ser efectuados en el mismo equipo donde se introducen los datos, siendo éste un factor limitante para el caso en que deba colocarse un computador de flujo cercano a la ubicación de los medidores de los que provienen los datos, y pueda ser supervisado desde una unidad de control. Para el caso de este proyecto, tal y como se explicó anteriormente, la aplicación para PC fue hecha únicamente a manera de referencia, con el fin de comprobar de manera rápida y eficiente el correcto funcionamiento de los programas realizados.

4. Aplicación para ARM.

Respecto a los resultados obtenidos para AGA8, en cada uno de sus dos métodos, y para AGA3 en las aplicaciones para el ARM (ver tablas 5, 9 y 12), y al comparar con los resultados obtenidos en las aplicaciones para PC, se observa que los resultados son muy similares, incluso idénticos en la mayoría de los casos. Este comportamiento era el esperado para ambas aplicaciones, ya que el código encargado de efectuar los cálculos para generar los resultados es el mismo en ambos casos. Sin embargo se observan en algunos resultados pequeñas divergencias con los resultados obtenidos en las aplicaciones para PC. Estas pequeñas variaciones pueden ser generadas por las aplicaciones encargadas de la comunicación Modbus TCP, dicese las aplicaciones en ISaGRAf y en el simulador maestro ModScan; estos programas trabajan con una precisión para valores en punto flotante mucho menor (6 cifras significativas) que las aplicaciones de Visual Studio .Net (14 cifras significativas), y para el caso de la aplicación en el ARM, como ya se ha explicado, las variables de entrada son introducidas bien en el dispositivo maestro ModScan o bien sobre la aplicación en ISaGRAf. De esta forma, la menor exactitud en los valores de entrada para los cálculos de las normas AGA8 y AGA3 puede generar pequeñas desviaciones en los resultados de los cálculos, ya que utilizan menos cifras decimales.

En cuanto al tiempo de respuesta, en la aplicación de AGA8 que utiliza el Método de Caracterización Detallada los resultados de los cálculos son arrojados luego de aproximadamente un minuto y treinta segundos. A pesar de ser una aplicación más lenta, el tiempo que tarda en realizar los cálculos es aceptable para el uso al que está destinada. Por tratarse de un sistema de medición de gas contenido en un pozo petrolero, los cambios de temperatura y presión dentro de los mismos no ocurren de manera abrupta, por lo que el tiempo de respuesta de la aplicación no se considera un factor limitante. Para las aplicaciones de AGA8 utilizando el Método de Caracterización Aproximada y para la norma AGA3, a diferencia de la aplicación anterior, la solución de los cálculos es mostrada de manera inmediata.

5. Aplicación para PIC.

Para la aplicación del Método de Caracterización Detallada para el cálculo de factor de compresibilidad en el microcontrolador PIC, se observa que los resultados (Tabla 6) son menos precisos que para las aplicaciones anteriores, incluso, para algunos casos, el error porcentual sale de la región de incertidumbre admitida para los valores de temperatura y presión empleados para el Método de Caracterización Detallada (ver figura 2). Estos resultados que presentan mayor error porcentual coinciden con los valores de presión más elevados, principalmente cuando ésta sobrepasa los 3,78951 MPa (200 psi). También se debe resaltar que la velocidad del PIC para realizar el cálculo mediante el Método de Caracterización Detallada es considerablemente lenta, ya que tarda aproximadamente 4 minutos en mostrar el resultado una vez ingresados todos los datos. En los casos de las aplicaciones del Método de Caracterización Aproximada en el microcontrolador PIC (Tabla 10) y del cálculo de flujo másico de gas mediante AGA3 (Tabla 13), el tiempo de ejecución es inmediato; sin embargo los resultados obtenidos presentan un error porcentual sumamente elevado en comparación con las aplicaciones para PC y para el ARM.

6. Aplicación Modbus.

En la implementación de Modbus TCP, en el ARM, y de Modbus RTU, para la aplicación en el PIC, la comunicación entre el esclavo ARM y el maestro PC y entre el maestro PIC y el esclavo PC, se efectuó de manera óptima, ya que los datos introducidos desde PC, para ambos casos, fueron leídos correctamente por las aplicaciones (bien en ARM o en PIC), para luego ser procesados y generar los resultados de los cálculos, los cuales fueron recibidos correctamente en las aplicaciones en PC.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

En los sistemas de transferencia y custodia de gases hidrocarburos en la industria petrolera la exactitud de los cálculos es un factor fundamental para el buen funcionamiento de los procesos de transporte de gas y de explotación petrolera por medio de la inyección de gas en pozos de petróleo.

Las mejoras en las precisiones y la implementación de controles para las operaciones de almacenamiento, transporte, despacho y medición de gas, dan como resultado la confiabilidad en la operación, se optimizan las infraestructuras, se reducen las inconsistencias en la medición y el reporte de volúmenes con baja incertidumbre, reflejándose automáticamente en las economías de las empresas de transporte de gas multicomponente.

De las dos aplicaciones desarrolladas destinadas a la medición de gas en los pozos petroleros (ARM y PIC), puede concluirse lo siguiente:

- El ARM ofrece las características necesarias para el óptimo funcionamiento de aplicaciones de este tipo, pues cuenta con un procesador con una velocidad de procesamiento lo suficientemente rápida como para realizar los cálculos estipulados en las normas AGA3 y AGA8 y cumplir con los requerimientos de tiempo de cálculo impuestos las mismas. Además de esto, y gracias a que el ARM trabaja bajo ambiente Windows CE, la programación en este tipo de procesadores permite una gran precisión en los procedimientos matemáticos que involucran variables en formato de punto flotante (formato de 8 bytes), lo que asegura alta precisión en los resultados de los cálculos. Por estas razones,

la aplicación en el ARM es idónea para el problema planteado en este proyecto, ya que cumple con todos los lineamientos impuestos por la Asociación Americana de Gas (AGA) para la medición de factores de compresibilidad y de flujo de gas multicomponente.

- A pesar de los beneficios que ofrecen los microcontroladores PIC en cuanto a sus bajos costos y a su tamaño considerablemente reducido, los mismos no pueden ser usados en aplicaciones en las que el tiempo de respuesta sea necesariamente corto, principalmente en procedimientos que impliquen operaciones de cálculo con números en punto flotante, ya que estos dispositivos son fabricados para trabajar con un máximo de precisión de 4 bytes.

Una vez comprobada la confiabilidad de las aplicaciones desarrolladas en el ARM, pueden citarse los siguientes logros:

- ✓ Se asegura la precisión en los cálculos de factor de compresibilidad y flujo de gases hidrocarburos.
- ✓ Se reducen los costos de operación.
- ✓ Aumenta la eficiencia de los sistemas que requieren un flujo de gas controlado.
- ✓ Es posible supervisar desde un dispositivo maestro varios computadores de flujo, configurados como esclavos, conectados mediante un mismo protocolo de comunicación Modbus TCP.

La metodología de trabajo seguida en el presente proyecto puede ser empleada en diversas aplicaciones que requieran de la programación por etapas de determinados procedimientos. Para las aplicaciones desarrolladas, el uso de esta metodología permitió llegar a las siguientes conclusiones:

- A la hora de desarrollar cualquier programa, es importante la creación previa de los diagramas de flujo, ya que éstos consisten en la esquematización gráfica de un algoritmo y permiten hacer un seguimiento de los procedimientos necesarios para la solución de un problema.
- Para la fase de implementación de un programa debe hacerse un estudio previo de los posibles equipos donde pueda ser desarrollada la aplicación en cuestión. Las características principales a considerar consisten en la capacidad de memoria requerida, la velocidad de procesamiento del equipo, la complejidad de los cálculos matemáticos y procesos iterativos a ser programados, la necesidad de precisión de los resultados esperados, la cantidad de bytes con las que opera el equipo para todos los formatos de números utilizados en el algoritmo.
- Cuando el proyecto desarrollado presenta como producto final el resultado de una serie de cálculos, es importante tomar una muestra representativa de los rangos permitidos para cada una de las variables de entrada, a modo de asegurar que la aplicación abarca, con las precisiones adecuadas, las posibles condiciones bajo las cuales puede operar el sistema.
- El desarrollo de un protocolo de comunicación requiere de un estudio previo de las aplicaciones que ejecutan los dispositivos a ser conectados; es decir, es importante conocer el tiempo que tarda un dispositivo en hacer una petición o ejecutar una orden, de acuerdo a si está configurado como maestro o como esclavo, respectivamente, para así poder configurar los tiempos de espera entre preguntas del maestro y el tiempo que debe esperar el dispositivo maestro para asegurar que recibe la respuesta del esclavo. De esta forma, se asegura que no haya interrupciones en la comunicación.

RECOMENDACIONES

- Sustituir el microcontrolador PIC por microcontroladores que sean capaces de trabajar a una mayor frecuencia de operación y que presenten mayor precisión en los números con formato de punto flotante.
- Integrar en los sistemas de medición de volumen de gas sistemas de cromatografía en línea, de forma de obtener los valores de composición de gas en el campo, ya que actualmente la composición de gas es obtenida llevando muestras de gas a laboratorios.
- Desarrollar e implementar para el computador de flujo la norma AGA 10 (Medición de la Velocidad del Sonido en Gases Naturales y en Gases Hidrocarburos) y la norma AGA 7 (Medición de Gas Natural por Medio de Turbinas).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Robert H. Perry, "PERRY'S CHEMICAL ENGINEERS' HANDBOOK", Estados Unidos de Norte America, McGraw-Hill Book Company, 1984, 5ta edición.
- [2] AGA Report No. 8. Compressibility Factors of Natural Gas and Other Related Hydrocarbon Gases. Catalog No. XQ9212. American Gas Association. Second Edition, November 1992.
- [3] AGA Report No. 3. Orifice Metering of Natural Gas and Other Related Hydrocarbon Fluids. Parts 1, 2, 3, 4. American Gas Association, Third Edition, October 1992.
- [4] Sistemas Embebidos. <<http://elserver.forknet-ar.org>>. <<http://www.nmielectronics.com/ProductoEmbebido.htm>>. <http://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_integrado>. [Consulta 04/2007].
- [5] Computador de flujo <www.telvent.com>, <<http://www.omniflow.com>>. [Consulta 04/2007].
- [6] ARM y Strong ARM <<http://www.arm.com>>. <<http://es.wikipedia.org/wiki/ARM>>. [Consulta 04/2007].
- [7] Microchip. <<http://www.microchip.com>> [Consulta 05/2007].
- [8] MODBUS-IDA. <<http://www.modbus.org/faq.php>> [Consulta 05/2007].

BIBLIOGRAFÍA

- AGA Report No. 8. Compressibility Factors of Natural Gas and Other Related Hydrocarbon Gases. Catalog No. XQ9212. American Gas Association. Second Edition, November 1992.
- AGA Report No. 3. Orifice Metering of Natural Gas and Other Related Hydrocarbon Fluids. Parts 1, 2, 3, 4. American Gas Association, Third Edition, October 1992.
- Chuck Hellebuyck. Programming PIC Microcontrollers with PicBasic, Estados Unidos de Norte America, Editorial: Newnes, 2002.
- Evangelos Petroustos and Richard Mansfield. Visual Basic .Net Power Tools, Estados Unidos de Norte America, Editorial: Sybex, 2004.
- Steven Holzner. Visual Basic .NET Black Book, Estados Unidos de Norte America, Editorial: Paraglyph Press, 2002.
- Herbert Schildt, Programación en Turbo C. España, Editorial: McGraw-Hill, 1989.
- José M. Angulo, Microcontroladores PIC Diseño Práctico de Aplicaciones. España, Editorial: McGraw-Hill, Tercera Edición, 2003.
- Don Morgan. Numerical Methods Real-Time and Embedded Systems Programming. Estados Unidos de Norte America, Editorial: M&T Books, 1992.

- Intel.
<<http://www.intel.com/design/pca/products/pxa255/techdocs.htm#manuals>>
[Consulta: 06/2006].
- American Gas Association. <<http://www.aga.org>> [Consulta: 11/2006].
- IEEE-754 Floating-Point Conversion. < <http://babbage.cs.qc.edu/IEEE-754/Decimal.html>> [Consulta: 04/2007].
- Modbus Application Protocol Specification V1.1. MODBUS-IDA
<<http://www.modbus-ida.org>> [Consulta: 05/2007].
- Modbus RTU Serial Communications User Manual. Honeywell.
<<http://www.honeywell.com/imc>> [Consulta: 05/2007].

GLOSARIO

- CompactFlash(CF): *Fue originalmente un tipo de dispositivo de almacenamiento de datos, usado en dispositivos electrónicos portátiles. Como dispositivo de almacenamiento, suele usar memoria flash en una carcasa estándar. Los dispositivos de memoria flash son no volátiles y semiconductores, por lo que son más robustos que las unidades de disco, y consumen alrededor del 5% de la energía que necesitan las unidades de disco pequeñas, y todavía tienen velocidades de transferencia de 20 MByte/s de escritura y 20MByte/s de lectura.*
- RS232: *Recommended Standard 232. Es una interfaz que designa una norma para el intercambio serie de datos binarios.*
- RS485: *Recommended Standard 485. Sistema en bus de transmisión multipunto diferencial, es ideal para transmitir a altas velocidades sobre largas distancias.*
- MOS 6502: *El MOS 6502 o MOS Technology 6502 fue un microprocesador de 8 bits diseñado por MOS Technology en 1975. El 6502 es un procesador de 8 bits con un bus de dirección de 16 bits. La lógica interna corre a la misma velocidad que la frecuencia del reloj externo, pero las aparentemente lentas velocidades de reloj de típicamente 1 MHz eran realmente competitivas con otros CPUs corriendo cuatro veces más rápido porque el 6502 era un procesador estático.*

Ethernet:

Es el nombre de una tecnología de redes de computadoras de área local (LAN) basada en tramas de datos. Ethernet define las características de cableado y señalización de nivel físico y los formatos de trama del nivel de enlace de datos del modelo OSI.

ISaGRAF:

Es un ambiente de software de control que permite crear sistemas de control locales o dispersos. Ofrece una combinación de un motor de control robusto y altamente portátil (Máquina Virtual) y un ambiente de desarrollo de aplicación intuitivo (Workbench).

Lenguaje de Programación BASIC:

El lenguaje BASIC es una familia de lenguajes de programación. Fue originalmente ideado como una herramienta de enseñanza, se diseminó entre los microcomputadores caseros en la década de 1980, y sigue siendo popular hoy en día en muchos dialectos bastante distintos del original.

BASIC es el acrónimo de Beginners All-purpose Symbolic Instruction Code ó código de instrucciones simbólicas de propósito general para principiantes y está ligado al nombre de un trabajo sin publicar del coinventor del lenguaje, Thomas Kurtz.

Lenguaje de Programación Visual Basic:

Visual Basic es un lenguaje de programación desarrollado por Alan Cooper para Microsoft. El lenguaje de programación es un dialecto de BASIC, con importantes añadidos. Su primera versión fue presentada en 1991 con la intención de simplificar la programación utilizando un ambiente de desarrollo completamente gráfico que facilitara la creación de interfaces gráficas y en cierta medida también la programación misma.

Lenguaje de Programación Visual Basic.NET:

Visual Basic.NET (VB.NET) es una versión de Visual Basic enfocada al desarrollo de aplicaciones .NET. El lenguaje de programación es Visual Basic, que apareció en el año 1991 como una evolución del QuickBasic que fabricaba Microsoft.

Es un lenguaje de programación orientado a objetos, y como novedades más importantes en la versión .NET, podemos citar la posibilidad de definir ámbitos de tipo, clases que pueden derivarse de otras mediante herencia, sobrecarga de métodos, nuevo control estructurado de excepciones o la creación de aplicaciones con múltiples hilos de ejecución, además de contar con la extensa librería de .NET, con la que es posible desarrollar tanto aplicaciones para Windows y Web Forms, así como un extenso número de clientes para bases de datos.

Lenguaje de Programación C:

C es un lenguaje de programación creado en 1969 por Ken Thompson y Dennis M. Ritchie en los Laboratorios Bell como evolución del anterior lenguaje B, a su vez basado en BCPL. Es un lenguaje orientado a la implementación de Sistemas Operativos, concretamente Unix. C es apreciado por la eficiencia del código que produce y es el lenguaje de programación más popular para crear software de sistemas, aunque también se utiliza para crear aplicaciones.

Se trata de un lenguaje débilmente tipado de medio nivel pero con muchas características de bajo nivel. Dispone de las estructuras típicas de los lenguajes de alto nivel pero, a su vez, dispone de construcciones del lenguaje que permiten un control a muy bajo nivel. Los compiladores suelen ofrecer extensiones al lenguaje que posibilitan mezclar código en ensamblador con código C o acceder directamente a memoria o dispositivos periféricos.

ModScan:

ModScan es una herramienta diseñada y desarrollada para programadores de PLCs e ingenieros SCADA. Su entorno permite, mediante una conexión cable serie y/o de red, escanear y establecer un nuevo conducto de comunicación con todo tipo de autómatas programables y herramientas de gestión visual.

ModSim:

ModSim es una herramienta diseñada y desarrollada para programadores de PLCs e ingenieros SCADA. Su entorno permite, mediante una conexión serial emular un dispositivo esclavo Modbus TCP.