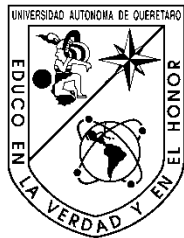


**MEJORA DE UN SENSOR BASADO EN LA DIFERENCIA DE DILUCIÓN DE GASES
EN AGUA PARA LA MEDICIÓN DE LA FRACCIÓN DE METANO CONTENIDO EN
UN FLUJO DE BIOGÁS GENERADO EN UN PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA**

2012

RAÚL OMAR CADENA PEREDA



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
Facultad de Ingeniería

**MEJORA DE UN SENSOR BASADO EN LA DIFERENCIA DE
DILUCIÓN DE GASES EN AGUA PARA LA MEDICIÓN DE LA
FRACCIÓN DE METANO CONTENIDO EN UN FLUJO DE BIOGÁS
GENERADO EN UN PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA**

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

**Doctor en Ingeniería en
Instrumentación y Mecatrónica**

Presenta

Raúl Omar Cadena Pereda

Santiago de Querétaro, Qro. A 22 de Junio de 2012



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Doctorado en Ingeniería en Instrumentación y Mecatrónica

MEJORA DE UN SENSOR BASADO EN LA DIFERENCIA DE DILUCIÓN DE GASES EN AGUA
PARA LA MEDICIÓN DE LA FRACCIÓN DE METANO CONTENIDO EN UN FLUJO DE
BIOGÁS GENERADO EN UN PROCESO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Doctor en Ingeniería

Presenta:

M. en C. Raúl Omar Cadena Pereda

Dirigido por:

Dr. Eric Mauricio Rivera Muñoz

SINODALES

Dr. Eric Mauricio Rivera Muñoz

Presidente

Firma

Dr. Rufino Nava Mendoza

Secretario

Firma

Dr. Ibrahim Serroukh Jibari

Vocal

Firma

Dr. Roberto Augusto Gómez Loenzo

Suplente

Firma

Roque Alfredo Osornio Ríos

Suplente

Firma

Dr. Aurelio Domínguez González
Director de la Facultad de Ingeniería

Dr. Inés Torres Pacheco
Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Junio de 2012
México

RESUMEN

Este trabajo presenta el desarrollo de un medidor de flujo de biogás para un proceso de digestión anaerobia, así como de un sensor de la fracción de metano contenida en el flujo de biogás. Dicho trabajo se encuentra dividido en ocho partes principales que son: etapa de medición de flujo de gas, etapa de separación de gases, etapa de adquisición y distribución de datos, comunicación con la computadora, comunicación con ADCs, comunicación con DACs, y la etapa de dispositivos para poder probar el sensor como son un controlador PID digital y un reactor de digestión anaerobia. Como objetivos se logro diseñar, construir y probar un sensor complejo para la medición de la fracción de metano contenida en un flujo de biogás generado en un proceso de digestión anaerobia. Esto dividido en objetivos particulares que son diseñar los diversos componentes e interconexiones entre los mismos que integran el sensor, así como los sistemas necesarios de obtención y/o repartición de datos, transformación y comunicación. Construir y ensamblar los diversos componentes antes mencionados. Probar el sensor en un proceso real. Esto basado en la hipótesis de que la diferencia en solubilidad en agua del metano y del bióxido de carbono es un principio que permite la separación eficiente de estas especies en una mezcla, por lo que, si la mezcla es desconocida se puede conocer la fracción de ambos gases en dicha mezcla. El principal aporte de esta investigación, es la utilización del principio de diferencia de dilución en agua del metano y del bióxido de carbono para poder conocer la fracción de metano en un flujo de biogás. Un aporte secundario fue el diseño e implementación de un sistema de adquisición y distribución de datos en el sensor, así como de un controlador PID digital, cuya implementación se basa en un FPGA. Esta investigación nos permitió además, el poder desarrollar un sensor de construcción sencilla y sin la utilización de materiales especiales, o difíciles de adquirir.

(Palabras clave: biogás, anaerobia, sensor, metano, FPGA, dilucion)

SUMMARY

This work presents the development of a biogas flow meter applied in an anaerobic digestion process, including a sensor of methane fraction contained in biogas. Which work is divided in eight main sections which are: gas flow measurement, gas separation, data acquisition and data distribution, computer communication, ADCs interface, DACs interface, and complementary devices to test the sensor as a digital PID and anaerobic digestion reactor. The objectives reached are, design, build, and test a complex sensor to measure methane fraction of a biogas flow generated in anaerobic digestion process. All this is divided in separated objectives as design the variety of components and interconnections among them, all these forming the sensor, and the complementary systems to get or give data, transformation and communication. Build and join the various components before described. Test the sensor in a real process. All this based in the next assumption: the water solubility difference between methane and carbon dioxide, is an efficient way to separate this two species if mixed, if the mix is unknown you can know the fraction of each one contained in the mix. The main relevance of this investigation, is the using the principle of water solubility difference of methane and carbon dioxide, in order to know the methane fraction contained in a biogas flow. A secondary issue is the design and implementation of a data acquisition system in the sensor, as a digital PID controller, which implementation was realized using an FPGA. This research, give us the opportunity to develop an easy-to-build sensor and without applying specialized or hard-to-find materials.

(Key words: biogas, anaerobic, sensor, methane, FPGA, dilution)

A Raúl Cadena Navarro, por inculcarme el amor por el estudio, el trabajo y las ganas de superarme.

A Fabiola Esperanza Terrazas Rojas, por todo tu amor, respeto, aceptación, compañía, apoyo, y gran interés en todo lo que yo soy.

A Oliver Yonhari Cadena Pereda, por tu apoyo incondicional en cada paso que doy.

A Claudia Pereda Trejo Por su apoyo y guía en momentos difíciles.

If you have a talent, use it in every which way possible. Don't hoard it. Don't dole it out like a miser. Spend it lavishly like a millionaire intent on going broke.

Brendan Francis

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, por haber estado conmigo en mis momentos más difíciles.

Al Dr. Gilberto Herrera Ruiz, por su apoyo, guía, y visionarios consejos.

Al Dr. Eric Mauricio Rivera Muñoz, por su apoyo, guía, aliento y consejos.

A todas las personas que han estado, están, y estarán en mi vida, porque gracias a todos ustedes, yo he crecido.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por becarme.

ÍNDICE GENERAL

	Pág
RESUMEN	i
SUMMARY	ii
DEDICATORIAS	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
ÍNDICE GENERAL	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE TABLAS	ix
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes	2
1.2. Planteamiento del problema	4
1.3. Hipótesis	5
1.4. Objetivos	5
1.5. Justificación	6
2. REVISIÓN BIBLIOGRAFICA	11
2.1. Generación de biogás en el proceso de digestión anaerobia	12
2.2. Instrumentación y sensores	13
2.3. Principio de medición	16
2.4. Actuadores para el control de temperatura	16
2.5. Sensores de medición de flujo de gas	17
2.6. Conversión de datos y acondicionamiento de señales	19
2.7. Procesamiento digital de señales	20
2.8. Procesamiento de señales en hardware	21
3. METODOLOGIA	25
3.1. Cálculos de las características del dispositivo	25
3.1.1. Calculo de moles de agua para la dilución de muestra	26
3.1.2. Calculo de dilución de muestra	27
3.1.3. Calculo de moles de gases disueltos en la regeneración	32
3.1.4. Calculo de ingreso de energía al sistema	34
3.1.5. Calculo de intercambiador de calor	35
3.1.6. Calculo de celda termoeléctrica	38
3.1.7. Filtrado analógico anti-solapamiento	44
3.1.8. Etapa de comunicación con la computadora	48
3.1.9. Conversión de datos	49
3.1.10. Control PID de temperatura	50
3.1.11. Sistema digital de control, calculo de moles y linealización polinomial	52
3.1.12. Evaluación de precisión y exactitud	54
4. RESULTADOS	58
4.1. Desarrollo del prototipo	59
4.1.1. Calculo de moles de agua para dilución de muestra	64
4.1.2. Calculo de dilución de muestra	64

4.1.3. Calculo de moles de gases disueltos en la regeneración	66
4.1.4. Calculo de ingreso de energía al sistema	69
4.1.5. Calculo de intercambiador de calor	70
4.1.6. Calculo de celda termoeléctrica	72
4.1.7. Filtrado analógico anti-solapamiento	72
4.1.8. Etapa de comunicación con la computadora	74
4.1.9. Conversión de datos	81
4.1.10. Control PID de temperatura	89
4.1.11. Sistema digital de control y calculo de moles	93
4.2. Evaluación funcional	97
4.2.1. Análisis de la diferencia de dilución de especies gaseosas en agua	100
4.2.2. Actuador para el control de temperatura basado en dispositivos termoeléctricos	101
4.2.3. Procesador de señales en hardware	101
4.2.4. Prototipo	102
4.3. Discusión	102
4.3.1. Calculo de diferencia de dilución de especies gaseosas en agua	103
4.3.2. Procesamiento de señales en hardware	104
4.3.3. Prospectivas	104
4.4. Conclusiones	105
REFERENCIAS	107
A. DIAGRAMAS ELECTRONICOS, Y PROTOTIPOS	112
A.1. Etapa de adquisición analógica	113
A.2. Etapa de distribución analógica	115
A.3. Etapa de fuente de alimentación	117
B. PROGRAMAS EN C, Y EN VHDL	119
B.1. Listado de programas en VHDL del sistema de control	119
B.2. Listado de programas en C++ del sistema de control	134
C. PUBLICACIONES	147

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Pág
1.1.	Volumen de producción de carne de cerdo en toneladas por estado, estimado nacional = 1, 029,955 toneladas (SIAP, 2004).	7
3.1.	Sección transversal de perforación en material de intercambiador.	37
3.2.	Área transversal ocupada por las tres perforaciones adyacentes.	38
3.3.	Vista superior del intercambiador de calor y sus perforaciones.	38
3.4.	Diagrama general de una celda termoeléctrica instalada.	39
3.5.	Banda base de filtro anti alias.	45
3.6.	Topología de implementación de filtro de segundo orden Sallen-Key.	47
3.7.	Forma de onda lógica serial TTL/CMOS.	49
3.8.	Diagrama de sistema de muestreo y distribución de datos.	50
3.9.	Esquema de control PID.	51
4.1.	Esquema del dispositivo desarrollado.	59
4.2.	Grafica del estado inicial y final de la cantidad de moles de CO ₂ en la muestra gaseosa.	65
4.3.	Grafica del estado inicial y final de la cantidad de moles de CH ₄ en la muestra gaseosa.	66
4.4.	Se muestran siete graficas de la respuesta del modelo matemático con diferentes cantidades de liquido de absorción en moles, donde: CH ₄ _0 con 0 moles, CH ₄ _2 con 2 moles, CH ₄ _4 con 4 moles, CH ₄ _5.148 con 5.148 moles, CH ₄ _6 con 6 moles, CH ₄ _8 con 8 moles, y CH ₄ _10 con 10 moles, además de la grafica IDEAL, la cual muestra la respuesta perfecta.	68
4.5.	Conjunto de paquetes que integran la recepción serial en el caso de una escritura hacia la tarjeta Spartan-3.	75
4.6.	Bloque de recepción serial.	75
4.7.	Diagrama interno del bloque de recepción de serial.	76
4.8.	Maquina finita de estados del bloque de recepción serial.	77
4.9.	Bloque de transmisión serial.	78
4.10.	Diagrama interno del bloque de transmisión serial.	78
4.11.	Maquina finita de estados del bloque de transmisión serial.	79
4.12.	Bloque del generador de direcciones.	80
4.13.	Conexión paralela y serial de los elementos que componen el sistema.	80
4.14.	Conjunto de paquetes que integran la configuración del intervalo de voltaje de entrada en los ADCs.	82
4.15.	Bloque que establece comunicación con los ADCs.	83
4.16.	Diagrama interno del bloque que establece comunicación con los ADCs.	84
4.17.	Maquina finita de estados del bloque que establece comunicación con los ADCs.	85
4.18.	Sub-maquina finita de estados que es llamada por la máquina de estados principal en la comunicación con los ADCs.	86

4.19.	Bloque que establece comunicación con los DACs.	87
4.20.	Diagrama interno del bloque que establece comunicación con los DACs.	88
4.21.	Maquina de estados finita del bloque que establece comunicación con los DACs.	89
4.22.	Bloque que conforma el controlador PID digital.	90
4.23.	Bloque que conforma el controlador PID digital.	91
4.24.	Diagrama de bloques de controlador PID digital.	92
4.25.	Esquema del modulo de filtro promediador.	93
4.26.	Maquina de estados finita que coordina al sensor.	94
4.27.	Modulo que compone el contador de diez segundos.	95
4.28.	Esquema del sistema de generación de mezcla.	95
4.29.	Esquema del contador de 20 minutos.	96
4.30.	Esquema de sistema de cálculo de moles.	96
4.31.	Se muestran cinco graficas de las respuestas del dispositivo experimental hechas en diferentes días, las cuales son Corrida 1 a Corrida 5, además de la grafica de la respuesta del modelo matemático con 4 moles de líquido de absorción (CH ₄ _4) y una grafica de las muestras de calibración empleadas.	98
4.32.	Se muestran cinco graficas de los datos experimentales después de linealización polinomial, las cuales son Corr_Lin 1 a Corr_Lin 5, además de la grafica del modelo matemático con 4 moles de líquido de absorción y la grafica de las muestras de calibración utilizadas.	99

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla		Pág
1.1.	Recursos presentes en los desechos porcinos de una explotación de crecimiento y engorda.	8
3.1.	Acciones de control llevadas a cabo por el sistema de control.	53
4.1.	Dimensiones de intercambiador de calor diseñado.	71
4.2.	Datos obtenidos del cálculo de la celda termoeléctrica.	72
4.3.	Valores de resistencias de filtrado analógico.	74
4.4.	Dirección de registros de configuración de los parámetros del PID.	90
4.5.	Datos estadísticos obtenidos de las corridas del dispositivo.	98

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se presenta una introducción al proceso de digestión anaerobia, un análisis de la necesidad de esta tecnología dentro del entorno pecuario mexicano y además, se destaca la cabida e importancia del trabajo realizado. Se muestran también la hipótesis y los objetivos del trabajo doctoral.

Otro aspecto importante del desarrollo del presente trabajo es el establecimiento metodológico para llevar a cabo la realización física de un prototipo confiable y reproducible, cuyas tolerancias intrínsecas sean mantenidas dentro de un margen permisible sin que lleguen a afectar el desempeño final del sistema y que, además, mantengan el bajo costo de producción del sistema. Estas restricciones orientan de manera puntual el planteamiento de la solución donde, si bien los márgenes de elección se encuentran restringidos, aun existen varios grados de libertad de acción para elegir el mecanismo de procesamiento de señales adecuado a la solución del problema.

El desarrollo del proyecto tiene dos aspectos importantes: por un lado se tiene el proceso de sensado, mismo que fue diseñado y construido por completo; y por otro lado se tiene la unidad de procesamiento digital de señales, misma que ha sido desarrollada para presentar una solución específica y al mismo tiempo mantener bajos los costos de producción, lo cual se logra sustituyendo la capacidad de cómputo general, como pueden ser los sistemas DSP (Digital Signal Processor, procesador digital de señales), por procesadores específicos mediante el diseño de las unidades aritméticas y procesadores a nivel de compuerta lógica, proceso que resulta en un sistema muy económico. Si bien el desarrollo de este último no es trivial, es una de las partes fundamentales del presente trabajo.

1.1. Antecedentes

La digestión anaerobia es un proceso natural que convierte biomasa en energía. La biomasa es cualquier material orgánico proveniente de plantas, animales o sus desechos. El proceso de digestión anaerobia ha sido utilizado por cerca de 100 años para estabilizar aguas residuales municipales y una gran variedad de residuos industriales. La mayoría de las plantas municipales de tratamiento de aguas residuales utilizan la digestión anaerobia para convertir desechos sólidos en biogás. Este proceso anaerobio remueve una gran cantidad de componentes aromáticos, reduciendo significativamente los patógenos presentes en la suspensión resultante (Lusk, 1995; Wilkie, 2000a; Wilkie, 2000b). Durante los últimos 25 años, diversos procesos de digestión anaerobia han sido desarrollados y aplicados a una amplia variedad de residuos industriales y agrícolas (Speece, 1996), (Ghosh, 1997). Es un proceso de tratamiento de desechos frecuentemente escogido debido a su producción de energía (en forma de gas combustible metano contenido en el biogás), misma que puede ser transportada en tanques cerrados relativamente pequeños. Los productos de la digestión anaerobia como son el biogás y los abonos orgánicos estabilizados, tienen valor en el mercado y pueden ser comercializados con el fin de reducir los costos del tratamiento (Roos, 1991).

La digestión anaerobia provee una gran variedad de beneficios; entre los cuales se encuentran los beneficios ambientales y éstos pueden incluir una significativa reducción (o incluso eliminación) de olores; una reducción significativa del desarrollo de moscas; puede producirse líquido relativamente claro para aplicarlo con fines de riego; una reducción significativa de patógenos en los productos líquidos y sólidos; una reducción en las emisiones de gas de efecto invernadero como CO y CO₂, etc.. Desde el punto de vista económico provee beneficios adicionales, ya que el tiempo empleado en desplazar, manipular y procesar las excretas se minimiza; se produce biogás, el cual puede ser empleado para generar electricidad y/o calentar al ser utilizado como combustible; el calor residual puede ser empleado con el fin de alcanzar los requerimientos de temperatura de la actividad pecuaria; la concentración de nutrientes en un volumen relativamente reducido, para ser transportado del lugar de tratamiento, puede

reducir el área de terreno requerida para la aplicación líquida del residuo; puede producirse fertilizante concentrado para su venta al público; se pueden tener ingresos por el procesamiento de residuos importados, la venta de nutrientes orgánicos, créditos por gases de efecto invernadero, y la venta de energía; si se genera energía eléctrica, la potencia generada es potencia distribuida, lo cual minimiza la necesidad de modificar la red eléctrica.

El proceso de digestión anaerobia consiste en una serie de eventos llevados a cabo por bacterias cuyo fin es convertir componentes orgánicos en metano, dióxido de carbono, y nuevas células bacterianas. Estos eventos son comúnmente considerados como un proceso de tres etapas. La primer etapa del proceso involucra la hidrólisis de sólidos (residuos particulados y coloidales), la cual resulta en la producción de componentes orgánicos solubles simples (ácidos volátiles y alcoholes). La segunda etapa del proceso, la acetogénesis, involucra la conversión de los ácidos volátiles y de los alcoholes en sustancias tales como ácido acético o acetato (CH_3COOH) y gas hidrógeno, el cual puede ser utilizado por las bacterias que producen metano. La tercera y última etapa del proceso, la metanogénesis, involucra la producción de metano y dióxido de carbono (Gerardi, 2003).

Para poder llevar a cabo cualquier clase de control durante el proceso, se debe de contar con sensores que proporcionen información sobre la planta a controlar. El propósito de un sensor es responder a algún tipo de propiedad física de entrada (estímulo) y convertirla en una señal eléctrica que sea compatible con circuitos electrónicos. Se podría decir que un sensor es un traductor de un valor generalmente no eléctrico a un valor eléctrico. Cuando se dice “eléctrico”, se hace referencia a una señal que puede ser canalizada, amplificada, y modificada por medio de dispositivos electrónicos. La señal de salida del sensor puede ser en forma de voltaje, corriente o carga. Esto puede ser descrito en términos de amplitud, frecuencia, fase o código digital. Este conjunto de características es llamado *formato de la señal de salida*. Por lo tanto, un sensor cuenta con propiedades de entrada (de cualquier clase) y propiedades eléctricas de salida (Fraden, 2004).

1.2. Planteamiento del problema

La utilización eficiente del proceso de digestión anaerobia implica un control estricto de las variables de operación que intervienen en el proceso, así como un conocimiento adecuado sobre la microbiología involucrada debido a que éstas se pueden volver inestables bajo ciertas circunstancias. Disturbios como variaciones en las condiciones de operación pueden llevar a una desestabilización del proceso junto con la acumulación de componentes intermedios tóxicos, dando como resultado la eliminación de la biomasa y la necesidad de varias semanas o meses para la recuperación del reactor. Durante este periodo ningún tratamiento puede ser realizado por la unidad (Steyer, 2002).

El proceso de digestión anaerobia tiene como resultado la producción de una mezcla de gases; colectivamente, estos gases son referenciados como biogás. Los gases producidos en mayor cantidad son metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2). En volumen, el metano se encuentra en una concentración de entre 60% y 65%, y el dióxido de carbono entre un 35% y un 40%. El volumen, tasa de producción, y composición del biogás producido son indicativos del desempeño del digestor. Un intervalo aceptable o normal de producción de biogás es de 0.6242 a $1.5607 \text{ m}^3 \cdot \text{Kg}^{-1}$ (10 a $25 \text{ ft}^3 \cdot \text{lb}^{-1}$) de sólidos volátiles suspendidos destruidos ó 0.4 a $0.6 \text{ dm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ de demanda química de oxígeno convertidos a una temperatura de 35°C . Un decremento en el volumen de biogás, tasa de producción de biogás, o porcentaje de metano en la composición son indicadores tempranos de la falla del digestor. La producción de metano es mucho más representativa que la producción de biogás debido a que sólo la producción de metano representa la degradación final de componentes orgánicos (Gerardi, 2003).

En el Laboratorio de Biotrónica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, se construyó un prototipo, cuyo fin principal, fue el de crear experiencia y conocimiento sobre la aplicación de la diferencia de dilución de distintas especies gaseosas en agua como principio de medición. Con el fin de ampliar el conocimiento generado sobre este principio de medición, y poder contar con una alternativa confiable para el monitoreo de la dinámica de la fracción de metano contenida

en biogás generado en un reactor de digestión anaerobia, con el apoyo de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, el actual trabajo presenta la mejora de un sensor basado en la diferencia de dilución de gases en agua para la medición de la fracción de metano contenido en un flujo de biogás generado en un proceso de digestión anaerobia. Dicho trabajo se encuentra dividido en tres etapas principales que son: diseño, construcción y prueba del actuador para el control de temperatura; diseño, construcción y prueba de la etapa de medición, absorción y regeneración; diseño, descripción y síntesis del sistema digital de procesamiento de datos, control y comunicación. En cada una de dichas etapas, se describe la metodología utilizada para el diseño, construcción y pruebas correspondientes. Asimismo, se hace una identificación de las diferentes partes que conforman cada etapa, así como sus respectivas interacciones, hasta llegar al dispositivo completo.

1.3. Hipótesis

La diferencia de solubilidad de metano y de dióxido de carbono en agua es un principio que permite la separación eficiente de estas dos especies de una mezcla, por lo que, si la cantidad de las dos especies en la mezcla es desconocida, un sensor basado en este principio, puede proporcionar una medida cuantitativa muy aproximada de la fracción de metano, y por ende, del dióxido de carbono contenidos en dicha mezcla.

1.4. Objetivos

El principal objetivo del presente trabajo de investigación consiste en el rediseño, redimensionado, reconstrucción, puesta en marcha y caracterización de un sistema para la medición de la fracción de metano en un flujo de biogás, el cual sea generado en un proceso de digestión anaerobia, utilizando el principio físico de diferencia de dilución de distintas especies gaseosas en agua y utilizando, además, técnicas de

procesamiento digital de señales con el desarrollo integral de los sistemas digitales. El sistema a desarrollar se puede ver como un accesorio empotrado en el reactor de digestión anaerobia, que se encargue de tomar muestras y de realizar los análisis numéricos de extracción de información y procesamiento, proporcionando una salida única con la medición de la fracción de metano. Esta salida puede ser utilizada para monitoreo o para tomar acciones predictivas y correctivas durante el proceso de digestión anaerobia. Así mismo se debe de contar con una interfaz para conectarse a un sistema de cómputo central donde se tenga toda la información del proceso y se pueda llevar a cabo la estadística del mismo.

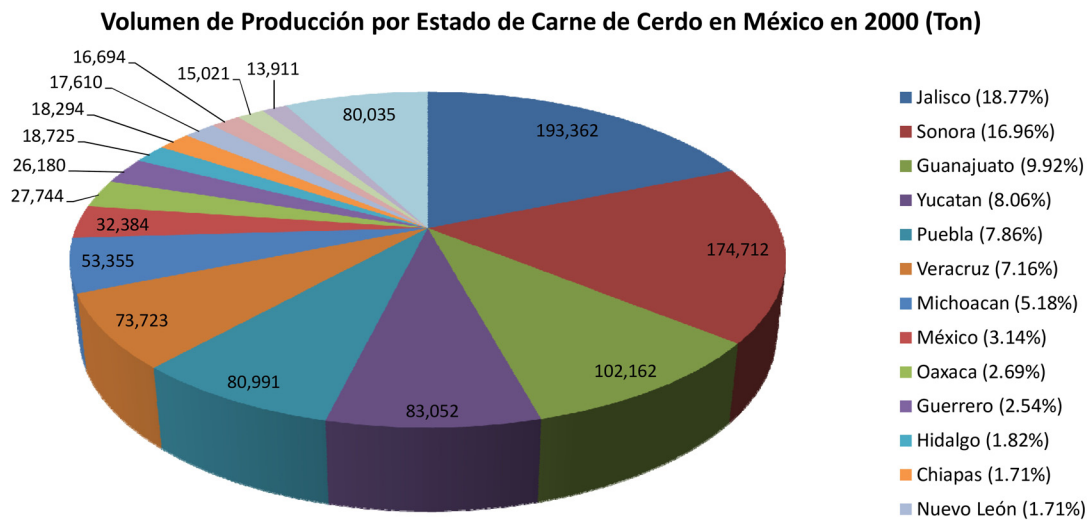
Otros objetivos incluyen:

- Realizar los cálculos necesarios para el dimensionamiento y optimización de las capacidades de los diversos componentes del dispositivo.
- Reducir las dimensiones del dispositivo para incrementar su portabilidad.
- Caracterizar el dispositivo para la obtención de sus parámetros como sensor.

1.5. Justificación

En México, la producción porcina ha jugado un papel fundamental dentro del abasto de carne, en la década de los 90's la oferta de carne de cerdo creció a una tasa anual de 3.5% para ubicarse al final de la década en 1,029,955 ton por año, lo que la colocó como la tercer carne de importancia de consumo en México (INIFAP, 2000). Este incremento en la producción ha ido emparejado a un incremento en el tamaño de las granjas porcinas, el INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática) indica, a través de los resultados del Censo Agrícola – Ganadero de 1991, que en el país existían 1,963,000 unidades de producción porcina. Las granjas con explotaciones de menos de 20 cabezas (99% del total) contaban con el 52% de la población porcina del país, mientras que el 1% de las granjas contabilizaban el 48% del inventario. Esta situación trajo como consecuencia un aumento en la capacidad contaminante de las

granjas porcinas, sobre todo en regiones del país que presentan una alta densidad de población porcina; la porcicultura en México, independientemente de ser practicada en todo el país, muestra una gran concentración en pocas entidades, donde la operación de grandes grupos de productores y empresas permite ofertar grandes volúmenes de carne para el abasto interno e inclusive para la exportación, de tal forma que el 68.7% de la producción nacional es generada en 6 entidades del país: Jalisco, Sonora, Guanajuato, Yucatán, Puebla y Veracruz, (INIFAP, 2000) (Figura 1.1).



Sistema de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), SAGARPA

Figura 1.1. Volumen de producción de carne de cerdo en toneladas por estado, estimado nacional = 1,029,955 toneladas (SIAP, 2004).

Ahora bien, puede decirse que un contaminante es un recurso en el lugar equivocado (Living Water, 1996). Los residuos que resultan de la explotación porcina poseen energía, materias orgánicas y nutrientes, que pueden ser utilizados y se pierden en el proceso. Con esta idea en mente se puede determinar que la contaminación aparece como resultado de un proceso ineficiente o incompleto que no utiliza de manera apropiada los recursos que posee o que genera.

Tomando en cuenta lo anterior, y como muestra del aprovechamiento de uno de esos recursos generados como resultado de la explotación porcina, cabe destacar que los tratamientos anaeróbicos permiten la obtención de biogás, importante producto

energético, a la vez que mejoran o mantienen el poder fertilizante de las excretas. La integración de la producción porcícola a cultivos agrícolas o pasturas permite aprovechar de manera eficiente dicho poder fertilizante. De esta forma, en lugar de considerar los desechos porcinos como un problema, se pueden mirar como una fuente de recursos útiles en la producción agropecuaria. Tomando el caso hipotético de 100 cerdos de 50 kg de peso promedio, en la Tabla 1.1 se muestran los productos que se podrían obtener si el estiércol es adecuadamente utilizado (Chará, 2000).

Tabla 1.1. Recursos presentes en los desechos porcinos de una explotación de crecimiento y engorda.

Producto	Tasa de producción	Producción diaria por 100 cerdos	Producción anual por 100 cerdos	Equivalente
Biogás (m ³)	0.69-1.02 m ³ ·kg ⁻¹ de Materia Seca*	25.9-38.2	9400 a 13900	3747.15 a 5526.1 l de diesel**
Nitrógeno (kg)	0.045 kg·100 kg ⁻¹ de peso	2.25	821	1784 kg de urea
P ₂ O ₅ (kg)	0.31 kg·100 kg ⁻¹ de peso	1.5	547	1190 kg de Fertilizante Ca(H ₂ PO ₄) ₂

* Producción de materia seca: 0.75 kg por kilogramo peso vivo.(Acp, Cornare, Corantioquia, 1997).

** Un m³ de biogás = 0.3785 l de diesel (Polprasert, 1989).

Estos productos pueden ser empleados en el sistema productivo siempre que haya una adecuada integración. De esta forma se recuperan recursos que de otra manera generan contaminación y se ponen al servicio del sistema productivo, lo cual genera también beneficios económicos (Chará, 2000).

Como se mencionó con anterioridad, para poder llevar a cabo cualquier clase de control durante el proceso de tratamiento anaeróbico, que permita la obtención de biogás, debe de contarse con sensores que proporcionen información adecuada sobre el sistema. En este sentido, el principal aporte de esta investigación es la utilización del principio de diferencia de dilución en agua del metano y del dióxido de carbono para poder conocer la fracción del primero en un flujo de biogás. Un aporte secundario es el

diseño e implementación del actuador para el control de temperatura del dispositivo, el cual se basa en una celda termoeléctrica o bomba de calor de estado sólido.

Esta investigación permite contar con una herramienta de bajo costo, útil para ingenieros y científicos, que permitirá estudiar la dinámica del proceso. Además, representa el principio del desarrollo de una serie de instrumentos que permitirán el monitoreo y un posterior control de variables que influyen en un proceso de digestión anaerobia de alto rendimiento. Por otra parte, se podrá conjuntar en un paquete que permita distribuir reactores de digestión anaerobia de escala piloto y alto desempeño, que permitan el ahorro de espacio y agua.

Una de las posibles aplicaciones del dispositivo descrito en este trabajo se encuentra en los reactores anaerobios de alta tasa de carga orgánica. Esta clase de reactores se basan en el concepto de retención de biomasa altamente viable por medio de algún método de inmovilización y, debido a sus mismas características, requieren de un monitoreo de variables significativas para la evaluación del correcto funcionamiento de los mismos. Dentro de esta clase de reactores se encuentran los siguientes:

- Reactores de película fija
- Reactores de flujo ascendente con capa de lodos (UASB)
- Reactores de cama fluidiza
- Crecimiento de bacterias en suspensión por agitación
- Reactores con mamparas
- Reactores de cama expandida
- Reactores de flujo Híbrido
- Reactores de contactor biológico

Por otra parte, los tipos de industria en que se puede aplicar esta clase de tecnología incluye:

- Rastros y empacado de carne.

- Lechería y suero de queso.
- Residuos de azúcar y destilación.
- Residuos de la pulpa y papel.
- Producción ganadera.
- Producción avícola.
- Producción piscícola.

De lo anteriormente expuesto se desprende que el presente trabajo, además de constituir un aporte a la ingeniería a través de la mejora de un sensor para una aplicación específica dentro de un proceso de digestión anaerobia y el desarrollo de un sistema compacto de monitoreo, constituye una aportación encaminada a la mejora del medio ambiente y una contribución destinada al ahorro de energía, lo cual justifica la pertinencia del mismo.

El dispositivo descrito en este documento, es una herramienta de muy bajo costo en comparación con una variedad de dispositivos actualmente en el mercado, cuyo costo puede llegar a varios cientos de miles de pesos, en comparación a unos cinco mil pesos. Este dispositivo, además es de unas dimensiones muy reducidas en comparación con otros dispositivos. El principio de funcionamiento de este dispositivo es muy simple y por ende, confiable. Este sistema no requiere de componentes que ameriten una elevada especialización técnica o herramientas especiales para su construcción o puesta en marcha. Por lo que representa una herramienta valiosa para estudiar la dinámica del proceso de digestión anaerobia.

Capítulo 2

REVISIÓN BIBLIOGRAFICA

En el presente capítulo se muestra la literatura revisada, utilizada como fundamento para el desarrollo del trabajo. La revisión se ha dividido en ocho partes principales que son:

- Generación de biogás en el proceso de digestión anaerobia
- Instrumentación y sensores
- Principio de medición.
- Actuadores para el control de temperatura
- Sensores de medición de flujo de gas
- Conversión de datos y acondicionamiento de señales
- Procesamiento digital de señales
- Procesamiento de señales en hardware

En la sección correspondiente a la generación de biogás en el proceso de digestión anaerobia se trata la literatura concerniente a como se lleva a cabo la producción de biogás, su composición y cuál es su concentración.

La sección sobre instrumentación y sensores habla sobre la literatura que ha tratado este tema. Así mismo, se ha incluido un análisis del estado del arte referente a la determinación de la concentración de metano en biogás y a algunos equipos comerciales que cumplen esta función.

La literatura correspondiente al principio de medición empleado en este trabajo se revisa en esta sección, haciendo hincapié en la descripción matemática del mismo.

La información relativa al desarrollo de los actuadores para el control de temperatura muestra la literatura revisada para poder llevar a cabo el diseño de los intercambiadores de calor, así como del diseño con celdas de efecto termoelectrico.

En la sección correspondiente al desarrollo de los sensores de flujo de gas se trata de la literatura de diversos dispositivos creados para este fin y en los cuales se basa el desarrollado.

La conversión de datos y acondicionamiento de señales es una parte fundamental que permite al sistema digital obtener y distribuir la información procesada. En esta sección se revisa la literatura consultada sobre estos dos temas.

La información relativa al desarrollo y aplicación de algoritmos digitales para el procesamiento de información se trata en la sección de procesamiento digital de señales.

Finalmente, en la sección correspondiente al procesamiento de señales en hardware se revisa la literatura pertinente a la realización física de los algoritmos de procesamiento digital de señales.

2.1. Generación de biogás en el proceso de digestión anaerobia

El proceso de digestión anaerobia y de producción de biogás debe de ser comprendido para entender el motivo por el cual, la medición de la fracción de metano contenida en el biogás generado es de suma importancia. Esto involucra principalmente la serie de pasos que se llevan en el proceso biológico.

Una visión muy práctica y general del proceso de digestión anaerobia se presenta de manera muy sencilla en Gerardi (2003). El capítulo 2 habla sobre las bacterias que participan en el proceso de digestión anaerobia, grupo al que pertenecen, ejemplos de las mismas, y su significancia en el proceso. En el capítulo 3 habla sobre las

bacterias encargadas de la formación del metano, su morfología, anatomía, crecimiento, alimentación, susceptibilidad a toxinas, y grupos. En el capítulo 7 presenta las etapas de la digestión anaerobia así como los componentes que se degradan en cada una de ellas hasta llegar a la formación de metano. En el capítulo 9 habla sobre las características físicas como químicas del biogás generado. En la sección III, habla sobre las condiciones de operación de un reactor de digestión anaerobia, pasando por la concentración de metano que debe de contener el biogás generado.

En German Solar Energy Society (DGS) y Ecofys (2005) en su capítulo 3, se presenta el proceso de digestión anaerobia simplificado, pero incorpora una descripción de los componentes de un sistema de digestión anaerobia, un planteamiento de la planeación de un proyecto de digestión anaerobia, un bosquejo de la realización del proyecto y arranque, operación y mantenimiento de un digestor así como la economía relacionada a un proyecto de este estilo.

Steyer (2002) presenta un artículo, donde recalca la importancia del control eficiente de las variables en un reactor de digestión anaerobia, así como su sensibilidad a los disturbios y variaciones en el proceso. Menciona además el riesgo de la desestabilización del proceso y de la consiguiente pérdida de biomasa. Este artículo es importante debido a que proporciona una perspectiva del monitoreo y control de variables significativas en un reactor de digestión anaerobia.

2.2. Instrumentación y sensores

En esta sección se presenta la revisión de la literatura referente a instrumentos y sensores empleados para la medición de la concentración de metano y bióxido de carbono en el biogás, así como principios empleados por diversos sensores para la medición de una especie gaseosa.

El texto que presenta Fraden (2004), describe una gran cantidad de principios y arquitectura de sensores para medir la concentración de gases. Se pueden resaltar los siguientes apartados, el capítulo 1 presenta una descripción breve sobre la adquisición de datos, sensores, señales y sistemas, clasificación de los sensores y unidades de medida. El capítulo 2 presenta una breve descripción de las características estadísticas que describen un sensor. El capítulo 3 habla sobre principios físicos de medición. Y por último, el capítulo 17, que describe brevemente los principios y diversas configuraciones de sensores químicos.

Sedlačík et al (2007) reporta experiencias de aplicación de dispositivos de medición de concentración de metano y de dióxido de carbono. Menciona el uso de un lazo de medición y la corrida de cuatro experimentos. Hace pasar el gas que se genera en un reactor de digestión anaerobia a través de una válvula de salida, recipientes de secado y a los sensores de gas. En una válvula de seguridad, el sistema puede continuar bombeando o, si la presión alcanzada llega a un nivel ajustado, se desvía a un medidor de flujo y entonces a la atmosfera. Este dispositivo fue diseñado para trabajar en reactores de laboratorio de tamaño mediano. Los sensores escogidos, se basan en el principio de espectrografía de masa de infrarrojo. En este caso, presentaron problemas para conectar los sensores y de manejo de datos. Y la medición de la concentración no fue tan precisa como se esperaba.

Gonzales (2002) reporta la medición de biogás en línea con el fin de conocer las propiedades metabólicas y los parámetros kineticos de lodo metanogénico. Para realizar esta medición, hace pasar el biogás generado en un reactor tipo batch a escala de laboratorio a través de una solución de NaOH al 20% seguido de un tubo lleno de pellets de cal sodada con un indicador de timol azul. El gas se hace pasar por un sistema de botella de Mariotte que contiene agua para la cuantificación de la producción de metano. El agua desplazada es colectada en contenedores plásticos que son colocados en sensores de presión para el monitoreo continuo de la producción de metano. Los sensores se encuentran conectados a un sistema data-logger programable. Los datos son registrados cada 10 s y promediados sobre intervalos de 20 min. Para establecer comunicación con el

data-logger, se usa una computadora personal programada para funcionar como emulador de terminal.

Rego et al (2004) reportó un sensor para conocer la concentración de dióxido de carbono y metano a partir de una mezcla de estos dos gases, basado en la permselectividad de membranas poliméricas para el monitoreo de biogás. El sensor consiste de una membrana permselectiva, un transductor de presión para la medición de la presión del permeante y una válvula de aguja (barrera no selectiva). La válvula de aguja se utiliza para controlar la salida del permeante a la atmósfera. La mezcla de gas a ser analizada debe de ser proporcionada a una presión constante, la cual debe de ser mayor que la presión de salida del permeante. El módulo ensamblado es de membrana de composite poly (dimethylsiloxane) (PDMS) con seis fibras huecas y una longitud de trabajo de 113 mm. El diámetro interior de las fibras es de 0.71 mm. Para esta membrana, el dióxido de carbono es el gas más rápido y el metano el más lento. Cuando la alimentación contiene solo el más lento o el más rápido de los gases permeantes, la presión obtenida en el lado del permeante es la mínima y la máxima respectivamente. La composición de la mezcla de alimentación fue corroborada con un analizador de infrarrojo para el dióxido de carbono. También se verificó la reproducibilidad del sensor por medio de la repetición de cada experimento de al menos dos veces en diferentes días.

Mandal et al (1999) reportó la determinación de la calidad del biogás por medio de la medición de temperatura de la flama generada. El sistema empleado se compone de un quemador, un indicador de temperatura análogo, un termopar, y un bulbo de control que contiene agua ácida. La muestra de biogás que se va a emplear para medir su temperatura de flama se colecta cada semana de un colector de biogás por medio del método de desplazamiento de agua. El porcentaje de metano en cada una de las muestras se determina por cromatografía de gases. Se toman 200 cm³ de la misma muestra en un muestreador modificado para que pueda ser utilizado como quemador de gas. Por medio de la apertura de una válvula de control, se permite al biogás escapar y es encendido en aire. La flama en estado estacionario es entonces medida por medio de un sistema de medición que consiste de un termopar y un indicador de temperatura. La lectura del

indicador de temperatura analógico proporciona el valor directo de la temperatura de la flama del biogás en combustión.

2.3. Principio de medición

El principio de medición en el cual se basa el dispositivo descrito en este trabajo, es principalmente la solubilidad en agua del bióxido de carbono y del metano en agua con respecto a la temperatura, los modelos matemáticos que describe este fenómeno se pueden encontrar en Lide (2005).

2.4. Actuadores para el control de temperatura

Esta sección se encuentra compuesta de tres partes principales, que son: el diseño con celdas termoeléctricas, electrónica de potencia, y el diseño de intercambiadores de calor. El análisis de esta literatura fue necesario para el correcto dimensionamiento de los actuadores encargados de modificar directamente la temperatura del agua en el interior del sensor.

La referencia técnica presentada por la compañía Ferrotec (2010), representa un texto resumido y practico con un soporte matemático sobre la aplicación de celdas termoeléctricas y su diseño con las mismas.

Malvino (2000), presenta un texto bastante completo sobre conceptos básicos de diseño electrónico, recalcando el capítulo 2 donde se muestran los aspectos teóricos sobre el uso de semiconductores, capítulo 3 donde se habla de teoría de diodos, capítulo 4 circuitos con diodos, capítulo 6 transistores bipolares, capítulo 8 polarización de los transistores y por último, el capítulo 11 sobre amplificadores de potencia.

En lo referente al diseño de intercambiadores de calor, Doran (1995), presenta en su capítulo 5 un análisis teórico y matemático de los principales aspectos de balances de energía, y en su capítulo 8 un análisis teórico, práctico y matemático de la transferencia de calor.

2.5. Sensores de medición de flujo de gas

Existen pocos trabajos sobre medidores de flujo volumétricos por desplazamiento de líquido y algunos de ellos utilizan microcontroladores en su implementación, y todos ellos cuentan con una variedad de características que los hacen no confiables sobre cierto periodo de tiempo. En este apartado se hace una breve descripción a cada uno.

Liu et al. (2004) desarrollo un dispositivo que es capaz de medir volúmenes de biogás de 1 a 950 ml·h⁻¹. El biogás, se encuentra en contacto con el líquido de medición (aceite deparaffin) y este a su vez con la atmosfera, lo que promueve perdidas de CO₂ por dilución de este gas en el aceite y consiguiente pérdida de este gas a la atmosfera. El dispositivo cuenta con 2 detectores ópticos, que detectan el momento en que se detectan los niveles alto y bajo, y en base a estas señales, se lleva a cabo la medición, o inicio de nueva secuencia. La celda volumétrica es fija. Se utiliza un microcontrolador para contar los eventos y mostrar el volumen acumulado total en un display. El programa para contar es una máquina de estados para evitar pérdidas de conteo de eventos por disturbios como cambios súbitos y repetitivos entre oscuridad e iluminación, y vibraciones repentinas del líquido de desplazamiento, debidas a golpes en la mesa donde se encuentra colocado el dispositivo.

El sistema de conteo mostrar la tasa de flujo y el volumen total acumulado; además de comunicación con una PC, con fines de adquisición de datos. Se guardan los datos en la computadora cada 30 minutos. Resolución de 1 ml. Es relativamente barato,

Con una interfaz amigable, fácil de ensamblar, con una exactitud de ± 3.3 y una repetitividad de $\pm 1.0\%$.

En el dispositivo desarrollado por Mata et al. (1986), el biogás, se encuentra en contacto con el agua de medición y este a su vez con la atmosfera, lo que promueve perdidas de CO_2 por dilución de este gas en el agua y consiguiente pérdida de este gas a la atmosfera. El agua al estar en contacto con el ambiente, hace que esta se encuentre sujeta a perdidas por evaporación; por lo cual, el liquido del dispositivo debe de ser restituido cada cierto tiempo. Está dotado con un contador electrónico que cuenta los eventos, únicamente puede proporcionar medida del volumen total de biogás producido, no de la tasa de producción de biogás a través del tiempo. No se puede reajustar la capacidad de la celda volumétrica. El autor del artículo, centra su atención en el medidor, dejando en segundo plano al contador de eventos, el cual, es óptico.

El dispositivo desarrollado por Glauser et al. (1984) es capaz de medir flujos de hasta $1 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$. El biogás se encuentra en contacto con agua, que a su vez se encuentra en contacto con el ambiente; propiciando perdidas de CO_2 por dilución en agua, lo que hace que la medición no sea confiable. Existen perdidas de líquido de medición por evaporación, lo que significa que hay que restituir líquido cada cierto tiempo. El sistema requiere de un suministro de aire comprimido para poder trabajar. El sistema permite el cambio en el volumen de medición de evento, por medio del cambio en la posición de los detectores inductivos. El sistema evita cambios en la presión del biogás, por lo la presión en el interior del reactor, permanece constante. El sistema es muy voluminoso. El sistema utiliza como contador de eventos un microcontrolador, que puede medir la tasa de producción y el volumen total generado.

El dispositivo desarrollado por Moletta et al. (1982), permite que el biogás este en contacto con agua, que a su vez se encuentra en contacto con el ambiente; propiciando perdidas de CO_2 por dilución en agua, lo que hace que la medición no sea confiable. El biogás se encuentra en contacto con agua que es renovada constantemente, con lo cual se incrementa la cantidad de CO_2 que se disuelve en el agua y es arrastrada por esta. Existen

perdidas de líquido de medición por evaporación, lo que significa que hay que restituir líquido cada cierto tiempo. El sistema utiliza electrodos como elemento de medición de nivel de agua, lo que promueve la electrolisis del agua de medición y por consiguiente, errores en la medición y necesidad de restitución de líquido con mayor frecuencia. El sistema no permite el reajuste de la celda volumétrica. El sistema es muy voluminoso. El sistema requiere de un sistema de restitución de líquido. Cuenta con depósitos para realizar muestreo del gas.

El dispositivo desarrollado por Macias et al. (1995) permite que el biogás en contacto con agua, que a su vez se encuentra en contacto con el ambiente; propiciando pérdidas de CO₂ por dilución en agua, lo que hace que la medición no sea confiable. El biogás se encuentra en contacto con agua que es renovada constantemente, con lo cual se incrementa la cantidad de CO₂ que se disuelve en el agua y es arrastrada por esta. Promueve pérdidas de líquido de medición por evaporación, lo que significa que hay que restituir líquido cada cierto tiempo. El sistema utiliza electrodos como elemento de medición de nivel de agua, lo que promueve la electrolisis del agua de medición y por consiguiente, errores en la medición y necesidad de restitución de líquido con mayor frecuencia. El sistema no permite el reajuste de la celda volumétrica. El sistema es muy voluminoso. El sistema requiere de un sistema de restitución de líquido. El sistema cuenta con depósitos para realizar muestreo del gas.

2.6. Conversión de datos y acondicionamiento de señales

La conversión de datos implica la conversión de digital a analógico o de analógico a digital, El texto de Kester (2005) es un texto muy completo, el cual se encuentra respaldado por una de las más grandes compañías en este ramo, que es Analog Devices.

El acondicionamiento de la señal implica el manejo de amplificadores operacionales, filtros analógicos. El texto de Jung (2005) puede ser utilizado como base

para el diseño y realización del acondicionador de señal, tanto en la parte de amplificación como filtrado analógico, donde se puede seguir un proceso frontal para la solución, una vez que se hayan establecido los parámetros de diseño específicos del sistema a desarrollar.

2.7. Procesamiento digital de señales

En el presente apartado se revisan las técnicas del procesamiento de señales con aplicación a la resolución de polinomios, y filtrado digital desde el punto de vista teórico con sus modelos básicos y sus algoritmos.

Smith (2003) presenta un texto adecuado para el estudio de las principales técnicas del procesamiento digital de señales, cubriendo desde los fundamentos, capítulos 5 a 13, hasta la realización de filtros digitales, capítulo 14 a 21.

Un compendio más detallado de las técnicas de control en tiempo discreto lo presenta la edición realizada por Ogata (1996). Se destaca principalmente el capítulo 1 en donde se resumen los principios básicos de los sistemas de control en tiempo discreto, el capítulo 2, en donde se tratan los principios matemáticos de la transformada z que es la principal técnica para el tratamiento de la información en tiempo discreto.

Un tratado especializado del marco teórico y práctico del controlador PID se presenta en Visioli (2006). En este texto, se tratan los aspectos matemáticos y práctico del controlador PID, describiendo los aspectos básicos, el diseño del filtro derivativo, estrategias de anti saturación del filtro integrador, Peso del Set-Point, el uso de la acción de retroalimentación, conecta y controla, técnicas de identificación y reducción del modelo, así como estructuras de control.

2.8. Procesamiento de señales en hardware

Las técnicas de manufactura han evolucionado a lo largo del tiempo – desde la producción en masa de ayer, hasta la automatización flexible de hoy y a la automatización reconfigurable de mañana. Los ingenieros en control han estado utilizando de manera creciente, tecnologías embebidas como los arreglos de compuertas programables en campo (FPGAs, Field Programmable Gate Arrays) en combinación con computadoras personales (PCs) y controladores lógicos programables (PLCs, Programmable Logic Controller) para resolver aplicaciones de control complejas que mejoran los tiempos de respuesta del sistema y proveen confiabilidad y determinismo. FPGA es una tecnología emergente que provee a los ingenieros en automatización con control de ultra alta-velocidad, implementación de contadores de acuerdo al cliente, emulación de protocolo digital, control discreto, y una mezcla a la medida de entradas y salidas digitales y analógicas dentro de un único dispositivo.

Un FPGA es un dispositivo que contiene una matriz de circuitería de arreglos lógicos reconfigurables. Cuando un FPGA es configurado, la circuitería interna se conecta de una manera que crea una implementación en hardware de la aplicación en software. A diferencia de los microprocesadores, los FPGAs utilizan hardware dedicado para la lógica de procesamiento y no cuentan con un sistema operativo. Los FPGAs con verdaderamente paralelos por naturaleza por lo que diferentes operaciones de procesamiento no tienen que competir por los mismos recursos. Como resultado, el desempeño de una parte de la aplicación no se ve afectado cuando se agrega procesamiento adicional. Incluso, múltiples lazos de control pueden correr en un único dispositivo a diferentes velocidades. Los sistemas basados en FPGA pueden reforzar lógica crítica y pueden ser diseñados para prevenir el forzado de entradas/salidas por un operador. Sin embargo, a diferencia de los diseños de tarjetas de circuito impreso (PCB, Printed Circuit Board), las cuales cuentan con recursos de hardware fijos, los sistemas basados en FPGA pueden literalmente re-cablear su circuitería interna para permitir reconfiguración después de que el sistema ha sido distribuido en el campo. Los

dispositivos FPGA proporcionan el desempeño y confiabilidad de la circuitería de hardware dedicado.

Un único FPGA puede reemplazar cientos de componentes discretos por medio de la incorporación de millones de compuertas lógicas en un único circuito integrado (IC, Integrated Circuit). Los recursos internos de un FPGA consisten de una matriz de bloques lógicos configurables (CLBs, Configurable Logic Blocks) rodeados por una periferia de bloques de entrada salida. Las señales son guiadas dentro de la matriz del FPGA por medio de interruptores de interconexión programables y rutas de cable.

Los sistemas de control basados en FPGA difieren de los sistemas basados en microprocesador de maneras significativas. Mientras que una implementación basada en microprocesador cuenta con los beneficios de la incorporación de matemática de punto fijo, una implementación basada en FPGA ofrece ventajas como confiabilidad y desempeño con una operación libre de software y computación paralela.

Cuando se sintetiza la aplicación de control para un dispositivo FPGA, el resultado es una implementación altamente optimizada en silicio que provee procesamiento paralelo con el desempeño y la confiabilidad de la circuitería de hardware dedicado. Desde el momento en que no hay sistema operativo en el FPGA, el código se implementa de manera que asegura el máximo desempeño y confiabilidad.

Además de ofrecer gran confiabilidad, los dispositivos FPGA pueden desempeñar control en lazo cerrado determinístico a tasas de lazo extremadamente altas. En la mayoría de las aplicaciones de control basadas en FPGA, la velocidad se encuentra limitada por los sensores, actuadores y módulos de entrada/salida en lugar del desempeño de procesamiento del FPGA.

Los sistemas de control basados en FPGA ofrecen desempeño determinístico en el control en lazo cerrado a tasas que exceden 1 MHz. De hecho, muchos algoritmos pueden ser ejecutados en un solo ciclo de reloj del FPGA (40 MHz). El procesamiento es

llevado a cabo en paralelo por lo que sistemas de control con diferentes constantes de tiempo son fácilmente implementables. Debido a que la lógica de control corre en subsistemas de hardware dedicado en el FPGA, las aplicaciones no se entorpecen cuando se agrega procesamiento adicional. En muchos casos, un arreglo de compuertas definido por software en hardware del FPGA puede ser utilizado para reemplazar el trazado costoso y consumidor de tiempo de una tarjeta de circuito impreso mandada a hacer (Kulkarny, 2006).

Dadas las condiciones de diseño, es importante realizar un análisis de las diversas estructuras digitales que puedan ser integradas dentro de los dispositivos programables estándares para llevar a cabo el algoritmo numérico como un solo circuito integrado, además de uno o dos componentes adicionales de soporte con efectos de configuración e interfaz. Esta parte del análisis bibliográfico tiene que ver con las técnicas para el diseño y optimización de estructuras digitales en la realización de los algoritmos numéricos dentro de un circuito VLSI (integración de muy alta escala, Veri Large Scale Integration).

El estudio de las estructuras digitales comprende tres partes principales. La primera parte comprende la teoría básica del diseño de estructuras digitales optimas que van desde la aritmética binaria hasta el diseño de microprocesadores. La segunda parte tiene que ver con los lenguajes descriptivos de circuitos. Finalmente, la tercera parte trata los artículos donde se han reportado realizaciones físicas VLSI de controladores PID.

Parhami (2000) presenta una colección de algoritmos y circuitos de aritmética binaria bastante completo y actualizado. Incluye tanto la aritmética de punto fijo como la aritmética de punto flotante. Se destacan principalmente las secciones 3 y 4 donde se tratan de manera exhaustiva las estructuras digitales de suma y multiplicación, fundamentales para cualquier desarrollo algorítmico de procesamiento de señales en circuito.

En lo referente al estudio de los lenguajes descriptivos de circuitos donde se destaca principalmente el VHDL (lenguaje descriptivo de circuitos para circuitos integrados de muy alta velocidad, Very high-speed integrated circuit Hardware Description Language). Romero (2004) presenta aspectos tanto básicos como avanzados del diseño con VHDL y síntesis con un enfoque tendiente a la realización tanto en ASIC como en FPGA.

Entre los artículos en los cuales se presentan realizaciones de algoritmos PID en circuito integrado se puede mencionar el trabajo de Osornio et al (2008), quienes demostraron la aplicación de un controlador PID digital basado en FPGA en una maquina de control numérico (CNC).

En otros artículos revisados basan su trabajo en un controlador PID digital embebido en un FPGA, y muestran una comparación entre la configuración más rápida versus recursos ocupados del FPGA, entre la configuración más lenta versus recursos ocupados del FPGA, y entre una mezcla entre estas dos técnicas, como se puede ver en Samet et al (1998) y Subasri (2006).

Algunos otros artículos presentan metodologías semi-automatizadas aplicadas al diseño de controladores digitales PID, con el fin de optimizar recursos del FPGA, como es el caso de Lima et al (2006), en donde, además se presenta una comparación entre arquitecturas digitales de controladores PID.

Fong-Chan et al (2007) presenta una variación en la arquitectura digital del PID, con el fin de lograr un concordancia con los recursos intrínsecos de los bloques lógicos configurables que integran el FPGA, y por ende, logrando una optimización de recursos muy marcada.

Capítulo 3

METODOLOGIA

En el presente capítulo se muestra el desarrollo del sistema que permite la medición de la fracción de metano contenido en un flujo de biogás, el cual se basa en la diferencia en dilución en agua de diferentes especies gaseosas. El desarrollo se ha dividido en tres partes principales que son: cálculos de las características del dispositivo, desarrollo del prototipo y pruebas.

Durante el proceso de desarrollo del presente trabajo se han utilizado los métodos analítico y empírico en diversas partes del trabajo. La validación de las aseveraciones obtenidas por métodos analíticos se justifica sobre la base de trabajos previos y a desarrollos originales. La validación de las propuestas empíricas se ha basado en experimentación, partiendo de proposiciones citadas en la literatura.

Las principales aportaciones tecnológicas, originales, del trabajo se pueden citar como: aplicación de la diferencia de dilución en agua de especies gaseosas para medir su fracción en una mezcla, diseño y construcción de dispositivo de medición, diseño y construcción de actuador de temperatura en base a celdas termoeléctrica, diseño y realización en FPGA de los algoritmos de procesamiento de señales para la obtención de la lectura de la fracción de una de las especies gaseosas y el uso de técnicas de procesamiento de señales en circuitos integrados HSP (Hardware Signal Processing) aplicadas en el desarrollo de sensores químicos.

3.1. Cálculos de las características del dispositivo

La dilución de gases en agua se ve afectada por factores como son la presión a la que se encuentra el gas, temperatura del agua, y especie o especies que se ven

involucradas. Los siguientes capítulos presentan la metodología en las descripciones matemáticas de las diversas partes que componen el dispositivo.

3.1.1. Calculo de moles de agua para la dilución de muestra

Para poder saber la mínima cantidad de agua de absorción necesaria para diluir una cantidad dada de gas, primero se debe de conocer la cantidad en moles de gas contenidos en la muestra que se desea tomar. Otro de los factores importantes, es conocer además, de los dos gases que se requiere muestrear, cual es el que tiene la mayor capacidad de dilución. Y se utiliza una muestra hipotética compuesta enteramente por el gas con mayor capacidad de dilución, con el fin de garantizar que el agua de absorción se encontrara en cantidad suficiente para cubrir todo el espectro de mezclas posible. Tomado como condiciones base, temperatura, presión, volumen de muestra de gas y aplicando la ecuación de los gases ideales (Ecuación 3.1)

$$PV = nRT \quad (3.1)$$

	P	Presión del gas (atmosferas)
	V	Volumen de gas (Litros)
Donde:	R	Constante de Avogadro ($L \cdot atm \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$)
	n	Numero de moles del gas
	T	Temperatura del gas (Kelvin)

Se despeja la variable que representa la cantidad de moles de gas (n) con lo que se obtiene la ecuación 3.2. Con esto, se puede conocer la cantidad de moles de gas contenidos en la muestra, y es la base para subsecuentes cálculos.

$$n = \frac{PV}{RT} \quad (3.2)$$

Para poder calcular la cantidad de moles de agua necesarios para poder disolver en su totalidad una muestra únicamente compuesta de CO_2 , el cual presenta una afinidad

al agua mucho mayor que el CH₄, se recurre a la ecuación de la fracción molar (ecuación 3.3) para una muestra de gas puro.

$$X_{CO_2} = \frac{n_{CO_2}}{n_{CO_2} + n_{H_2O}} \quad (3.3)$$

X_{CO_2}	Fracción mol del CO ₂ en agua
Donde: n_{CO_2}	Cantidad de moles de CO ₂ disueltos
n_{H_2O}	Número de moles de agua

De la ecuación 3.3, se despeja la variable que representa la cantidad de moles de agua (n_{H_2O}) obteniéndose la ecuación 3.4. Con dicha ecuación, y la sustitución de los valores correspondientes, se obtiene la cantidad de moles necesarios de agua de absorción para disolver una muestra compuesta únicamente de CO₂.

$$n_{H_2O} = \frac{n_{CO_2} - n_{CO_2} X_{CO_2}}{X_{CO_2}} \quad (3.4)$$

3.1.2. Calculo de dilución de muestra

Para poder conocer el estado estacionario o de equilibrio que existe entre una cantidad finita de moles de una mezcla gaseosa binaria (CO₂ y CH₄) en y una cantidad finita de moles de agua de absorción, se deben de tomar en cuenta las ecuaciones que describen la fracción molar de los gases en agua, la fracción molar de los gases en la muestra y las ecuaciones que relacionan el gas disuelto en la fase líquida con el gas en la fase gaseosa.

Las ecuaciones que describen la dilución en agua de una mezcla binaria de especies gaseosas, que en este caso son CO₂ y CH₄ se pueden ver en las ecuaciones 3.5 y 3.6 respectivamente.

$$X_{CO_2}P_{CO_2p} = \frac{n_{CO_2}}{n_{CO_2} + n_{CH_4} + n_{H_2O}} \quad (3.5)$$

	X_{CO_2}	Fracción mol del CO ₂ en agua
	P_{CO_2p}	Presión parcial del CO ₂ (Atmosferas)
Donde:	n_{CO_2}	Cantidad de moles de CO ₂ disueltos
	n_{CH_4}	Cantidad de moles de CH ₄ disueltos
	n_{H_2O}	Número de moles de agua

$$X_{CH_4}P_{CH_4p} = \frac{n_{CH_4}}{n_{CO_2} + n_{CH_4} + n_{H_2O}} \quad (3.6)$$

	X_{CH_4}	Fracción mol del CH ₄ en agua
	P_{CH_4p}	Presión parcial del CH ₄ (Atmosferas)
Donde:	n_{CO_2}	Cantidad de moles de CO ₂ disueltos
	n_{CH_4}	Cantidad de moles de CH ₄ disueltos
	n_{H_2O}	Número de moles de agua

De la ecuación 3.5 se despeja la cantidad disuelta de moles de CO₂ (n_{CO_2}) teniendo como resultado, la ecuación 3.7 y de la ecuación 3.6 se despeja la cantidad de moles de CH₄ disueltos (n_{CH_4}), teniendo como resultado la ecuación 3.8. Esto con el fin de comenzar a aislar las variables de interés.

$$n_{CO_2} = \frac{X_{CO_2}P_{CO_2p}(n_{CH_4} + n_{H_2O})}{1 - X_{CO_2}P_{CO_2p}} \quad (3.7)$$

$$n_{CH_4} = \frac{X_{CH_4}P_{CH_4p}(n_{CO_2} + n_{H_2O})}{1 - X_{CH_4}P_{CH_4p}} \quad (3.8)$$

Las ecuaciones que describen la concentración de CO₂ y CH₄ en la fase gaseosa se pueden ver en las ecuaciones 3.9 y 3.10 respectivamente. Estas ecuaciones son equivalentes a la presión parcial de cada uno de los gases en la mezcla.

$$P_{CO_2p} = \frac{n_{CO_2g}}{n_{CO_2g} + n_{CH_4g}} \quad (3.9)$$

	P_{CO_2p}	Presión parcial del CO ₂ en la mezcla (atmosferas)
Donde:	n_{CO_2g}	Cantidad de moles de CO ₂ en la fase gaseosa
	n_{CH_4g}	Cantidad de moles de CH ₄ en la fase gaseosa

$$P_{CH_4p} = \frac{n_{CH_4g}}{n_{CO_2g} + n_{CH_4g}} \quad (3.10)$$

	P_{CH_4p}	Presión parcial del CH ₄ en la mezcla (atmosferas)
Donde:	n_{CO_2g}	Cantidad de moles de CO ₂ en la fase gaseosa
	n_{CH_4g}	Cantidad de moles de CH ₄ en la fase gaseosa

En el momento de tomar una muestra de gas, existe en esta una cantidad finita de moles tanto de CO₂ como de CH₄, Los cuales estarán en contacto con una cantidad finita de moles de agua de absorción. Parte de estos moles pasara al agua de absorción y parte permanecerá en la fase gaseosa. A pesar de esto, la cantidad de moles de ambos gases permanecerá constante. Esto se describe por las ecuaciones 3.11 y 3.12.

$$n_{CO_2m} = n_{CO_2} + n_{CO_2g} \quad (3.11)$$

	n_{CO_2m}	Cantidad de moles de CO ₂ contenidos en la muestra
Donde:	n_{CO_2}	Cantidad de moles de CO ₂ disueltos en agua
	n_{CO_2g}	Cantidad de moles de CO ₂ en la fase gaseosa

$$n_{CH_4m} = n_{CH_4} + n_{CH_4g} \quad (3.12)$$

	n_{CH_4m}	Cantidad de moles de CH ₄ contenidos en la muestra
Donde:	n_{CH_4}	Cantidad de moles de CH ₄ disueltos en agua
	n_{CH_4g}	Cantidad de moles de CH ₄ en la fase gaseosa

A partir de las ecuaciones 3.11 y 3.12 se despejan los moles de CO₂ y CH₄ en la fase gaseosa respectivamente. Teniendo como resultado las ecuaciones 3.13 y 3.14.

$$n_{CO_2g} = n_{CO_2m} - n_{CO_2} \quad (3.13)$$

$$n_{CH_4g} = n_{CH_4m} - n_{CH_4} \quad (3.14)$$

Para poder eliminar las incógnitas de la cantidad de moles en la parte gaseosa en las ecuaciones que describen la presión parcial de los gases, y únicamente dejar las ecuaciones en función de las incógnitas de moles disueltos CO_2 y CH_4 , y de los valores supuestos de la cantidad de moles de CO_2 y CH_4 en la muestra, se realiza la sustitución de las ecuaciones 3.13 y 3.14 en las ecuaciones 3.9 y 3.10, con lo que se obtiene las ecuaciones 3.15 y 3.16.

$$P_{CO_2p} = \frac{n_{CO_2m} - n_{CO_2}}{n_{CO_2m} - n_{CO_2} + n_{CH_4m} - n_{CH_4}} \quad (3.15)$$

$$P_{CH_4p} = \frac{n_{CH_4m} - n_{CH_4}}{n_{CO_2m} - n_{CO_2} + n_{CH_4m} - n_{CH_4}} \quad (3.16)$$

Las ecuaciones 3.15 y 3.16 que describen las presiones parciales del CO_2 y del CH_4 en base a las cantidades molares supuestas de la muestra y disueltas en agua en términos compatibles con las ecuaciones 3.7 y 3.8, se sustituyen en estas, y se obtienen las ecuaciones 3.17 y 3.18.

$$n_{CO_2} = \frac{X_{CO_2} \left(\frac{n_{CO_2m} - n_{CO_2}}{n_{CO_2m} - n_{CO_2} + n_{CH_4m} - n_{CH_4}} \right) (n_{CH_4} + n_{H_2O})}{1 - X_{CO_2} \left(\frac{n_{CO_2m} - n_{CO_2}}{n_{CO_2m} - n_{CO_2} + n_{CH_4m} - n_{CH_4}} \right)} \quad (3.17)$$

$$n_{CH_4} = \frac{X_{CH_4} \left(\frac{n_{CH_4m} - n_{CH_4}}{n_{CO_2m} - n_{CO_2} + n_{CH_4m} - n_{CH_4}} \right) (n_{CO_2} + n_{H_2O})}{1 - X_{CH_4} \left(\frac{n_{CH_4m} - n_{CH_4}}{n_{CO_2m} - n_{CO_2} + n_{CH_4m} - n_{CH_4}} \right)} \quad (3.18)$$

Al momento de volver a despejar de las ecuaciones 3.17 y 3.18 la cantidad de moles de CO₂ y de CH₄ disueltos en agua respectivamente, se obtienen las ecuaciones 3.19 y 3.20. Estas ecuaciones cuentan con una raíz cuadrada, por lo que existen dos soluciones que satisfacen la ecuación.

$$n_{CO_2} = \frac{\left(\frac{n_{CH_4} - n_{CH_4m} - n_{CO_2m} - n_{CH_4}X_{CO_2} + n_{CO_2m}X_{CO_2} - n_{H_2O}X_{CO_2} \pm \sqrt{(-n_{CH_4} + n_{CH_4m} + n_{CO_2m} + n_{CH_4}X_{CO_2} - n_{CO_2m}X_{CO_2} + n_{H_2O}X_{CO_2})^2 - 4(-1 + X_{CO_2})(-n_{CH_4}n_{CO_2m}X_{CO_2} - n_{CO_2m}n_{H_2O}X_{CO_2})}}{2(-1 + X_{CO_2})} \right)}{2(-1 + X_{CO_2})} \quad (3.19)$$

$$n_{CH_4} = \frac{\left(\frac{-n_{CH_4m} + n_{CO_2} - n_{CO_2m} - n_{CO_2m}X_{CH_4} - n_{CO_2}X_{CH_4} - n_{H_2O}X_{CH_4} \pm \sqrt{(n_{CH_4m} - n_{CO_2} + n_{CO_2m} - n_{CH_4m}X_{CH_4} + n_{CO_2}X_{CH_4} + n_{H_2O}X_{CH_4})^2 - 4(-1 + X_{CH_4})(-n_{CH_4m}n_{CO_2}X_{CH_4} - n_{CH_4m}n_{H_2O}X_{CH_4})}}{2(-1 + X_{CO_2})} \right)}{2(-1 + X_{CO_2})} \quad (3.20)$$

Con el fin de poder hacer que las ecuaciones 3.19 y 3.20 sean independientes una la otra, se sustituye la ecuación 3.19 en la 3.20 y se sustituye la ecuación 3.20 en la 3.19. Una vez realizado esto, se vuelven a despejar los términos n_{CO_2} y n_{CH_4} de las ecuaciones resultantes. Obteniéndose como resultado las ecuaciones 3.21 y 3.22.

Dichas ecuaciones nos permiten conocer la cantidad de moles de CO₂ y de CH₄ que se disuelven en una cantidad finita de agua y con una cantidad finita de moles de CO₂ y de CH₄ que componen la muestra.

$$n_{CO_2} = \frac{\left(\frac{\left(\frac{n_{CH_4m}X_{CO_2} + n_{CO_2m}X_{CO_2} - n_{CH_4m}X_{CH_4}X_{CO_2}}{-n_{H_2O}X_{CH_4}X_{CO_2} - n_{CO_2m}X_{CO_2}^2 + n_{H_2O}X_{CO_2}^2} \right) \pm \sqrt{\left(\frac{-n_{CH_4m}X_{CO_2} - n_{CO_2m}X_{CO_2} + n_{CH_4m}X_{CH_4}X_{CO_2}}{+n_{H_2O}X_{CH_4}X_{CO_2} + n_{CO_2m}X_{CO_2}^2 - n_{H_2O}X_{CO_2}^2} \right)^2 - 4n_{CO_2m}n_{H_2O}X_{CO_2}^2(-X_{CH_4} + X_{CO_2} + X_{CH_4}X_{CO_2} - X_{CO_2}^2)}}{2(-X_{CH_4} + X_{CO_2} + X_{CH_4}X_{CO_2} - X_{CO_2}^2)} \right)}{2(-X_{CH_4} + X_{CO_2} + X_{CH_4}X_{CO_2} - X_{CO_2}^2)} \quad (3.21)$$

$$n_{CH_4} = \frac{\left(\left(n_{CH_4m} X_{CH_4} + n_{CO_2m} X_{CH_4} - n_{CO_2m} X_{CH_4} X_{CO_2} \right) \pm \sqrt{\left(-n_{CH_4m} X_{CH_4} - n_{CO_2m} X_{CH_4} + n_{CO_2m} X_{CH_4} X_{CO_2} \right)^2 + n_{H_2O} X_{CH_4}^2} \right)}{2 \left(X_{CH_4} - X_{CO_2} + X_{CH_4} X_{CO_2} - X_{CH_4}^2 \right)} \quad (3.22)$$

3.1.3. Calculo de moles de gases disueltos en la regeneración

Para regenerar el agua de absorción, es necesario hacer que esta se encuentre en contacto con el aire. Este proceso promueve la liberación del CO₂ y del CH₄ disuelto en el proceso de absorción, y también promueve la dilución de O₂ y N₂ en el agua de absorción. Al momento de realizar la medición, los moles disueltos de O₂ y N₂ pasaran parcialmente a la fase gaseosa y se verán como parte de los moles no diluidos de la muestra. Para calcular el efecto sobre la medición de estos moles disueltos de O₂ y N₂ en la medición, se realizo el análisis que se presenta a continuación. Las ecuaciones 3.23 y 3.24, describen la cantidad en moles de O₂ y N₂ que se disolverá en una cantidad específica de agua.

$$X_{O_2} P_{O_2p} = \frac{n_{O_2}}{n_{O_2} + n_{N_2} + n_{H_2O}} \quad (3.23)$$

X_{O_2}	Fracción molar del O ₂ disuelto en agua
P_{O_2p}	P _{O₂p} es la presión parcial del oxígeno (Atmosferas)
Donde: n_{O_2}	Cantidad de moles de O ₂ disueltos en el agua de absorción
n_{N_2}	Cantidad de moles de N ₂ disueltos en el agua de absorción
n_{H_2O}	Cantidad de moles de agua de absorción

$$X_{N_2} P_{N_2p} = \frac{n_{N_2}}{n_{O_2} + n_{N_2} + n_{H_2O}} \quad (3.24)$$

X_{N_2}	Fracción molar del N ₂ disuelto en agua
P_{N_2p}	P _{N₂p} es la presión parcial del oxígeno (Atmosferas)
Donde: n_{O_2}	Cantidad de moles de O ₂ disueltos en el agua de absorción
n_{N_2}	Cantidad de moles de N ₂ disueltos en el agua de absorción
n_{H_2O}	Cantidad de moles de agua de absorción

Para poder conocer la cantidad de moles de O₂ y N₂ disueltos en el agua de absorción al final del proceso de regeneración, se despeja la variable que representa la cantidad de moles de oxígeno disuelto (n_{O_2}) de la ecuación 3.23, obteniendo como resultado la ecuación 3.25. Por otra parte, se despeja la variable que representa la cantidad de moles de nitrógeno disuelto (n_{N_2}) de la ecuación 3.24, obteniendo como resultado la ecuación 3.26.

$$n_{O_2} = \frac{X_{O_2} P_{O_2p} (n_{N_2} + n_{H_2O})}{1 - X_{O_2} P_{O_2p}} \quad (3.25)$$

$$n_{N_2} = \frac{X_{N_2} P_{N_2p} (n_{O_2} + n_{H_2O})}{1 - X_{N_2} P_{N_2p}} \quad (3.26)$$

Con el fin de hacer que las ecuaciones 3.25 y 3.26 sean independientes entre sí, se procedió a la sustitución de la ecuación 3.25 en la ecuación 3.26, y a la sustitución de la ecuación 3.26 en la ecuación 3.25. Y a continuación se despejo las respectivas variables de moles disueltos (n_{O_2} y n_{N_2}), obteniendo las ecuaciones 3.27 y 3.28.

$$n_{O_2} = \frac{n_{H_2O} P_{O_2p} X_{O_2}}{1 - P_{N_2p} X_{N_2} - P_{O_2p} X_{O_2}} \quad (3.27)$$

$$n_{N_2} = \frac{n_{H_2O} P_{N_2p} X_{N_2}}{1 - P_{N_2p} X_{N_2} - P_{O_2p} X_{O_2}} \quad (3.28)$$

3.1.4 Cálculo de ingreso de energía al sistema

Debido a la diferencia de temperaturas entre el medio ambiente y el dispositivo, existe una determinada cantidad de energía que fluye desde los alrededores al sistema de medición, con lo cual, la temperatura del sistema tiende a elevarse. Para calcular la pérdida de calor del dispositivo propuesto, se determinaron las medidas teóricas del recipiente de acrílico que contendrá al agua de refrigeración. A continuación, se procedió a calcular por medio de la ecuación 3.29 el área superficial que se encuentra expuesta al ambiente del dispositivo.

$$A = 2\pi r(r + h) \quad (3.29)$$

	<i>A</i>	Área del cilindro (m ²)
Donde:	<i>r</i>	Radio del cilindro (metros)
	<i>h</i>	Altura del cilindro (metros)

A continuación, se determino el coeficiente general de transferencia de calor con la ecuación 3.30. Este coeficiente contempla las resistencias térmicas del fluido caliente, del fluido frío y de la barrera que los separa.

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_h} + \frac{B_{P_{MMA}}}{K_{P_{MMA}}} + \frac{1}{h_c} \quad (3.30)$$

	<i>U</i>	Coficiente general de transferencia de calor (W·m ⁻² ·K ⁻¹)
	<i>h_h</i>	Coficiente individual de transferencia de calor para el aire que rodea al instrumento (W·m ⁻² ·K ⁻¹)
Donde:	<i>B_{P_{MMA}}</i>	Grosor de pared de acrílico (m)
	<i>K_{P_{MMA}}</i>	Coficiente de transferencia térmica del acrílico (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
	<i>h_c</i>	Coficiente individual de transferencia de calor para el fluido de refrigeración (W·m ⁻² ·K ⁻¹)

Debido a que la temperatura ambiente se puede considerar constante, debido a su relación de tamaño en comparación con el sistema de medición, se utiliza la diferencia de temperatura media-aritmética ΔT_A . La cual se puede ver en la ecuación 3.31.

$$\Delta T_A = \frac{2T_F - (T_1 + T_2)}{2} \quad (3.31)$$

Donde:	ΔT_A	Diferencia de temperatura media aritmética (°C)
	T_F	Temperatura ambiente (°C)
	T_1	Temperatura del fluido de refrigeración que ingresa al sistema de medición (°C)
	T_2	Temperatura del fluido de refrigeración que abandona al sistema de medición (°C)

Por último, la ecuación 3.32 nos proporciona la descripción de la cantidad de energía que ingresa al sistema de medición. Con lo cual, ya se puede desarrollar el actuador que remueva esta energía.

$$\hat{Q} = UA\Delta T_A \quad (3.32)$$

Donde:	Q	Flujo de calor que ingresa al sistema de medición (Watts)
	U	Coefficiente general de transferencia de calor ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)
	A	Área de contacto del sistema de medición (m^2)
	ΔT_A	Diferencia de temperatura media aritmética (°C)

3.1.5. Calculo de intercambiador de calor

Para poder contrarrestar la elevación de temperatura que sufre el sistema, y conociendo la cantidad de energía que entra a este, se puede diseñar el dispositivo que retirara esa energía y mantendrá al sistema a la temperatura adecuada.

Como primer paso, se determino el coeficiente general de transferencia térmica por medio de la ecuación 3.33. Este coeficiente contempla el efecto de la conductividad del fluido de refrigeración y del intercambiador que retira dicha energía.

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_c} + \frac{B_{Cu}}{K_{Cu}} \quad (3.33)$$

Donde:	U	Coeficiente general de transferencia de calor ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)
	h_c	Coeficiente individual de transferencia de calor para el fluido de refrigeración ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)
	B_{Cu}	Grosor de pared promedio del intercambiador de cobre (m)
	K_{Cu}	Coeficiente de transferencia térmica del cobre ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)

Debido a que el elemento termoelectrico es activo, se considera como una temperatura que no cambia, por lo que se utiliza la diferencia de temperatura media-aritmética ΔT_A . La cual se puede ver en la ecuación 3.34.

$$\Delta T_A = \frac{2T_F - (T_1 + T_2)}{2} \quad (3.34)$$

Donde:	ΔT_A	Diferencia de temperatura media aritmética ($^{\circ}C$)
	T_F	Temperatura de celda ($^{\circ}C$)
	T_1	Temperatura de fluido de refrigeración que ingresa al intercambiador de calor ($^{\circ}C$)
	T_2	Temperatura de fluido de refrigeración que abandona al intercambiador de calor ($^{\circ}C$)

Por último, con la ecuación 3.35 se obtiene el área de contacto necesaria para poder llevar a cabo el intercambio de calor requerido para evacuar la energía del sistema de medición.

$$A = \frac{\dot{Q}}{U\Delta T_A} \quad (3.35)$$

Donde:	Q	Flujo de calor que debe evacuar el intercambiador (Watts)
	U	Coefficiente general de transferencia de calor ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)
	A	Área de contacto del intercambiador de calor (m^2)
	ΔT_A	Diferencia de temperatura media aritmética ($^{\circ}C$)

Una vez que se sabe que es lo que se quiere construir, se debe de escoger como se quiere construir. Esto significa que es necesario decidir que topología de intercambiador se quiere usar. En este trabajo se decidió por un intercambiador tipo bloque, debido a su facilidad de manufacturabilidad.

Como primer paso, se dibujo el corte transversal de una perforación cilíndrica a través del cual circularía el líquido de refrigeración. Una vez que se obtuvo esta representación, se discretizo el área transversal de la perforación virtual. Mediante esta discretización se siguió el flujo de calor ideal a través del material, tomando en cuenta el área de contacto del fluido (figura 3.1a). Una vez obtenidas las trayectorias ideales de flujo de calor, se utilizó su área transversal virtual como base para obtener el factor de grosor del material para cada trayectoria. Lo cual nos da una idea del grosor de pared que tendrá el material en cada punto (figura 3.1b).

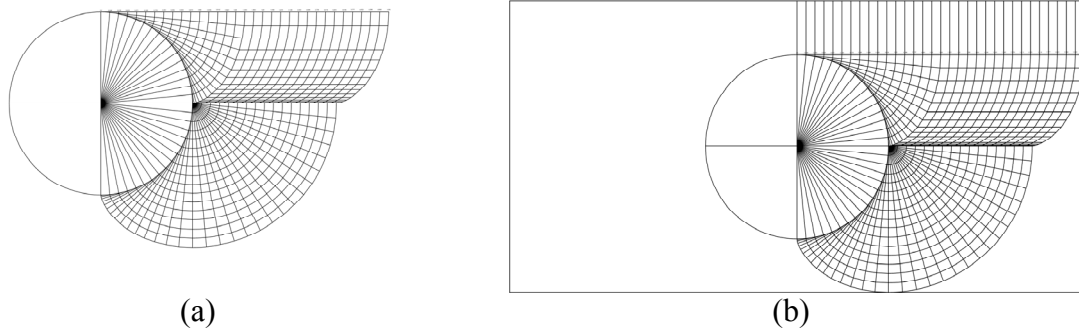


Figura 3.1. Sección transversal de perforación en material de intercambiador.

Con el fin de ajustar la perforación a una pieza cuadrada, que se ajusta mejor a la configuración del elemento que retira la energía del sistema de medición, se utilizó una configuración de tres perforaciones adyacentes (figura 3.2).

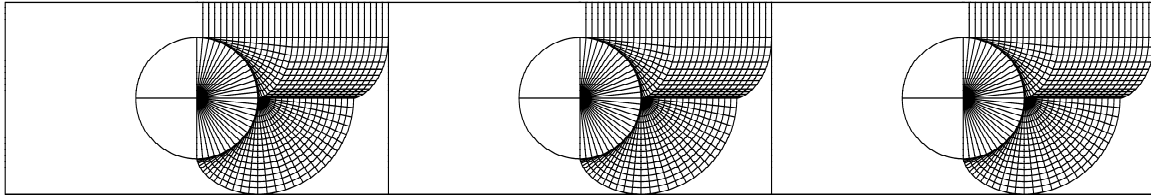


Figura 3.2. Área transversal ocupada por las tres perforaciones adyacentes.

Para poder interconectar en el interior del bloque cuadrado del intercambiador, las tres perforaciones adyacentes, se realizaron dos perforaciones secundarias más cortas. Estas perforaciones secundarias, se rigieron por las mismas reglas empleadas para las tres perforaciones principales (figura 3.3a). Como paso final, se obstruyeron las perforaciones secundarias y la perforación principal entre dos principales, esto con el fin de confinar el fluido de enfriamiento (figura 3.3b).

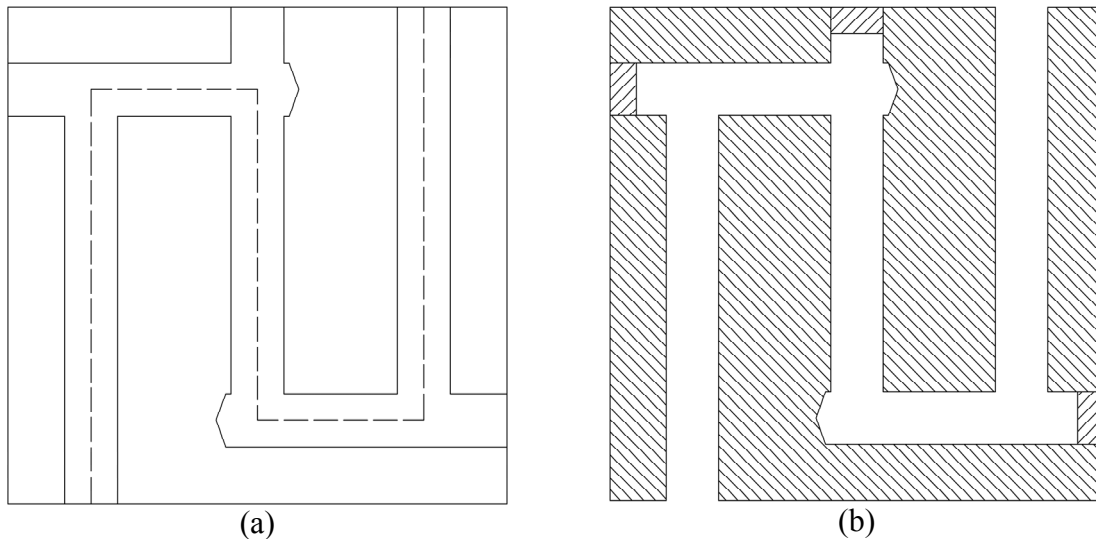


Figura 3.3. Vista superior del intercambiador de calor y sus perforaciones.

3.1.6. Calculo de celda termoeléctrica

Para poder mantener el sistema a una temperatura por debajo de la temperatura ambiente, se utilizó un modulo termoeléctrico (figura 3.4). Un modulo termoeléctrico o

enfriador Peltier es un componente electrónico basado en semiconductores que funciona como una pequeña bomba de calor. Por medio de la aplicación de un pequeño voltaje CD a un modulo termoelectrico, el calor será movido a través del modulo de un lado a otro. Una cara por lo tanto será enfriada mientras que la cara opuesta se calentara. Los dispositivos termoelectricos cuentan con diversas propiedades dependientes de la temperatura, las cuales se describen más adelante.

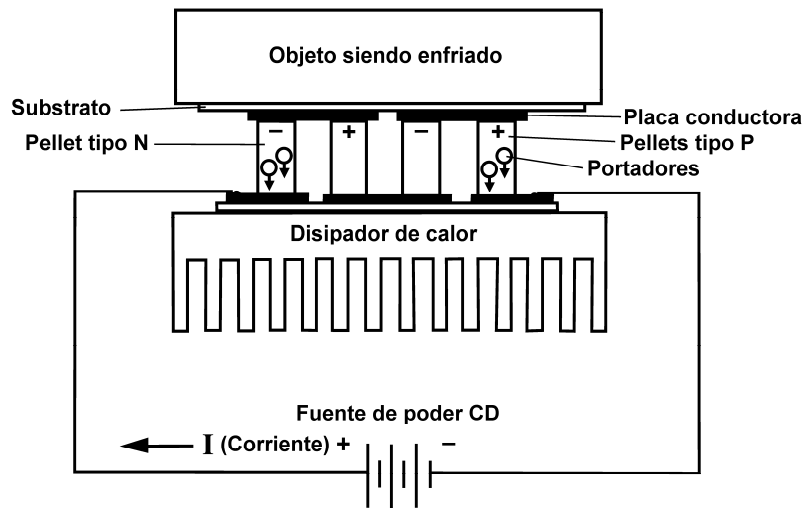


Figura 3.4. Diagrama general de una celda termoelectrica instalada.

Cuando un diferencial de temperatura se mantiene en un dispositivo termoelectrico de un lado a otro, se puede detectar un voltaje en las terminales de entrada. La magnitud del voltaje resultante, llamado fuerza electromotriz Seebeck, es proporcional a la magnitud de la diferencia de temperatura. El coeficiente Seebeck, en función de la temperatura, se expresa como un polinomio de tercer grado, el cual se muestra en la ecuación 3.36.

$$S_{MT} = s_1 T + \frac{s_2}{2} T^2 + \frac{s_3}{3} T^3 + \frac{s_4}{4} T^4 \quad (3.36)$$

S_{MT}	Coeficiente Seebeck
Donde: T	Temperatura (Kelvin)
s_1 a s_4	Coeficientes de polinomio

Para poder calcular el coeficiente Seebeck del modulo completo, se debe de evaluar la ecuación 3.36 con temperatura de lado frio y con temperatura de lado caliente. Una vez hecho lo anterior, se sustituyen los resultados en la ecuación 3.37.

$$S_M = \frac{S_{MTh} - S_{MTc}}{T_h - T_c} \quad (3.37)$$

	S_M	Coeficiente Seebeck de modulo ($V \cdot K^{-1}$)
	S_{MTh}	Factor Seebeck para lado caliente
Donde:	S_{MTc}	Factor Seebeck para lado frio
	T_h	Temperatura de lado caliente (Kelvin)
	T_c	Temperatura de lado frio (Kelvin)

La resistencia eléctrica de un modulo termoelectrico, como función de la temperatura, puede ser expresado como un polinomio de tercer orden, el cual se muestra en la ecuación 3.38.

$$R_{MTh} = r_1 T_h + \frac{r_2}{2} T_h^2 + \frac{r_3}{3} T_h^3 + \frac{r_4}{4} T_h^4 \quad (3.38)$$

	R_{MTh}	Factor de resistencia eléctrica para lado caliente
Donde:	T_h	Temperatura de lado caliente (Kelvin)
	r_1 a r_4	Coeficientes de polinomio

Para poder calcular la resistencia eléctrica del modulo completo, se debe de evaluar la ecuación 3.38 con temperatura de lado frio y con temperatura de lado caliente. Una vez hecho lo anterior, se sustituyen los resultados en la ecuación 3.39.

$$R_M = \frac{R_{MTh} - R_{MTc}}{T_h - T_c} \quad (3.39)$$

	R_M	Resistencia del modulo (Ω)
	R_{MTh}	Factor de resistencia para el lado caliente
Donde:	R_{MTc}	Factor de resistencia para el lado frio
	T_h	Temperatura de lado caliente (Kelvin)
	T_c	Temperatura de lado frio (Kelvin)

La conductividad térmica de un modulo termoeléctrico, en función de la temperatura, puede ser expresada como un polinomio de tercer orden, el cual se muestra en la ecuación 3.40.

$$K_{MTh} = k_1 T_h + \frac{k_2}{2} T_h^2 + \frac{k_3}{3} T_h^3 + \frac{k_4}{4} T_h^4 \quad (3.40)$$

	K_{MTh}	Factor de resistencia eléctrica para el lado caliente
Donde:	T_h	Temperatura de lado caliente (Kelvin)
	k_1 a k_4	Coefficientes de polinomio

Para poder calcular el coeficiente de conductividad térmica del modulo completo, se debe de evaluar la ecuación 3.40 con temperatura de lado frio y con temperatura de lado caliente. Una vez hecho lo anterior, se sustituyen los resultados en la ecuación 3.41.

$$K_M = \frac{K_{MTh} - K_{MTc}}{T_h - T_c} \quad (3.41)$$

	K_M	Conductividad térmica del modulo ($W \cdot K^{-1}$)
	K_{MTh}	Factor de conductividad térmica para lado caliente
Donde:	K_{MTc}	Factor de conductividad térmica para lado frio
	T_h	Temperatura de lado caliente (Kelvin)
	T_c	Temperatura de lado frio (Kelvin)

Los parámetros S_M , R_M , y K_M pertenecen a un modulo de 71 pares y 6 amperes. Para modelar una configuración diferente de modulo, es necesario aplicar un factor de conversión a cada uno de estos parámetros se describe en las ecuaciones 3.42, 3.43, y 3.44.

$$S_{new} = S_M \frac{N_{new}}{71} \quad (3.42)$$

	S_{new}	Coficiente Seebeck para el nuevo modulo
Donde:	S_M	Coficiente Seebeck para el modulo anterior
	N_{new}	Numero de pares en el nuevo modulo

$$R_{new} = R_M \left(\frac{6}{I_{new}} \right) \left(\frac{N_{new}}{71} \right) \quad (3.43)$$

	R_{new}	Resistencia eléctrica para el nuevo modulo
Donde:	R_M	Resistencia eléctrica para el modulo anterior
	I_{new}	Corriente máxima para el nuevo modulo
	N_{new}	Numero de pares en el nuevo modulo

$$K_{new} = K_M \left(\frac{I_{new}}{6} \right) \left(\frac{N_{new}}{71} \right) \quad (3.44)$$

	K_{new}	Conductividad térmica para el nuevo modulo
Donde:	K_M	Conductividad térmica para el modulo anterior
	I_{new}	Corriente máxima para el nuevo modulo
	N_{new}	Numero de pares en el nuevo modulo

La ecuación 3.45 describe el flujo de calor bombeado y generado por efecto Joule por el modulo en su lado caliente.

$$Q_h = S_{new} T_h I + 0.5 I^2 R_{new} - K_{new} (T_h - T_c) \quad (3.45)$$

	Q_h	Flujo de calor en el lado caliente (Watts)
	S_{new}	Coefficiente Seebeck para el modulo empleado ($V \cdot K^{-1}$)
	T_h	Temperatura de lado caliente (Kelvin)
Donde:	I	Corriente que circula por el modulo (Amperes)
	R_{new}	Resistencia eléctrica para el modulo empleado (Ω)
	K_{new}	Conductividad térmica para el modulo empleado ($W \cdot K^{-1}$)
	T_c	Temperatura de lado frio (Kelvin)

La ecuación 3.46 describe el flujo de calor bombeado por el modulo en su lado frio.

$$Q_c = S_{new} T_c I - 0.5 I^2 R_{new} - K_{new} (T_h - T_c) \quad (3.46)$$

	Q_c	Flujo de calor en el lado frio (Watts)
	S_{new}	Coefficiente Seebeck para el modulo empleado ($V \cdot K^{-1}$)
	T_c	Temperatura de lado frio (Kelvin)
Donde:	I	Corriente que circula por el modulo (Amperes)
	R_{new}	Resistencia eléctrica para el modulo empleado (Ω)
	K_{new}	Conductividad térmica para el modulo empleado ($W \cdot K^{-1}$)
	T_h	Temperatura de lado caliente (Kelvin)

Para poder conocer el voltaje de entrada requerido por el modulo termoelectrico, se recurre a la ecuación 3.47.

$$V_{in} = S_{new}(T_h - T_c) + IR_{new} \quad (3.47)$$

Donde:	V_{in}	Voltaje de entrada al modulo (Volts)
	S_{new}	Coefficiente Seebeck para el modulo empleado ($V \cdot K^{-1}$)
	T_h	Temperatura de lado caliente (Kelvin)
	T_c	Temperatura de lado frio (Kelvin)
	I	Corriente en que circula por el modulo (Amperes)
	R_{new}	Resistencia eléctrica del modulo empleado (Ω)

Para poder conocer la potencia eléctrica disipada por el modulo termoelectrico, se recurre a la ecuación 3.48.

$$P_{in} = V_{in}I \quad (3.48)$$

Donde:	P_{in}	Potencia eléctrica de entrada al modulo (Watts)
	V_{in}	Voltaje de entrada al modulo (Volts)
	I	Corriente en que circula por el modulo (Amperes)

Una vez que se pueden conocer los diversos parámetros de la celda termoelectrica con respecto a la temperatura, se realizaron los siguientes pasos:

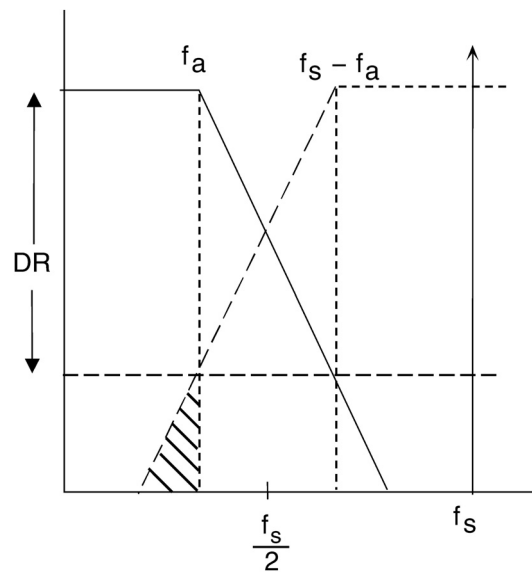
- Se fija una temperatura de lado caliente de la celda, correspondiente a un peor caso a temperatura ambiente.
- Se ajusta la temperatura de lado caliente de modo que el calor bombeado por el dispositivo sea igual al calor que ingresa al sistema de medición.
- Se diseña la fuente de alimentación de la celda termoelectrica y se dimensiona el disipador de calor y el ventilador para el lado caliente.

3.1.7. Filtrado analógico anti-solapamiento

Para poder filtrar las señales y evitar el solapamiento en la zona de interés, se recurrió al filtrado analógico. El muestreo de banda base implica que la señal al ser muestreada resida en la primera zona de Nyquist. Es importante notar que sin ningún

filtrado a la entrada del muestreador ideal, cualquier componente de frecuencia (ya sea señal o ruido) que caiga fuera del ancho de banda de la primer zona de Nyquist, se solapara de regreso en la primer zona de Nyquist. Por esta razón, se utiliza un filtro anti solapamiento en casi todas las aplicaciones en donde se utiliza un ADC muestreador y así, poder remover señales no deseadas.

Asumiendo que la mayor frecuencia de interés es f_a . El filtro anti solapamiento deja pasar señales de CD a f_a , mientras que atenúa señales por arriba de f_a . Asumiendo que la frecuencia de corte del filtro se escoge que sea igual a f_a . El efecto de la transición atenuación de mínimo a máximo en el intervalo dinámico (DR, Dynamic Range) se puede ver en la figura 3.5.



Atenuación de banda de rechazo = DR
 Banda de transición: f_a a $f_s - f_a$
 Frecuencia de corte: f_a

Figura 3.5. Banda base de filtro anti alias.

Asumiendo que la señal de entrada tiene componentes en frecuencias bien por arriba de la máxima frecuencia de interés, f_a . El diagrama muestra como componentes de frecuencia a escala completa por arriba de $f_s - f_a$ se alían de regreso al ancho de banda de DC a f_a . Estos componentes aliados son indistinguibles de las señales reales y por lo tanto limitan el intervalo dinámico al valor en el diagrama que se muestra como DR.

La banda de transición se encuentra por lo tanto determinada por la frecuencia de corte f_a , la frecuencia de banda de rechazo $f_s - f_a$, y la atenuación de la banda de rechazo, DR. El intervalo dinámico requerido del sistema se escoge basándose en los requerimientos de fidelidad de la señal.

El filtro diseñado en este trabajo, es un Butterworth de segundo orden. Esta clase de filtro presenta el mejor compromiso entre la atenuación y la respuesta de fase. No presenta rizo en la banda de paso o en la banda de rechazo. El filtro Butterworth logra su planura a costa de una región de transición relativamente amplia, con características transitorias promedio. El proceso de diseño es como sigue:

- Se escoge la implementación de filtro que se adapte a las necesidades.
- Mediante las ecuaciones 3.49 y 3.50, crear la función de transferencia del filtro.
- Se evalúa la función de transferencia del filtro en la frecuencia de banda de rechazo ($f_s - f_a$), y se comprueba que la atenuación generada por el filtro a esta frecuencia, sea mayor o igual a la atenuación requerida en el intervalo dinámico, para que no se vea afectada la fidelidad de la señal.

$$\omega_0 = 2\pi F_0 \quad (3.49)$$

Donde:	ω_0	Frecuencia de corte ($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$)
	F_0	Frecuencia de corte (Hz)

$$H(s) = \frac{\omega_0^2}{s^2 + \alpha\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (3.50)$$

Donde:	ω_0	Frecuencia de corte ($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$)
	α	(Q^{-1}) coeficiente de amortiguamiento

Ahora que se sabe que es lo que se quiere construir, se debe de decidir cómo se quiere construir. Esto significa que es necesario decidir cuál de las topologías de filtros usar. La topología empleada en este trabajo, es la configuración Sallen-Key, también conocida como control de voltaje fuente de voltaje (VCVS, Voltaje Control voltaje

Source), fue primeramente introducida en 1955 por R. P. Sallen y E. L. Key. Es una de las topologías de filtro más ampliamente empleadas y se puede ver en la figura 3.3. Una de las razones de su popularidad es que esta configuración muestra la menor dependencia del desempeño del filtro en el amplificador operacional. Esto es debido al hecho de que el amplificador operacional se encuentra configurado como amplificador, y no como integrador, lo cual minimiza los requerimientos de ganancia de ancho de banda del amplificador operacional. A partir de esto, se infiere que para un amplificador operacional dado, es posible diseñar un filtro para mayor frecuencia que con otras topologías debido a que el producto de la ganancia de ancho de banda del amplificador operacional no limitara el desempeño del filtro como si este estuviera configurado como integrador. Se mantiene la fase de la señal a través del filtro (configuración no inversora).

Otra ventaja de esta configuración es que la tasa de valor de la resistencia mayor al valor de la resistencia menor y la tasa del valor del capacitor mayor al valor del capacitor menor (dispersión de componentes), es baja, lo cual facilita la manufacturabilidad. Los términos de frecuencia y Q son en cierto punto independientes, pero son muy sensibles a parámetros de ganancia. El Sallen-Key es muy sensible en su factor Q a los valores de los elementos, especialmente para secciones de elevada Q.

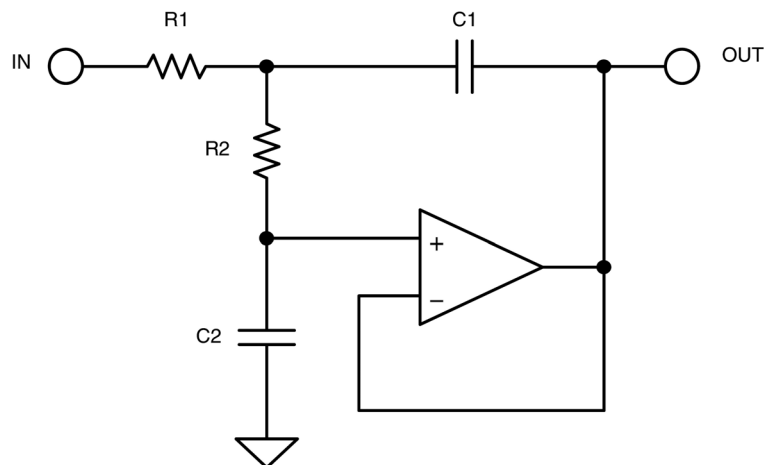


Figura 3.6. Topología de implementación de filtro de segundo orden Sallen-Key.

Función de transferencia del filtro sellen-Key en función de los componentes que lo integran, ecuación 3.51.

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{s^2 + \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 C_1} s + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (3.51)$$

Donde:	V_o	Voltaje de entrada (Volts)
	V_i	Voltaje de salida (Volts)
	R_1 a R_2	Resistencias de configuración de filtro (Ω)
	C_1 a C_2	Capacitores de configuración de filtro (F)

El procedimiento de implementación del filtro Sallen- Key, se realizo como sigue:

- Se escoge C_1 .
- Se calcula C_2 mediante la ecuación 3.52.
- Se calcula R_1 mediante la ecuación 3.53.
- Se calcula R_2 mediante la ecuación 3.54.

$$C_2 = \frac{\alpha^2}{4} C_1 \quad (3.52)$$

Donde:	α	(Q^{-1}) coeficiente de amortiguamiento
	C_1 a C_2	Capacitores de configuración de filtro (F)

$$R_1 = \frac{2}{2\pi F_0 \alpha C_1} \quad (3.53)$$

Donde:	F_o	Frecuencia de corte (Hz)
	α	(Q^{-1}) coeficiente de amortiguamiento
	R_1	Resistencia de configuración de filtro (Ω)
	C_1	Capacitor de configuración de filtro (F)

$$R_2 = \frac{1}{\alpha \pi F_0 C_1} \quad (3.54)$$

Donde:	F_0	Frecuencia de corte (Hz)
	α	(Q^{-1}) coeficiente de amortiguamiento
	R_2	Resistencia de configuración de filtro (Ω)
	C_1	Capacitor de configuración de filtro (F)

3.1.8. Etapa de comunicación con la computadora

Con el fin de poder establecer comunicación con la computadora se escogió el estándar RS-232, debido a su facilidad de implementación. El sistema de comunicación RS-232 es asíncrono. Esto significa que no se envía señal de reloj con el dato. Cada palabra es sincronizada utilizando su bit de inicio, y un reloj interno en cada lado mantienen administran los tiempos. El diagrama en la Figura 3.7, muestra la forma de onda esperada del UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter) cuando se utiliza el formato común 8N1 (8 bits de datos, sin paridad, y un bit de alto). La línea RS-232, cuando se encuentra inactiva se encuentra en “1” lógico. Una transmisión comienza con un bit de inicio que es un “0” lógico. Entonces cada bit es mandado a través de la línea, uno a la vez. El bit menos significativo es mandado al principio. Un bit de alto (“1” lógico) es agregado a la señal para finalizar la transmisión. El diagrama muestra el siguiente bit después del bit de paro en “0” lógico. Esto significa que sigue otra palabra, y este es su bit de inicio. Si no hay otro siguiente dato entonces la línea de recepción permanecerá en su estado inactivo (“1” lógico).

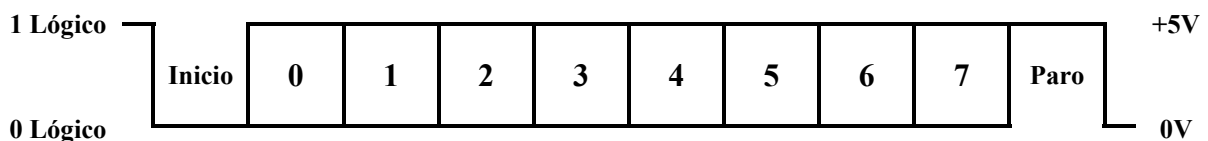


Figura 3.7. Forma de onda lógica serial TTL/CMOS.

3.1.9. Conversión de datos

Con el objeto de digitalizar las señales de presión y temperatura para su procesamiento y análisis, es necesario incorporar un sistema de adquisición de datos que cumpla con los estándares industriales y las restricciones propias del diseño. El sistema de adquisición de datos debe tener de 12 bits (estándar industrial) para garantizar una relación señal a ruido de 72 dB en la cuantización. El sistema debe de contar con un sistema de muestreo y retención para minimizar el error de cuantización. También se debe de contar con un sistema de adquisición simultáneo de los tres canales necesarios para poder digitalizar las tres señales de donde se extrae la información del número de moles y para poder realizar control. Finalmente, el sistema debe de contar con una frecuencia de muestreo lo suficiente mente alta como para poder relajar los requerimientos del filtrado analógico, y también debe de ser constante en el tiempo, con el fin de no generar errores en los sistemas de procesamiento de señal.

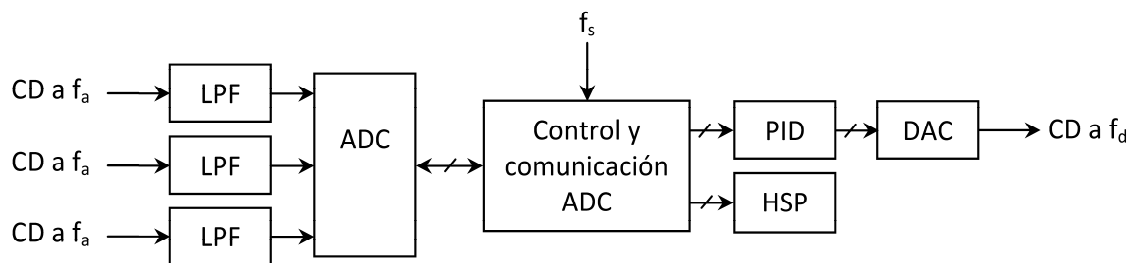


Figura 3.8. Diagrama de sistema de muestreo y distribución de datos.

Un diagrama de bloques del sistema de adquisición de datos se muestra en la Figura 3.8. Previo a una conversión analógica a digital, la señal analógica pasa a través de un filtro pasa-bajas (LPF). Por medio de este filtrado se atenúan señales que no se encuentran dentro del ancho de banda de interés, y con esto, se previene el solapamiento de frecuencias. Después del filtrado analógico, se cuenta con un convertidor analógico digital (ADC), el cual se encuentra controlado por un módulo descrito en hardware, el cual hace que el ADC muestree con una frecuencia f_s . Los datos recolectados por el módulo de control, pasan en parte al módulo PID, y en parte al módulo HSP. El módulo PID se encarga de realizar el control de temperatura y envía su comando de control a

través de un DAC que envía una señal con frecuencia entre f_d y f_s con una frecuencia de actualización f_s . El modulo HSP se encarga de los cálculos necesarios para obtener la fracción de metano.

3.1.10. Control PID de temperatura

El controlador PID constituye, en sus distintas versiones, la solución más universalmente aceptada para los problemas de control en la industria. Se calcula que más del 95% de los controladores instalados, ya sean estos analógicos o digitales, constituyen una u otra modificación del algoritmo PID. En la figura 3.9 se puede observar el esquema a bloques de una planta con un controlados PID y una retroalimentación negativa.

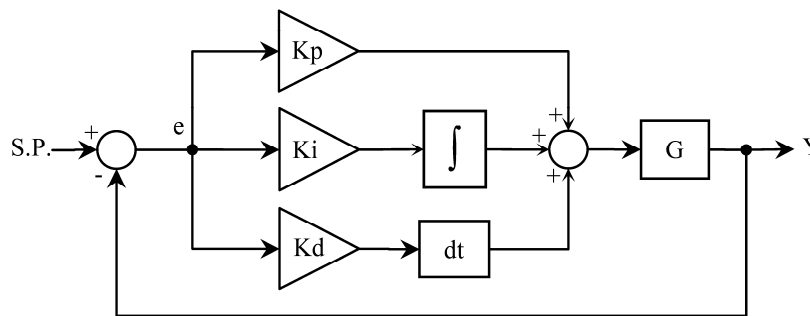


Figura 3.9. Esquema de control PID.

En la ecuación 3.55 se puede ver la descripción matemática del PID en transformada de Laplace.

$$Y(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \right) e \quad (3.55)$$

Y	Salida del sistema
K_p	Constante proporcional
Donde: K_i	Constante de la integral
K_d	Constante de la derivada
e	Error

La descripción de un controlador PID ya reducida a ecuaciones de diferencias se puede ver en la ecuación 3.56.

$$Y(k) = \left(k_p + k_i T + \frac{k_d}{T} \right) E(k) + \left(-k_p - 2 \frac{k_d}{T} \right) E(k-1) + \left(\frac{k_d}{T} \right) E(k-2) + Y(k-1) \quad (3.56)$$

Donde:	Y	Salida del sistema
	K_p	Constante proporcional
	K_i	Constante de la integral
	K_d	Constante de la derivada
	E	Error
	T	Tasa de muestreo

Este tipo de operación involucra para el cálculo de la salida la operación con un valor anterior en el tiempo de dicha salida, esta clase de estructura corresponde a un filtro IIR o de respuesta infinita al impulso.

3.1.11. Sistema digital de control, cálculo de moles y linealización polinomial

Este modulo cuenta con una maquina de estados principal, que se encarga de coordinar los pasos necesarios para llevar a cabo un proceso exitoso de medición. Los pasos se pueden ver en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Acciones de control llevadas a cabo por el sistema de control.

Estado	Acción
1	Válvula de venteo abierta.
2	Se almacena el valor de nivel de líquido de enfriamiento para utilizarlo como cero elevado.
3	Se bloquea la válvula de venteo y se abre la válvula de ingreso de biogás junto con su mini-compresor de muestreo de gas hasta que se complete la muestra de 100 cm ³ .
4	Se permite al sistema que se estabilice por 10 segundos.
5	Se calcula el número de moles que ingresaron con la muestra y se almacena este valor.
6	Se realiza el proceso de absorción durante 20 minutos.
7	Se permite al sistema que se estabilice por 10 segundos.
8	Se calcula el número de moles de gas que quedaron en la muestra gaseosa después de la absorción.
9	Se utiliza el valor almacenado del número de moles que ingresaron con la muestra, en conjunto con el valor de moles de gas que permanecen en la muestra después de la absorción para proporcionar el porcentaje de metano que existe en la muestra.
10	Por medio de linealización polinomial se linealiza la lectura proporcionada por el sensor.

Para llevar a cabo el cálculo de la cantidad de moles, se utilizó la ecuación de los gases ideales (ecuación 3. 57). Con el fin de poder llevar a cabo menos operaciones matemáticas en hardware, se realizó el pre-cálculo de los factores considerados constantes.

$$n = \frac{PV}{RT} = PVX \quad (3.57)$$

Donde:	n	Numero de moles en muestra
	P	Presión de muestra
	V	Volumen de muestra
	R	Contante de Avogadro
	T	Temperatura de la muestra
	X	$1/(RT)$

El método más común para linealizar la salida de un sistema de medición es por medio de la aplicación de una función matemática conocida como polinomio. Un polinomio es una ecuación simple que consiste de la suma de varios términos separados. Con el propósito de la calibración de un sensor podemos definir un polinomio como una ecuación que describe una variable dinámica, y , como es en este caso la fracción de metano (la cual se quiere medir), la cual, varía en relación con la correspondiente señal transformada, x (voltaje de salida o lectura de un ADC). Cada uno de los términos consiste de alguna función conocida de x multiplicada por un coeficiente desconocido. Si se pudiese determinar los coeficientes de una función polinomial que de manera muy cercana, se ajuste a un conjunto de puntos de calibración de referencia medidos, sería posible calcular de manera muy precisa un valor de la variable física, y , partiendo de cualquier lectura x de un ADC.

La expresión general de los polinomios de una sola variable se muestra en la ecuación 3.58.

$$y(x) = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + a_{n-2} x^{n-2} + \dots + a_2 x^2 + a_1 x + a_0 \quad (3.58)$$

Donde:	x	Variable a ser linealizada
	a	Coficiente del polinomio
	n	Grado del polinomio
	$y(x)$	Variable linealizada.

3.1.12. Evaluación de precisión y exactitud

Con el fin de poder evaluar el desempeño del sensor, se utilizaron algunas herramientas estadísticas, las cuales se describen a continuación.

Precisión

Medida de variabilidad de mediciones hechas repetidamente y bajo las mismas condiciones. Resultado del agrupamiento, indicando mediciones próximas a un resultado obtenido. Para la obtención de dicho parámetro se aplican las siguientes formulas:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (3.57)$$

Donde:	\bar{x}	Promedio o media muestral
	n	Numero de datos
	i	Índice
	x	Datos

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \quad (3.57)$$

Donde:	s^2	Varianza muestral
	n	Numero de datos
	i	Índice
	x	Datos
	\bar{x}	Promedio o media muestral

$$s = \sqrt{s^2} \quad (3.57)$$

Donde:	s	Desviación estándar
	s^2	Varianza muestral

$$c.v. = \frac{s}{\bar{x}}(100\%) \quad (3.57)$$

	$c.v.$	Coefficiente de variación
Donde:	s	Desviación estándar
	\bar{x}	Promedio o media muestral

Exactitud

Aptitud de instrumento de medición de dar respuestas próximas a un valor verdadero (CENAM, 1996). Para la obtención de este parámetro se aplican las siguientes formulas:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (3.57)$$

	\bar{x}	Promedio o media muestral
Donde:	n	Numero de datos
	i	Índice
	x	Datos

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \quad (3.57)$$

	s^2	Varianza muestral
Donde:	n	Numero de datos
	i	Índice
	x	Datos
	\bar{x}	Promedio o media muestral

$$s = \sqrt{s^2} \quad (3.57)$$

Donde:	s	Desviación estándar
	s^2	Varianza muestral

$$\bar{x} \pm t_{\alpha/2, n-1} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (3.57)$$

Donde:	\bar{x}	Promedio o media muestral
	t	Valor critico $t_{\alpha, v}$ para la distribución t
	α	Intervalo de confianza $100(1 - \alpha)\%$
	n	Numero de datos
	s	Desviación estándar

Capítulo 4

RESULTADOS

En el presente capítulo se muestra el desarrollo del sistema que permite la medición de la fracción de metano contenido en un flujo de biogás, el cual se basa en la diferencia en dilución en agua de diferentes especies gaseosas. El desarrollo se ha dividido en tres partes principales que son: cálculos de las características del dispositivo, desarrollo del prototipo y pruebas.

Durante el proceso de desarrollo se han utilizado los métodos analítico y empírico en diversas partes del trabajo. La validación de las aseveraciones obtenidas por métodos analíticos se justifica sobre la base de trabajos previos y a desarrollos originales. La validación de las propuestas empíricas se ha basado en experimentación, partiendo de proposiciones citadas en la literatura.

Cabe recalcar que el desarrollo ha dado como resultado varias aportaciones originales de trascendencia relevante para la comunidad tecnológica de las áreas de sensores químicos y de procesos biológicos como es la digestión anaerobia.

Parte del desarrollo ha involucrado el uso de conocimientos previamente desarrollados y probados y por otra parte ha requerido del desarrollo de herramientas propias para completar la solución. En esta forma conjunta, ambos aspectos han contribuido a cumplir con el objetivo principal de desarrollar un sistema para la determinación de la fracción de metano contenido en un flujo de biogás basado en la diferencia de dilución de gases en agua para reactores de digestión anaerobia, satisfaciendo los requisitos del planteamiento original en cuanto a la relación costo desempeño.

4.1. Desarrollo del prototipo

En la figura 4.1, se puede ver un esquema del dispositivo diseñado. En donde se puede observar los diversos componentes que integran al dispositivo.

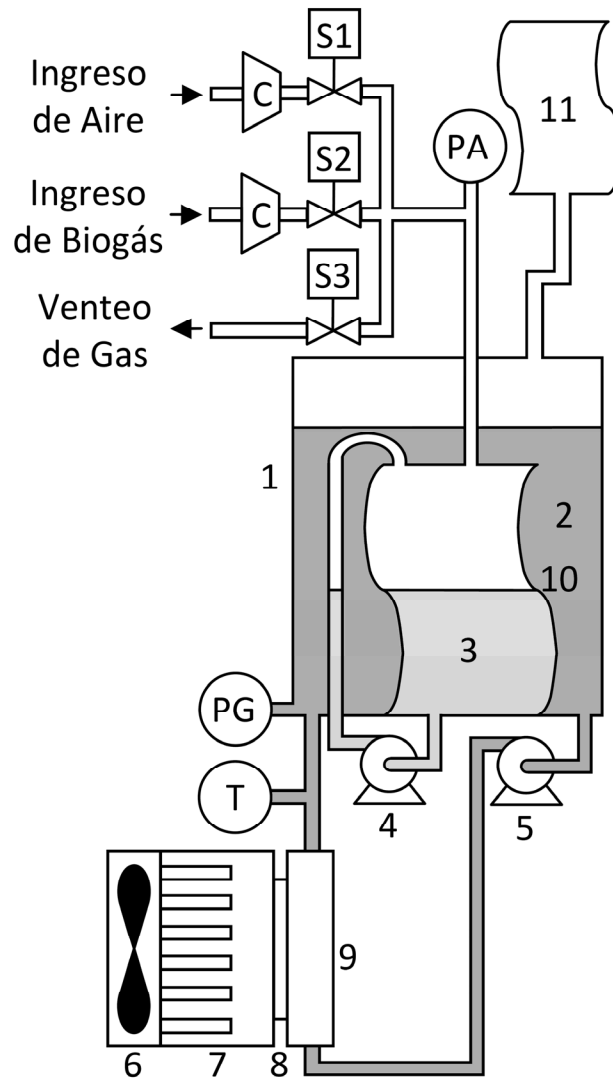


Fig. 4.1. Esquema del dispositivo desarrollado.

Los componentes que integral al sistema, se describen brevemente a continuación.

1. Recipiente o contenedor: Este componente se encarga de mantener una estructura para el cuerpo del sensor, una estructura de soporte para los componentes interiores y una barrera física al medio ambiente exterior.
2. Líquido refrigerante: Este líquido se encuentra continuamente en movimiento y a temperatura controlada. Esto permite mantener estable el factor de dilución del agua de absorción. Este líquido también funciona como medio de medición del volumen de muestra.
3. Líquido de absorción: Este líquido, se encuentra en el interior de la celda de medición, y se encuentra en contacto directo con la muestra de gas tomada. Este líquido es el encargado de absorber los gases muestreados.
4. Bomba de recirculación de líquido de absorción: Esta bomba se encarga de mover el líquido de absorción para promover el contacto entre fases.
5. Bomba de recirculación de líquido de refrigeración: El movimiento generado por este dispositivo, fuerza el líquido a través del intercambiador de calor y mantiene homogénea la temperatura en el contenedor.
6. Ventilador: Este dispositivo fuerza aire del ambiente a través de las láminas del intercambiador de calor, ayudando a retirar el calor de este.
7. Disipador de calor: Este componente incrementa el área de contacto entre el ambiente y el lado caliente del dispositivo termoeléctrico, permitiendo la transferencia de calor de este, al ambiente. Ayudando a evitar un incremento de temperatura en el semiconductor.
8. Módulo termoeléctrico: Bomba de calor que permite mantener al líquido de refrigeración a una temperatura menor a la temperatura ambiente.
9. Intercambiador de calor: Este dispositivo permite la transferencia de calor del líquido de refrigeración al lado frío del módulo termoeléctrico.
10. Celda de medición: Este componente es un reservorio flexible en donde se lleva a cabo la absorción de gas por el líquido de absorción, además de que permite la medición del volumen de gas que ingresa y restante.

- 11. Reservorio de expansión: permite la expansión de la celda de medición.
- S1. Válvula solenoide de suministro de aire: Esta válvula permite el ingreso del aire necesario para la regeneración del líquido de absorción.
- S2. Válvula solenoide de ingreso de biogás: Esta válvula permite el ingreso del biogás a ser analizado.
- S3. Válvula solenoide de liberación de gases: Esta válvula permite la liberación del gas en el interior de la celda de medición.
- C. Mini compresores: Estos mini compresores fuerza el ingreso del aire o biogás al interior de la celda de medición.
- PA. Sensor de presión absoluta: Este dispositivo mide la presión a la cual se encuentra sometido el gas en el interior de la celda de medición.
- PG. Sensor de presión manométrica: Este dispositivo mide la presión de columna de agua de refrigeración, con lo cual se puede conocer el volumen del gas en el interior de la celda volumétrica.
- T. Sensor de temperatura: Este dispositivo mide la temperatura del agua de refrigeración, y permite realizar una acción de control retroalimentado.

Para poder realizar la medición de la fracción de metano, se debe de realizar un proceso de cuatro etapas. Estas etapas son: medición de la cantidad de moles que ingresan al dispositivo como muestra gaseosa, absorción de gases, medición de la cantidad de moles restantes de la muestra gaseosa después de la absorción de gases, y regeneración. Con el fin de poder reducir al máximo el tamaño del dispositivo, se integraron estas cuatro etapas en una sola. Además, se integro un sistema de control de temperatura, que mantiene la temperatura constante.

El sistema se compone de un reservorio flexible o celda de medición, fabricada en cloruro de polivinilo (PVC, polyvinyl chloride) PL-146, con capacidad de 250 cm³. El reservorio almacena en su interior el agua de absorción, en cantidad suficiente para disolver una muestra compuesta exclusivamente de CO₂, considerado este, el peor caso. La celda de medición además de tener la capacidad volumétrica para almacenar el agua de absorción, también tiene la capacidad para contener en su interior, una muestra de gas.

La celda de medición cuenta con una entrada en su parte superior que permite el ingreso y evacuación tanto de la muestra como del aire de regeneración. Para poder realizar la administración de flujos de gas en el sistema, se utilizaron 3 válvulas 2 vías - 2 posiciones. Para mover el aire de regeneración y la muestra de biogás, se utilizó una mini-bomba para gases KPV-20A de la marca CLARK. Esta clase de bombas incorporan dos mini-fuelles operados por un brazo oscilante unido a una flecha de motor excéntrica, con una función simple y confiable. Entre sus características se puede mencionar, un flujo máximo de $3.0 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ sin presión, y un flujo máximo de $1.0 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ con una presión de 10 KPa.

La celda de medición cuenta en su parte inferior, con una salida de agua de absorción, que permite que una mini-bomba tome el líquido y lo haga ingresar por la parte superior de la celda de medición, promoviendo el contacto entre fases y por ende favoreciendo el intercambio gaseoso. La celda de medición se encuentra dentro de un recipiente rígido construido con acrílico o poli (metil metacrilato). El recipiente se encuentra hecho con tubo de acrílico de $\frac{1}{4}$ de pulgada de grosor, con una medida de 3.5 pulgadas de diámetro exterior y 10 pulgadas de largo. Este recipiente se encuentra inundado de agua. El agua en el interior del recipiente tiene la función de elevar su nivel al momento de que la muestra ingresa a la celda de medición, con lo que se puede medir el volumen de gas en el interior de la celda de medición. Otra de las funciones del agua en el interior del recipiente, es el de servir de refrigerante, para poder mantener el sistema en una temperatura controlada de 288.15 K (15 °C). El líquido refrigerante se encuentra en constante movimiento por medio de una mini-bomba, para mantener una temperatura homogénea en el interior del recipiente.

Para permitir la expansión del reservorio flexible en el interior del recipiente rígido, y al mismo tiempo, aislar el agua de refrigeración de la atmósfera, se colocó un reservorio flexible en la parte superior del recipiente rígido. Dicho reservorio, al servir como barrera entre la atmósfera y el agua de refrigeración, promueve la permanencia del líquido de refrigeración en el recipiente, minimizando las pérdidas por evaporación.

Para poder conocer el nivel de líquido en el interior del recipiente, y por ende, el volumen desplazado por el gas, se utilizó un sensor de presión manométrica 26PC01SMT el cual se encuentra compensado por temperatura, puede realizar sensado diferencial húmedo, con un tamaño muy reducido, puerto por el cual puede pasar el fluido, trayectoria de flujo con un mínimo de espacio muerto, operativo después de exposición a condiciones de congelamiento. Este dispositivo se alimenta con 10 VCD, Su salida no es amplificada y es de $16.7 \text{ mV} \cdot \text{psi}^{-1}$, su intervalo de medida es de 0 a 1 psi (0 a $0.000488 \text{ Kg} \cdot \text{cm}^{-2}$), y presenta una repetibilidad e histéresis de $\pm 0.2\%$ span

Para poder conocer la presión del gas en el interior de la celda de medición, y así poder llevar a cabo el cálculo de la cantidad de moles de gas que ingresan al sistema, se utiliza para tal fin un elemento primario de medición hecho de acero inoxidable, y completamente aislado del proceso, de la marca MSI, modelo US381-000005-030PA, dicho dispositivo permite ser alimentado con un intervalo de voltaje que va desde los 10V a los 30V de corriente directa, la salida de este dispositivo es de 4 a 20 mA, el intervalo de medición de este dispositivo es de 0 a 30 psi de presión absoluta, su precisión es de $\pm 0.15\%$ de span a temperatura ambiente de cuarto, cero de offset en $\pm 1\%$ del span, tolerancia de span de $\pm 1\%$ de span, estabilidad a largo plazo de 0.1% de span completo para un año, su intervalo de temperatura compensada es de -20° a 85° C .

Para poder conocer la temperatura del agua de refrigeración, se seleccionó como elemento primario de medición el sensor LM35, el cual es un dispositivo de tres terminales que produce un voltaje de salida con una sensibilidad de $10 \text{ mV}/^\circ\text{C}$, por consiguiente el voltaje de salida nominal es de 250 mV a 25°C y 1.000 V a 100°C . El LM35 tiene una precisión de $\pm 1^\circ\text{C}$ en un intervalo de medición de -55°C a $+150^\circ\text{C}$.

Para mover el agua de enfriamiento y el agua de absorción, se utilizaron dos mini-bombas para líquido, de tipo centrífugo. Su aplicación principal, es en la industria automotriz.

4.1.1. Cálculo de moles de agua para dilución de muestra

Cálculo de cantidad de moles de gas que componen la muestra:

Entrada:	P (atm):	0.78947368	
	V (Litros):	0.1	
	R (L·atm·K ⁻¹ ·mol ⁻¹):	0.082057	
	T (Kelvin):	288.15	
Ecuación:		$n = \frac{PV}{RT}$	(3.2)
Resultado:	n (moles):	0.0033389	

Cálculo de moles necesarios de agua de absorción para disolver una muestra compuesta únicamente de CO₂ por ser este el peor caso:

Entrada:	n _{CO2} (Moles):	0.0033389	
	X _{CO2} :	0.000648158	
Ecuación:		$n_{H_2O} = \frac{n_{CO_2} - n_{CO_2} X_{CO_2}}{X_{CO_2}}$	(3.4)
Resultado:	n _{H2O} (moles):	5.148029	

4.1.2. Cálculo de dilución de muestra

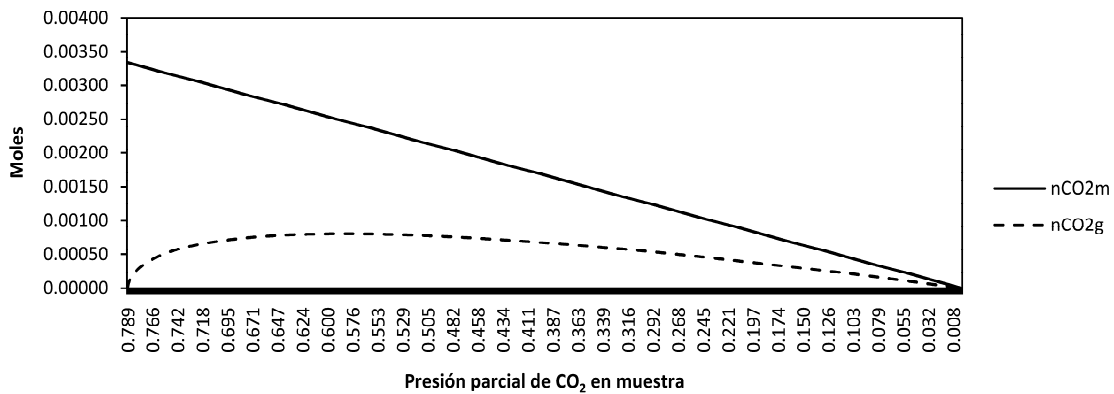
La ecuación 3.21 representa el cálculo de la cantidad de moles de CO₂ contenidos en la muestra, que se disuelven en el agua de absorción, una vez que se alcanza el equilibrio con respecto a la presión parcial inicial de esta especie en la muestra compuesta por una mezcla binaria de CO₂ y CH₄. La figura 4.2 muestra la cantidad de moles que ingresan al sistema de CO₂ y la cantidad de moles de CO₂ que permanecen en la fase gaseosa con respecto a la presión parcial del CO₂ al ingresar la muestra.

	n_{CH_4m} (Moles):	0 - 0.0033389
	X_{CO_2} :	0.000648158
Entrada:	n_{CO_2m} (Moles):	0.0033389 - 0
	X_{CH_4} :	0.0000246474
	n_{H_2O} (Moles):	5.148029195

Ecuación:

$$n_{CO_2} = \frac{\left(\left(n_{CH_4m} X_{CO_2} + n_{CO_2m} X_{CO_2} - n_{CH_4m} X_{CH_4} X_{CO_2} \right) \pm \sqrt{\left(-n_{CH_4m} X_{CO_2} - n_{CO_2m} X_{CO_2} + n_{CH_4m} X_{CH_4} X_{CO_2} \right)^2 + \left(+n_{H_2O} X_{CH_4} X_{CO_2} + n_{CO_2m} X_{CO_2}^2 - n_{H_2O} X_{CO_2}^2 \right)} \right)}{2 \left(-X_{CH_4} + X_{CO_2} + X_{CH_4} X_{CO_2} - X_{CO_2}^2 \right)} \quad (3.21)$$

Resultado: n_{CO_2} (moles): Figura 3.11.



n_{CO_2m} : Cantidad de moles de CO₂ que ingresan con la muestra.

n_{CO_2g} : Cantidad de moles de CO₂ que permanecen sin disolver en la fase gaseosa.

Figura 4.2. Grafica del estado inicial y final de la cantidad de moles de CO₂ en la muestra gaseosa.

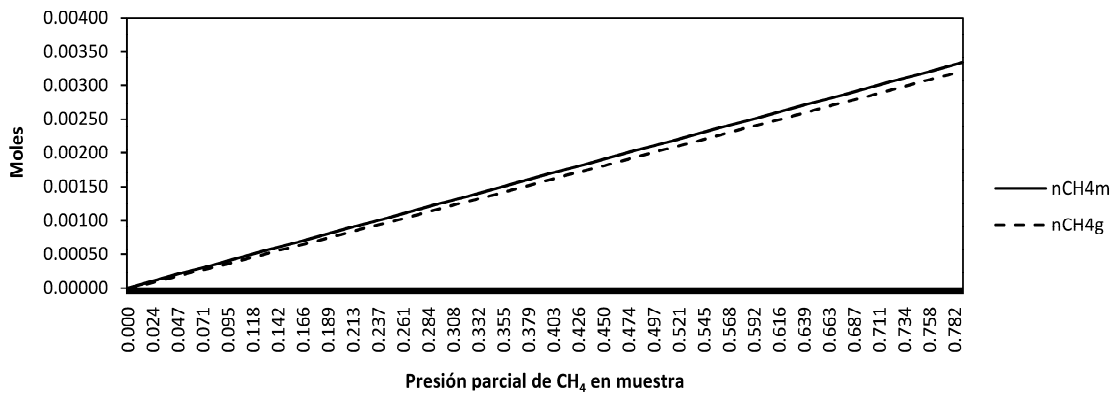
La ecuación 3.22 representa el cálculo de la cantidad de moles de CH₄ contenidos en la muestra, que se disuelven en el agua de absorción, una vez que se alcanza el equilibrio con respecto a la presión parcial inicial de esta especie en la muestra compuesta por una mezcla binaria de CO₂ y CH₄. La figura 4.3 muestra la cantidad de moles que ingresan al sistema de CH₄ y la cantidad de moles de CH₄ que permanecen en la fase gaseosa con respecto a la presión parcial del CH₄ al ingresar la muestra.

	n_{CH4m} (Moles):	$0 - 0.0033389$
	X_{CO2} :	0.000648158
Entrada:	n_{CO2m} (Moles):	$0.004229273 - 0$
	X_{CH4} :	0.0000246474
	n_{H2O} (Moles):	5.148029195

Ecuación:

$$n_{CH4} = \frac{\left(\left(n_{CH4m} X_{CH4} + n_{CO2m} X_{CH4} - n_{CO2m} X_{CH4} X_{CO2} \right) \pm \sqrt{\left(-n_{CH4m} X_{CH4} - n_{CO2m} X_{CH4} + n_{CO2m} X_{CH4} X_{CO2} \right)^2 + n_{H2O} X_{CH4}^2} \right)}{2 \left(X_{CH4} - X_{CO2} + X_{CH4} X_{CO2} - X_{CH4}^2 \right)} \quad (3.22)$$

Resultado: n_{CH4} (moles): Figura 3.12.



nCH_{4m}: Cantidad de moles de CH₄ que ingresan con la muestra.
nCH_{4g}: Cantidad de moles de CH₄ que permanecen sin disolver en la fase gaseosa.

Figura 4.3. Grafica del estado inicial y final de la cantidad de moles de CH₄ en la muestra gaseosa.

4.1.3. Calculo de moles de gases disueltos en la regeneración

La ecuación 3.27 describe el cálculo de la cantidad de moles disueltos de O₂ en el agua de absorción después de la regeneración.

	n_{H_2O} (Moles):	5.148029195
	P_{O_2p} (Atmosferas):	0.165789473
Entrada:	X_{O_2} :	0.000021758
	P_{N_2p} (Atmosferas):	0.61578947
	X_{N_2} :	0.000010942

Ecuación:
$$n_{O_2} = \frac{n_{H_2O} P_{O_2p} X_{O_2}}{1 - P_{N_2p} X_{N_2} - P_{O_2p} X_{O_2}} \quad (3.27)$$

Resultado:	n_{O_2} (moles):	0.00001857
------------	--------------------	------------

La ecuación 3.28 describe el cálculo de la cantidad de moles disueltos de N_2 en el agua de absorción después de la regeneración.

	n_{H_2O} (Moles):	5.148029195
	P_{N_2p} (Atmosferas):	0.61578947
Entrada:	X_{N_2} :	0.000010942
	P_{O_2p} (Atmosferas):	0.165789473
	X_{O_2} :	0.000021758

Ecuación:
$$n_{N_2} = \frac{n_{H_2O} P_{N_2p} X_{N_2}}{1 - P_{N_2p} X_{N_2} - P_{O_2p} X_{O_2}} \quad (3.28)$$

Resultado:	n_{N_2} (moles):	0.000034688
------------	--------------------	-------------

Seis respuestas del modelo matemático con diferentes cantidades de líquido de absorción además de la respuesta ideal o respuesta perfecta se muestran en la figura 4.4, en donde CH4_0 es la respuesta sin líquido de absorción, CH4_2 es la respuesta con dos moles de agua, CH4_4 es la respuesta con cuatro moles de agua, CH4_5.148 es la respuesta con el número de moles de agua calculados por medio de la ecuación 3.4, CH4_6 es la respuesta con seis moles de agua, CH4_8 es la respuesta del modelo con ocho moles de agua, CH4_10 es la respuesta del modelo empleando diez moles de agua, e IDEAL es la gráfica de la respuesta perfecta.

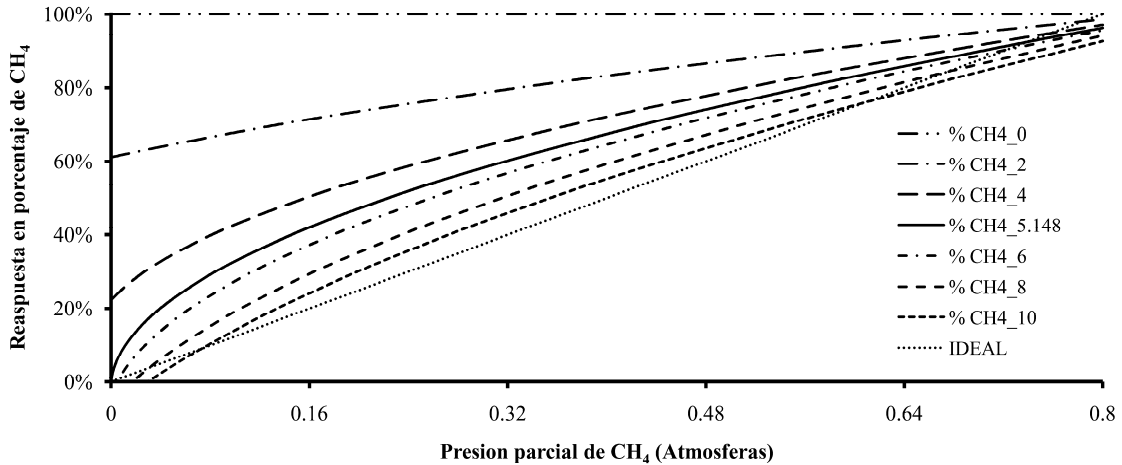


Figura 4.4. Se muestran siete graficas de la respuesta del modelo matemático con diferentes cantidades de liquido de absorción en moles, donde: CH4_0 con 0 moles, CH4_2 con 2 moles, CH4_4 con 4 moles, CH4_5.148 con 5.148 moles, CH4_6 con 6 moles, CH4_8 con 8 moles, y CH4_10 con 10 moles, además de la grafica IDEAL, la cual muestra la respuesta perfecta.

Cuando no hay líquido de absorción presente (grafica CH4_0), el dato obtenido del modelo es constante a lo largo de todo el intervalo de concentraciones de CH₄, como si la muestra se encontrara compuesta exclusivamente de CH₄, debido a que hay un mínimo de absorción. En la grafica CH4_2, el modelo tiene una cantidad teórica de dos moles de líquido de absorción; la curva inicia en un 60%, indicando que la cantidad de líquido de absorción no es suficiente, y la sensibilidad del sistema se veía afectada. Con una cantidad de liquido de absorción de cuatro moles (grafica CH4_4), la curva comienza en 20%, indicando que la cantidad de liquido de absorción es aún insuficiente para alcanzar la máxima sensibilidad. La grafica CH4_5.148 muestra la respuesta del modelo con 5.148 moles de líquido de absorción, la cual, es la cantidad mínima de líquido de absorción necesaria para absorber el 100% de una muestra compuesta exclusivamente de CO₂ (ecuación 3.4). En este caso, la grafica ya comienza a partir del 0%. Cuando existen seis moles de líquido de absorción (Grafica CH4_6), el sistema comienza a mostrar una banda muerta en las concentraciones más bajas de CH₄ y se nota una atenuación más pronunciada en las concentraciones cercanas al 100%. La grafica CH4_8 muestra un incremento en la banda muerta en las concentraciones más bajas con una tendencia de la grafica a acercarse a la respuesta ideal con una marcada atenuación en las concentraciones más altas de CH₄, esto debido a la sobre absorción. La grafica CH4_10

muestra la mayor banda muerta en las concentraciones más bajas de CH₄, y las mayores atenuaciones en las concentraciones de CH₄ interfiriendo con las mediciones a los extremos del intervalo de medición, pero mostrando mejor linealidad en el intervalo intermedio.

4.1.4 Calculo de ingreso de energía al sistema

Calculo del área superficial expuesta al ambiente del cilindro de acrílico, ecuación 3.29.

Entrada:	r (Metros):	0.0381	
	h (Metros):	0.2286	
Ecuación:		$A = 2\pi r(r + h)$	(3.29)
Resultado:	A (m ²):	0.06384514	

Calculo del coeficiente general de transferencia de calor para el sistema de medición, ecuación 3.30.

Entrada:	h_h (W·m ⁻² ·K ⁻¹):	60	
	B_{PMMA} (Metros):	0.00635	
	K_{PMMA} (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹):	3.44	
	h_c (W·m ⁻² ·K ⁻¹):	300	
Ecuación:		$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_h} + \frac{B_{PMMA}}{K_{PMMA}} + \frac{1}{h_c}$	(3.30)
Resultado:	U (W·m ⁻² ·K ⁻¹):	45.7751164	

Calculo de diferencia de temperatura media-aritmética entre la temperatura ambiente y el fluido de refrigeración, ecuación 3.31.

	T_F (°C):	35
Entrada:	T_1 (°C):	14.5
	T_2 (°C):	15.5
Ecuación:	$\Delta T_A = \frac{2T_F - (T_1 + T_2)}{2} \quad (3.31)$	
Resultado:	ΔT_A (°C):	20

Calculo de la cantidad de energía que ingresa al sistema de medición, ecuación 3.32.

	U (W·m ⁻² ·K ⁻¹):	45.7751164
Entrada:	A (m ²):	0.06384514
	ΔT_A (°C):	20
Ecuación:	$\hat{Q} = UA\Delta T_A \quad (3.32)$	
Resultado:	\hat{Q} (W):	58.4503765

4.1.5. Calculo de intercambiador de calor

Calculo de coeficiente general de transferencia térmica para intercambiador de calor y fluido de refrigeración, ecuación 3.33.

	h_c (W·m ⁻² ·K ⁻¹):	300
Entrada:	B_{Cu} (Metros):	0.0183096
	K_{Cu} (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹):	377
Ecuación:	$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_c} + \frac{B_{Cu}}{K_{Cu}} \quad (3.33)$	
Resultado:	U (W·m ⁻² ·K ⁻¹):	295.691777

Calculo de temperatura media aritmética entre el intercambiador de calor y el fluido de refrigeración, ecuación 3.34.

	T_F (°C):	6.49
Entrada:	T_1 (°C):	15.5
	T_2 (°C):	14.5
Ecuación:	$\Delta T_A = \frac{2T_F - (T_1 + T_2)}{2} \quad (3.34)$	
Resultado:	ΔT_A (°C):	-8.51

Calculo del área de intercambiador necesaria para disipar la energía que ingresa al sistema de medición, ecuación 3.35.

	U ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$):	295.691777
Entrada:	\hat{Q} (W):	58.4503765
	ΔT_A (°C):	-8.51
Ecuación:	$A = \frac{\hat{Q}}{U \Delta T_A} \quad (3.35)$	
Resultado:	A (m^2):	0.02322836

El dibujo realizado que se muestra en la figura 3.1, hizo posible que se obtuvieran factores de dimensionamiento que se pueden ver en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Dimensiones de intercambiador de calor diseñado.

Descripción	Valor
Grosor del material:	0.0254 m
Ancho:	0.1524 m
Largo:	0.1524 m
Diámetro de perforación:	0.01617 m
Longitud interior:	0.4572 m
Área de contacto interior:	0.02322 m^2
Volumen interior:	0.000093891 m^3
Grosor de pared promedio:	0.1831 m

4.1.6. Calculo de celda termoeléctrica

La tabla 4.2 presenta los parámetros de operación obtenidos a partir de las ecuaciones descritas en el inciso 3.1.6. Los cuales, se encuentran en equilibrio con el diseño del intercambiador, tasa de transferencia térmica del intercambiador y tasa de transferencia térmica del dispositivo.

Tabla 4.2. Datos obtenidos del cálculo de la celda termoeléctrica.

VARIABLES DE ENTRADA

Descripción	Identificador	Valor
Temperatura de lado caliente	Th	313.15 K
Temperatura de lado frio	Tc	279.64 K
Corriente de entrada	I	6.724 A

VARIABLES DE SALIDA

Descripción	Identificador	Valor
Calor rechazado lado caliente	Q _h	210.2933 W
Calor absorbido lado frio	Q _c	58.444 W
Voltaje de entrada	V _{in}	22.5832 V
Potencia eléctrica de entrada	P _{in}	151.8493 W

4.1.7. Filtrado analógico anti-solapamiento

La ecuación 3.49 hacer la conversión de Hz a rad·s⁻¹. Ya que por lo regular, se maneja la frecuencia de corte en Hz, pero las operaciones la requieren en rad·s⁻¹.

Entrada:	F ₀ (Hz):	10	
Ecuación:		$\omega_0 = 2\pi F_0$	(3.49)
Resultado:	ω_0 (rad·s ⁻¹):	62.83	

La ecuación 3.50 nos permite crear la función de transferencia de un filtro butterworth de segundo orden. La atenuación mínima requerida es de: -78.26 dB, lo cual es equivalente a una ganancia de 2⁻¹³. Lo cual es un bit menos significativo (LSB) del

ADC utilizado. La atenuación lograda con este filtro, a una frecuencia de 990 Hz es de -79.8 dB.

Entrada:	ω_0 (rad·s ⁻¹):	62.83
	α :	1.4142

Ecuación:
$$H(s) = \frac{\omega_0^2}{s^2 + \alpha\omega_0s + \omega_0^2} \quad (3.50)$$

Resultado:	$H(s) = \frac{3947.84}{s^2 + 88.86s + 3947.84}$
------------	---

Las ecuaciones de 3.52 a 3.54 describen la obtención de los valores de los componentes necesarios para la obtención física del filtro.

Entrada:	C_1 (Faradios):	0.000001
	α :	1.4142

Ecuación:
$$C_2 = \frac{\alpha^2}{4} C_1 \quad (3.52)$$

Resultado:	C_2 (Faradios):	0.0000005
------------	-------------------	-----------

Entrada:	C_1 (Faradios):	0.000001
	α :	1.4142
	F_0 (Hz):	10

Ecuación:
$$R_1 = \frac{2}{2\pi F_0 \alpha C_1} \quad (3.53)$$

Resultado:	R_1 (Ω):	22508.12
------------	---------------------	----------

	C_1 (Faradios):	0.000001
Entrada:	α :	1.4142
	F_0 (Hz):	10
Ecuación:	$R_2 = \frac{1}{\alpha\pi F_0 C_1}$ (3.54)	
Resultado:	R_1 (Ω):	22508.12

Partiendo de los valores obtenidos como parámetros de diseño del filtro pasa bajas, se procede a la realización mediante un amplificador operacional estándar TL084, de Texas Instruments Inc.

La tabla 4.3 muestra los valores y tolerancias de los componentes comerciales de los elementos pasivos. Los capacitores son cerámicos, y las resistencias son de película metálica. La dispersión entre los valores calculados y los valores utilizados en los componentes se encuentra dentro de un máximo de $\pm 5\%$.

Tabla 4.3. Valores de resistencias de filtrado analógico.

Identificador	Valor calculado	Valor	tolerancia
C1	1 uF	1 uF	$\pm 5\%$
C2	0.5 uF	2·(1 uF)	$\pm 5\%$
R1	22508 Ω	22000	$\pm 5\%$
		510	$\pm 5\%$
R2	22508 Ω	22000	$\pm 5\%$
		510	$\pm 5\%$

4.1.8. Etapa de comunicación con la computadora

El modulo descrito en VHDL que tiene la función de recibir datos provenientes de una computadora personal por medio de comunicación RS-232, es el modulo de recepción serial. Este modulo puede recibir dos clases de instrucciones, estas pueden ser de escritura o de lectura. En el primer caso, la computadora envía cinco paquetes (figura 4.5), el primero de los cuales (CA), en su bit más significativo se indica si se trata de de

una escritura (1) o de una lectura (0), y los bits restantes del paquete CA, contienen la dirección física del registro que va a retener el dato.

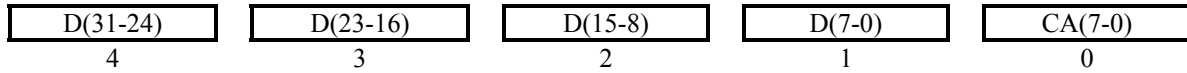


Figura 4.5. Conjunto de paquetes que integran la recepción serial en el caso de una escritura hacia la tarjeta Spartan-3.

En el segundo de los casos, cuando se realiza una lectura, la computadora solo envía el paquete CA, indicando la lectura y la dirección del registro a que hace referencia, con lo cual la tarjeta Spartan-3 responde enviando cuatro paquetes que contienen el dato que la computadora solicita.

El componente que se encarga de la recepción serial (figura 4.6) cuenta con diversas entradas y salidas, las cuales se encargan de establecer comunicación con el exterior. Dicho modulo cuenta con las entradas comunes de RST y CLK, que son el reinicio asíncrono y la entrada de reloj de sistema respectivamente. Este modulo cuenta además con una entrada para el dato serial Rx, que es el dato enviado por la computadora como comando de escritura de un dato o lectura de algún registro. Las salidas a partir de D0 hasta D4, son los paquetes recibidos y paralelizados con el fin de que puedan ser utilizados por el sistema. La última salida, RDY, es una bandera que le dice al sistema digital que hay un dato nuevo presente.

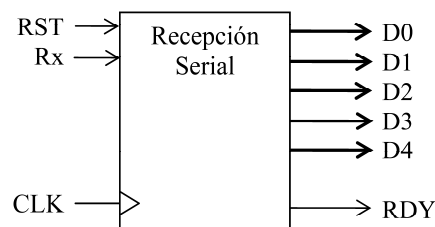


Figura 4.6. Bloque de recepción serial.

El sistema digital que realiza la tarea de recibir estos paquetes, requiere de varios módulos diferentes para completar la operación. La computadora manda los datos de manera serial, esta trama se debe de poner en sincronía con el reloj del sistema, la

máquina de estados detecta el momento en que se ha iniciado el envío de un paquete y habilita la base de muestreo, que es un contador que proporciona una señal de muestreo a un registro de corrimiento que registra los datos y los entrega en paralelo. La señal de muestreo también activa un contador de dato, que cuenta el número de datos que se han recibido, y envía una señal a la máquina de estados, que le indica que la transmisión del paquete ha terminado, por lo tanto, si es una escritura, la máquina de estados espera los restantes cuatro paquetes y los presenta en paralelo. Por otro lado, si es de lectura, únicamente presenta el dato del primer paquete. Al final de cada ciclo de lectura o escritura que se realiza, este modulo manda un pulso en alto en la salida RDY, como señal de indicación al sistema de que hay un comando presente (Figura 4.7).

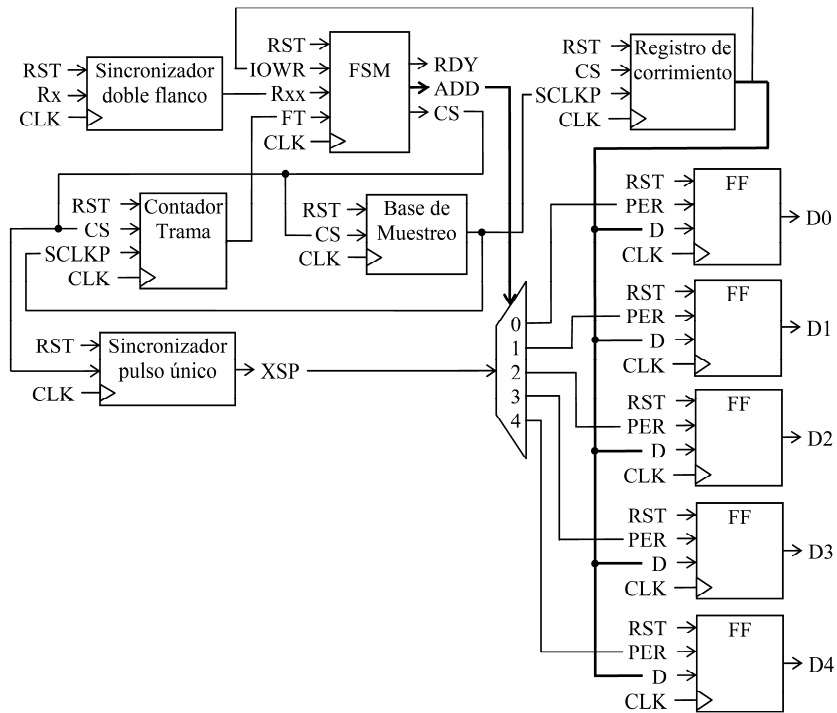


Figura 4.7. Diagrama interno del bloque de recepción de serial.

La maquina finita de estados (figura 4.8) que se encarga de identificar si se trata de un ciclo de lectura o escritura, además de controlar la sincronía de todos los componentes. En este caso, si el ciclo que se lleva a cabo es de lectura, la máquina de estados, seguirá el lazo más pequeño, regresando al estado inicial, con lo cual únicamente se actualiza el dato D0, que es el que contiene el comando de lectura/escritura y la

dirección de registro. Por otro lado, si el ciclo se identifica como de escritura, la máquina de estados seguirá la trayectoria más larga, con lo cual se tomaran cinco tramas de ocho bits cada una, y se actualizaran los datos a partir de D0 hasta D4, con lo que aparte de solo enviar el comando de escritura y la dirección del registro que se va a actualizar, se envía además los 4 datos correspondientes al ciclo de escritura, de los cuales solo se toman los datos necesarios según el registro del que se trate.

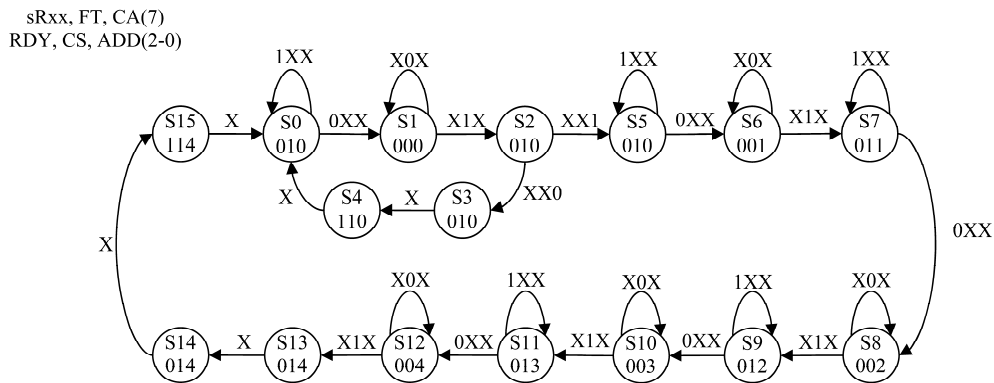


Figura 4.8. Máquina finita de estados del bloque de recepción serial.

El componente que se encarga de la transmisión serial (figura 4.9) cuenta con diversas entradas y salidas, las cuales se encargan de establecer comunicación con el exterior. Dicho modulo cuenta con las entradas comunes de RST y CLK, que son el reinicio asíncrono y la entrada de reloj de sistema respectivamente. Este modulo cuenta además con cuatro entradas de datos paralelos que van desde D0 hasta D3, que son los datos obtenidos de los registro del sistema digital. Una vez que se tienen presentes los datos, se inicia la transmisión del dato por medio de un pulso en la entrada STR. La salida Tx manda el dato serial en cuatro paquetes, con el fin de que puedan ser recibidos por la computadora. La última salida, RDY, es una bandera que le informa al sistema digital que el modulo de transmisión se encuentra disponible para el envío de un nuevo conglomerado de paquetes.

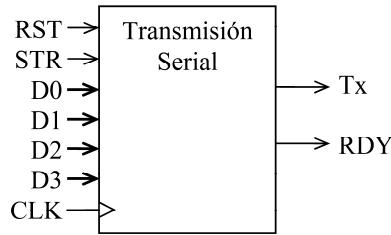


Figura 4.9. Bloque de transmisión serial.

El sistema digital que tiene la tarea de enviar estos paquetes, requiere de varios módulos diferentes para poder llevar a cabo cada parte del proceso (figura 4.10). Una vez que ya se ha recibido el comando de lectura, el registro involucrado presenta su contenido a este módulo por medio de las entradas D0 a D3. En el momento en que se presenta un pulso en la entrada STR, se activan cinco módulos al unísono, cuatro registros o Flip-Flops, los cuales retienen los datos obtenidos con el fin de evitar que cambien en caso de que el contenido del registro referido cambie; el módulo restante, es la maquina finita de estados que se encarga de sincronizar el módulo.

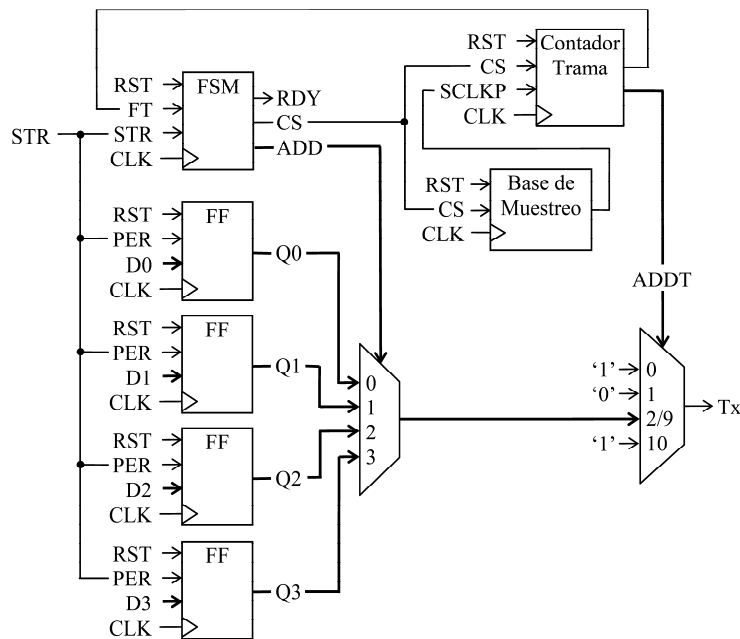


Figura 4.10. Diagrama interno del bloque de transmisión serial.

Los cuatro datos deben de ser enviados por la misma vía de transmisión, por lo que se utiliza un multiplexor que permite la alineación de cada registro secuencialmente.

Se genera una base de muestreo, que es la velocidad a la cual se van a transmitir los datos, que en este caso es de 115,200 baudios. Existe además un contador de los bits enviados, que es el contador de trama, este contador envía una señal a la máquina de estados para indicarle que se ha enviado un paquete.

La máquina de estados que se encarga de sincronizar el modulo de transmisión serial, se divide en cuatro partes, cada una de las cuales se encarga de enviar cada uno de los cuatro datos que se presentan en las entradas D0 a D3 (figura 4.11).

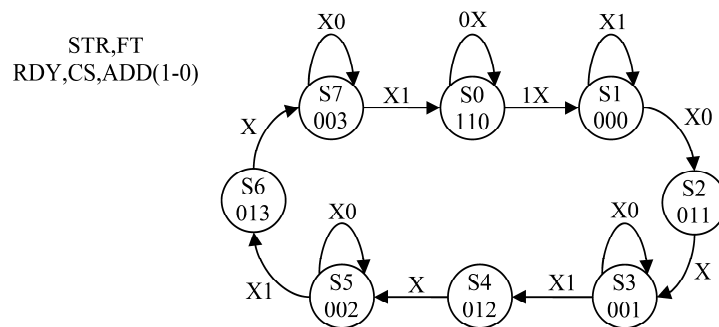


Figura 4.11. Máquina finita de estados del bloque de transmisión serial.

El modulo que se encarga de generar las direcciones (figura 4.12), y el cual es la interfaz entre los módulos de recepción serial y de transmisión serial con el sistema de comunicación interno. Para que la computadora por medio del puerto serial pueda tener acceso a los registros de los diversos módulos, en lo que es por ejemplo una lectura, como primer paso se envía un paquete que contiene en su bit más significativo, la información del proceso que se desea realizar, que en este caso es una lectura o el tener el bit más significativo en cero lógico. Los bits restantes forman una dirección que es la que va a hacer referencia a un modulo en particular y aun registro en particular previamente establecido. Con lo cual este componente toma el dato presentado por el registro y lo envía a la computadora en forma de cuatro paquetes a través del puerto serial.

Este componente cuenta con cuatro buses de comunicación con los diversos elementos de la tarjeta de adquisición de datos, como son controladores, adquisición y

distribución de datos, y registros. Los cuales son bus de dirección de siete bits de anchura, bus de control con dos bits de anchura, bus de entrada y bus de salida, los cuales son de 32 bits de ancho.



Figura 4.12. Bloque del generador de direcciones.

La forma en que se conectan los diversos componentes en el interior del sistema digital (figura 4.13.) con el modulo que genera las direcciones se realiza mediante dos métodos distintos. El bus de entrada se conecta directamente a todos los componentes, así que lo que se ve en este bus, es visible a todos los componentes.

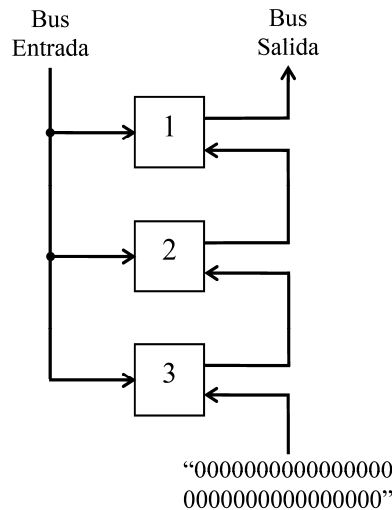


Figura 4.13. Conexión paralela y serial de los elementos que componen el sistema.

El bus de salida, por otra parte se encuentra conectado en serie, esto debido a que una misma señal no puede ser dirigida por diversas fuentes dentro del circuito integrado, por lo que, conectados los módulos de esta manera, solo el modulo que identifica su dirección, manda a través del bus de salida el contenido de sus registros y los módulos que no identifican su dirección mandan lo que se encuentren recibiendo por

una entrada de bus de salida, con lo cual generan un camino para el dato del registro aludido.

4.1.9. Conversión de datos

El sistema de adquisición de datos cuenta con 8 canales de adquisición analógica distribuidos entre dos integrados AD7323, el cual es un dispositivo de cuatro canales de entrada, 12 bits mas signo de aproximación sucesiva, que puede además aceptar señales analógicas bipolares. Cuenta con cuatro intervalos de entrada configurables por software, ± 10 V, ± 5 V, ± 2.5 V y 0 a +10 V. Cada canal de entrada, puede ser independientemente programado a uno de los cuatro intervalos de entrada. Los canales de entrada analógica en el AD7323 pueden ser programados para ser de terminación simple, diferenciales, o pseudo diferenciales. El ADC cuenta con una referencia interna de 2.5 V. El integrado también permite la operación con una referencia externa. Si una referencia de 3 V se aplica al pin REFIN/OUT, el AD7323 puede aceptar una entrada analógica bipolar de ± 12 V. Este ADC cuenta con una interfaz serial de alta velocidad que puede operar con tasas de de transferencia de hasta 500 kilo muestras por segundo. La etapa de adquisición de datos, se diseño en Protel DXP 2004. Aparte de los integrados que conforman el ADC, también se incluyeron componentes de soporte, como son los conectores de alimentación de la etapa analógica, los amplificadores operacionales TL084 configurados como seguidores de voltaje, los cuales proporcionan una entrada de alta impedancia a señales que vienen desde el exterior, y le dan potencia a la señal para que pueda ser adquirida por los ADCs.

El modulo en hardware que se encarga de establecer comunicación con los convertidores analógico-digital cuenta con un registro de configuración, el cual retiene la configuración del intervalo de voltaje de entrada para su conversión, dicha configuración se compone de dos bits para cada canal (V_{inX}), donde el código para cada voltaje es: “00” para ± 10 V, “01” para ± 5 V, “10” para ± 2.5 V y “11” para 0 a +10 V.

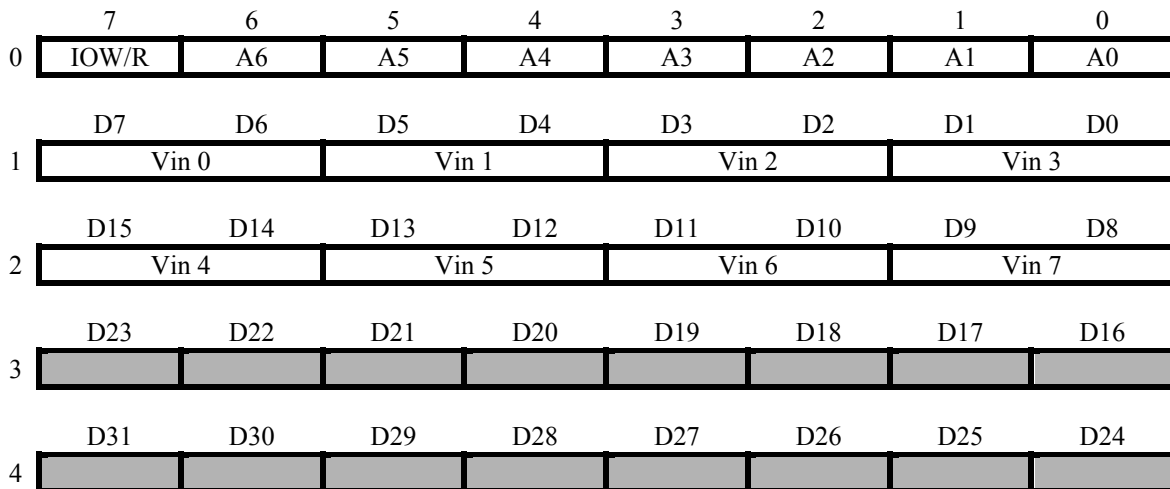


Figura 4.14. Conjunto de paquetes que integran la configuración del intervalo de voltaje de entrada en los ADCs.

Los paquetes que debe de enviar la computadora para poder configurar dicho modulo se muestran en la figura 4.14, el primer paquete contiene la información del comando a realizarse y de la dirección del registro referido, el segundo paquete provee la información de configuración del intervalo de los primeros cuatro canales de la tarjeta de adquisición analógica, el tercer paquete porta la información necesaria para la configuración de los cuatro restantes canales de adquisición analógica, y los últimos dos paquetes no son tomados en cuenta para lectura ni para escritura del registro. Dicho registro puede ser tanto leído como escrito por la computadora.

El bloque encargado de la comunicación con los convertidores analógico-digital (figura 4.15) se encuentra dotado con diversas entradas y salidas, entre las cuales cuenta con entradas de reinicio asíncrono (RST) y de reloj (CLK), cuenta además con una entrada para el bus de direcciones (ADD) y una entrada que le indica al bloque la dirección física a la cual va a responder, por otro lado, cuenta con dos entradas IOW e IOR que componen el bus de control, dichas entradas indican al modulo la acción que debe de realizar. La entrada DI es el puerto de entrada de datos, la entrada DOI es la entrada del bus de datos de salida del componente que se encuentre más abajo en la conexión serial, y por último se cuenta con la entrada DOUT con un ancho de dos bits,

esta entrada permite el ingreso de los datos generados por los convertidores analógico-digital.

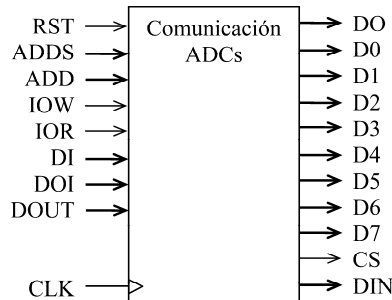


Figura 4.15. Bloque que establece comunicación con los ADCs.

Entre las salidas con que cuenta este modulo se pueden observar las salidas de los datos D0 a D7 que son el resultado de la conversión de los ocho canales del sistema de adquisición de datos, se puede ver además la salida DO que es el bus de datos de salida, la señal CS que es de sincronización para la transmisión y recepción de trama con los convertidores analógico-digital, y por último la salida de dos bits de anchura DIN que es la salida de trama de configuración de los convertidores analógico-digital.

Este modulo tiene que realizar tareas de transmisión de datos de configuración y recepción de datos de conversión. Para lograr esta tarea, este modulo se compone de diversos componentes, los cuales se pueden observar en la figura 4.16. El proceso se describe brevemente a continuación.

El bloque “Registro de intervalo”, tiene la función de decodificador de direcciones, registro para datos de configuración, entrada y salida de datos de configuración por medio de los buses de datos.

Ese bloque se activa cada milisegundo, lo cual significa que el componente “Base de muestreo” genera una señal de activación cada 0.001s. En cada ocasión en que se genera este pulso de activación, se realizan cuatro ciclos de lectura/escritura a los convertidores analógico-digital. En dichas cuatro lecturas, se le indica al convertidor el siguiente canal en el cual se va a realizar la conversión, este direccionamiento de canal lo

genera el módulo “Canal”. El módulo “Trama”, se encarga de llevar a cabo el conteo de los datos transmitidos, así como de generar la señal de cambio en el multiplexor que transmite los datos a los convertidores analógico-digital. Una vez terminada la trama, activa una bandera que le indica a la maquina finita de estados que puede continuar con el siguiente ciclo de lectura/escritura de los cuatro que se llevan a cabo. Otro de los componentes que responde a la bandera de fin de trama es “Canal”, que incrementa el número de canal a ser leído.

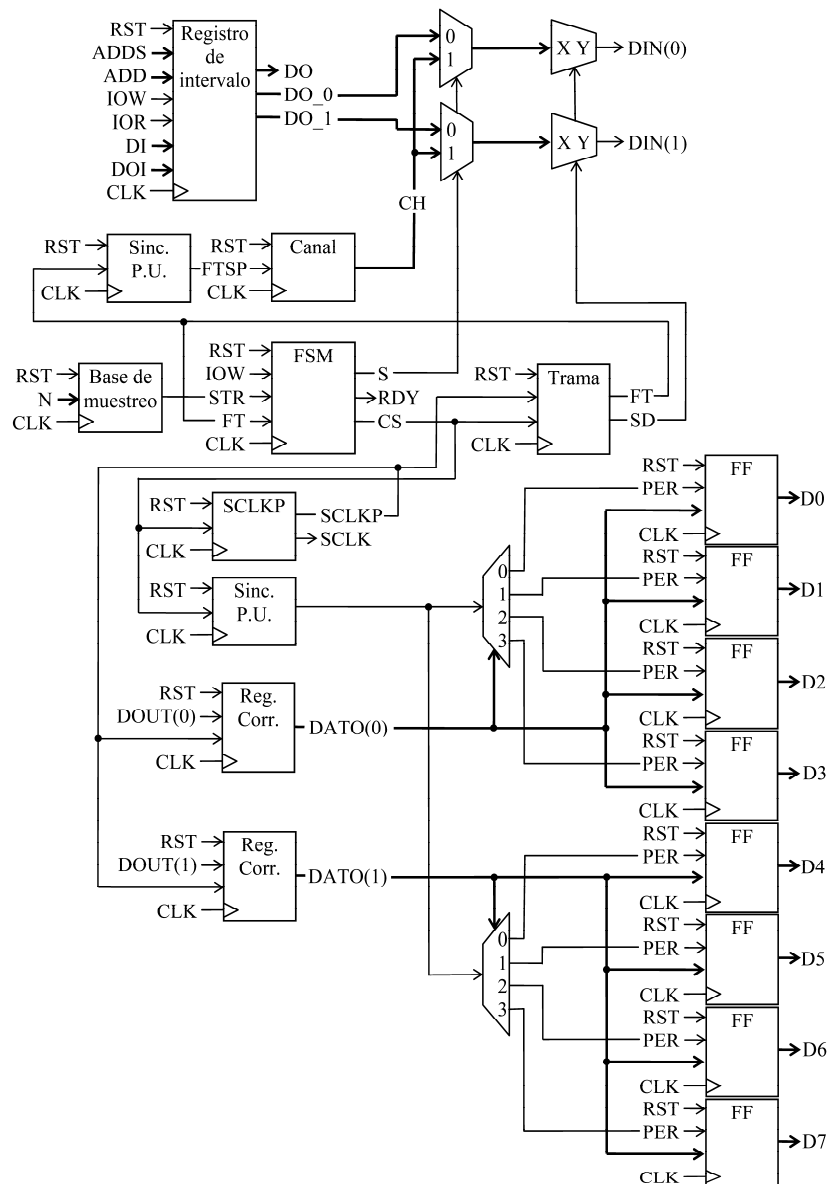


Figura 4.16. Diagrama interno del bloque que establece comunicación con los ADCs.

La velocidad con que se transmiten y se reciben los datos, se encuentra definida por el componente “SCLKP”, este modulo genera una frecuencia de reloj para el funcionamiento de los convertidores analógico-digital de 5MHz, además de también generar un pulso con cada borde positivo para indicar al modulo “Trama” que cuente y realice el cambio para el envío de otro bit y para indicar a los módulos de registro de corrimiento que deben de realizar un corrimiento para capturar el bit que en ese momento se encuentre presente.

Al final de cada ciclo de lectura/escritura, se manda una señal a dos de los ocho componentes “FF” que son flip-flops, encargados de guardar el dato resultante de la conversión hasta un nuevo ciclo de muestreo y actualización de los registros.

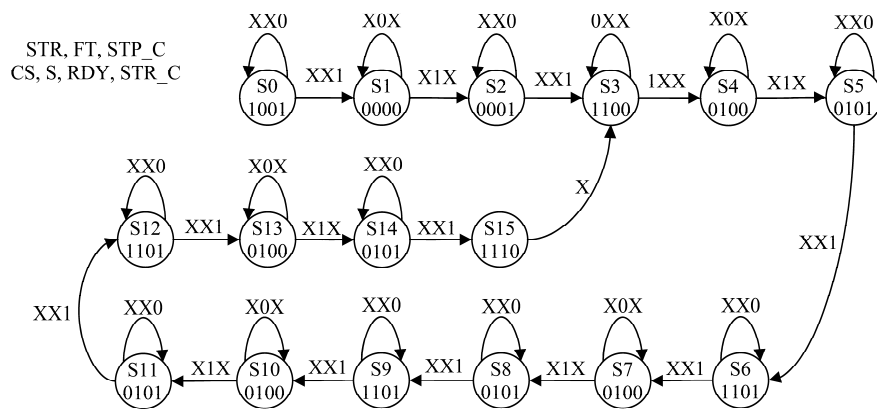


Figura 4.17. Máquina finita de estados del bloque que establece comunicación con los ADCs.

El componente “FSM”, contiene a la máquina finita de estados, dicha máquina (figura 4.17) se encarga de sincronizar a los demás componentes que conforman el modulo de comunicación con los convertidores analógico-digital. Esta máquina de estados, normalmente se encuentra trabajando en el lazo formado e iniciando en el estado tres, ya que siempre que se presenta un estímulo de muestreo a la entrada STR, este lazo realiza las cuatro lecturas/escrituras de los convertidores analógico-digital. La rama que inicia en el estado cero, se activa siempre que se da la condición de una escritura a los registros de configuración de este modulo, o lo que sería un reinicio por software. Dicha rama contiene las instrucciones para llevar a cabo un ciclo de lectura/escritura mediante

el cual se reconfiguran los intervalos de medición de los convertidores analógico-digital. La aparente complejidad de esta máquina de estados se debe a los múltiples ciclos de lectura/escritura a los convertidores analógico-digital, ya que estos son de cuatro canales, y la lectura de dichos canales se debe de realizar serialmente en lugar de paralelamente como sería el caso si cada convertidor representara un canal.

Con el objeto de reducir el tamaño de la maquina finita de estados principal, debido a los estados de espera en los diversos ciclos de lectura/escritura, se construyó una sub-maquina finita de estados (figura 4.18), la cual, al ser activada proporciona los estados de espera necesarios para los procesos de lectura/escritura a los convertidores analógico-digital, con lo que se reparte la complejidad en dos maquinas finitas de estados en lugar de manejar una sola maquina difícil de manipular.

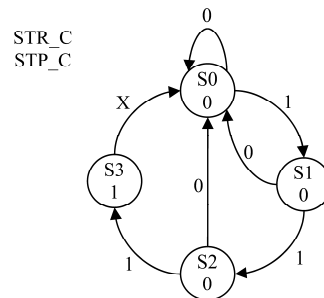


Figura 4.18. Sub-maquina finita de estados que es llamada por la máquina de estados principal en la comunicación con los ADCs.

El sistema de distribución de datos analógicos se compone de ocho integrados DAC7512E de un solo canal, dicho dispositivo es un convertidor digital a analógico de 12 bits con un canal de salida de voltaje. Este dispositivo opera con una sola fuente de +2.7 V a +5.5 V. La referencia para el DAC7512E se deriva del voltaje de alimentación, lo que permite el mayor intervalo dinámico de salida del dispositivo. Dicho dispositivo incorpora un reset en el momento de la alimentación, que asegura que la salida del dispositivo se encuentre en 0 al ser energizado, y permanezca en este estado hasta que se lleve a cabo una escritura válida. El dispositivo cuenta además una característica de bajo consumo, lo cual reduce el consumo de corriente del dispositivo a 50nA a 5V. El bajo consumo de este dispositivo durante operación normal hace que este dispositivo sea muy

adecuado para equipo operado por baterías. Algunas de las aplicaciones de esta clase de dispositivo son: Control de procesos, sistemas de adquisición de datos, instrumentos portátiles alimentados por baterías, ajustes digitales de ganancia y offset, fuentes de voltaje o corriente programables y atenuadores programables. También se utilizó un amplificador operacional TL084, por medio del cual se proporcionó una etapa de amplificación no inversora a la salida de cada uno de los convertidores digital a analógico, con el fin de amplificar el voltaje de salida por dos y contar así con un voltaje de salida a escala completa de -5 a +5 V, en lugar de los 0 a +5V que nos proporciona el convertidor. Con el incremento de voltaje se tiene la ventaja de menor interferencia, ya sea esta proveniente de ruido o debida a la imprecisión de los componentes.

El bloque encargado de la comunicación con los convertidores digital-analógico (figura 4.19) está dotado con diversas entradas y salidas, entre las cuales cuenta con entradas de reinicio asíncrono (RST) y de reloj (CLK), cuenta además con una entrada para el arranque del sistema (STR) que envía los datos a los convertidores digital-analógico iniciando con esto un ciclo de conversión. Este modulo cuenta además con entradas para los datos digitales a ser convertidos a analógico, estas entradas se encuentran etiquetadas de D0 a D7.

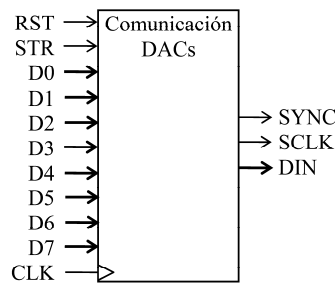


Figura 4.19. Bloque que establece comunicación con los DACs.

Entre las salidas con que cuenta este modulo se puede observar la salida de la señal de sincronización de trama para los datos de entrada al convertidor (SYNC). Otra de las señales de salida presentes en este modulo, es la señal SCLK, dicha señal permite que los datos enviados al convertidor digital-analógico por medio de la señal DIN, puedan ser retenidos en los registros del convertidor. La señal DIN tiene un ancho de

ocho bits, debido a que se utilizaron ocho convertidores digital - analógico de un solo canal cada uno.

Este modulo tiene la tarea de recibir ocho datos en paralelo, y transmitirlos de manera serial a ocho convertidores distintos a un mismo tiempo, para poder realizar esta tarea, este modulo se compone de diversos componentes (figura 4.20). Para realizar la conversión de los datos paralelos a serial para su transmisión a los convertidores digital-analógico, se utilizan ocho multiplexores, uno para cada dato a ser transmitido, el dato se presenta directamente de la fuente de este dato, sin ninguna retención previa. En el momento en que se presenta el estímulo a la entrada STR, la máquina de estados manda arrancar el contador de trama que cuenta los datos envidados y coloca el siguiente dato en la línea de transmisión, una vez terminada la trama, este mismo modulo se encarga de informar a la máquina de estados del fin de la trama, por lo tanto poniendo fin al ciclo de transmisión. La transmisión de los datos se realiza en un único ciclo.

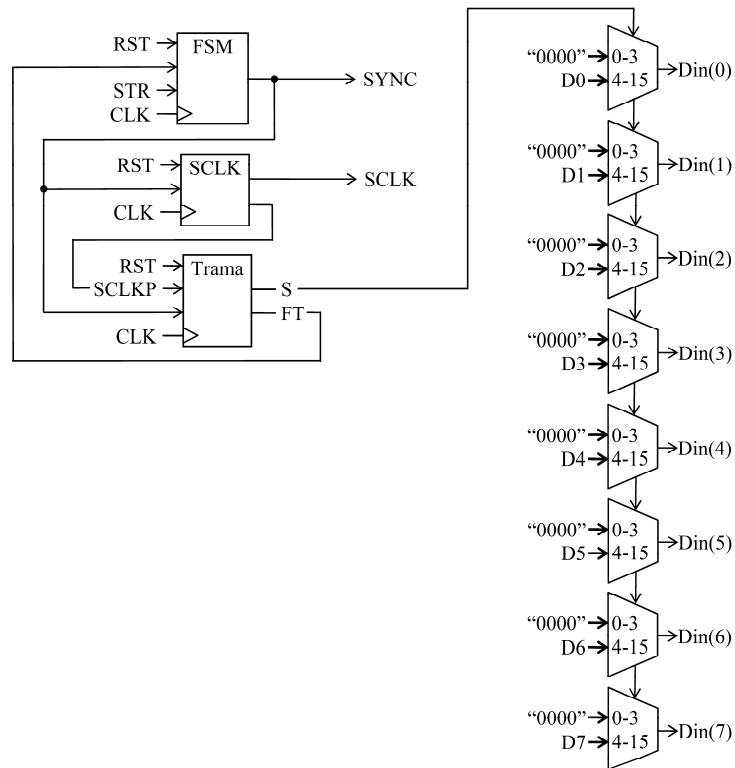


Figura 4.20. Diagrama interno del bloque que establece comunicación con los DACs.

La maquina finita de estados que sincroniza el modulo de conversión digital-analógico (figura 4.21) es muy simple, ya que únicamente se encuentra compuesta de dos estados. La simplicidad de dicha maquina se debe principalmente a que solo se realiza un único ciclo de transmisión de datos.

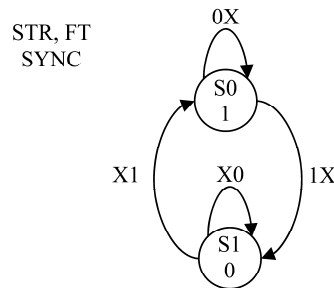


Figura 4.21. Maquina de estados finita del bloque que establece comunicación con los DACs.

4.1.10. Control PID de temperatura

Este tipo de operación involucra para el cálculo de la salida la operación con un valor anterior en el tiempo de dicha salida, esta clase de estructura corresponde a un filtro IIR o de respuesta infinita al impulso. El modulo que incorpora a este sistema digital, se puede observar en la figura 4.22.

Las entradas con que cuenta este modulo son: RST, que es la entrada de reinicio asíncrono, CLK, que es la entrada para la señal de reloj del sistema, se puede ver además, la entrada STR que una señal para arranque de un nuevo ciclo de control que en esta caso se lleva a cabo cada 0.001 segundos, las señales ADDS y ADD son para configuración de dirección física y entrada para el bus de direcciones, las entradas IOW e IOR son las entradas para el bus de control, DI es la entrada para el bus de datos, DOI es la entrada para el bus de datos de salida de algún componente que se encuentre más abajo en la conexión serial de este bus, La señal X es la entrada de un dato generado por un convertidor analógico-digital o sea la entrada de la retroalimentación.

Las salidas con que cuenta este modulo son: RDY que es la señal que indica que un nuevo comando de control se encuentra disponible, la salida DO es la salida del bus de datos, y la salida Y es la salida del comando de control.

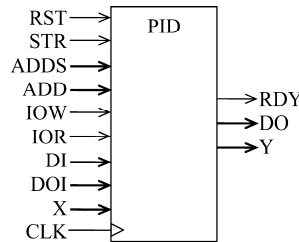


Figura 4.22. Bloque que conforma el controlador PID digital.

Este modulo cuenta con seis registros individuales, los cuales pueden ser leídos o modificados por la computadora, mediante una dirección base, que se configura por hardware en la entrada ADDS del modulo, y el incremento de dirección con respecto a esta dirección base, la lista de los registros que pueden ser leídos o modificados, las operaciones que pueden ser llevado en ellos y su ancho de palabra, se muestran en la tabla 4.4.

Tabla 4.4. Dirección de registros de configuración de los parámetros del PID.

Dirección Base	Registro	Operación	No. De bits
+0	Set Point	R/W	12
+1	A_0	R/W	32
+2	A_1	R/W	32
+3	A_2	R/W	32
+4	Y	R/W	32
+5	R	R	12

El registro Set Point guarda el valor que se desea tenga la variable controlada; los registros A_0, A_1 y A_2 contienen los valores de los coeficientes del filtro y estos valores son respectivamente: $K_p+K_iT+K_d/T$, $-(K_p+2K_d/T)$, y K_d/T ; si se realiza una lectura al registro Y, se obtiene el valor del comando de control y se pone en automático al PID, si se realiza una escritura a este registro, se pone en modo manual a este PID; y cuando se realiza una lectura al registro R, se obtiene el valor de la retroalimentación.

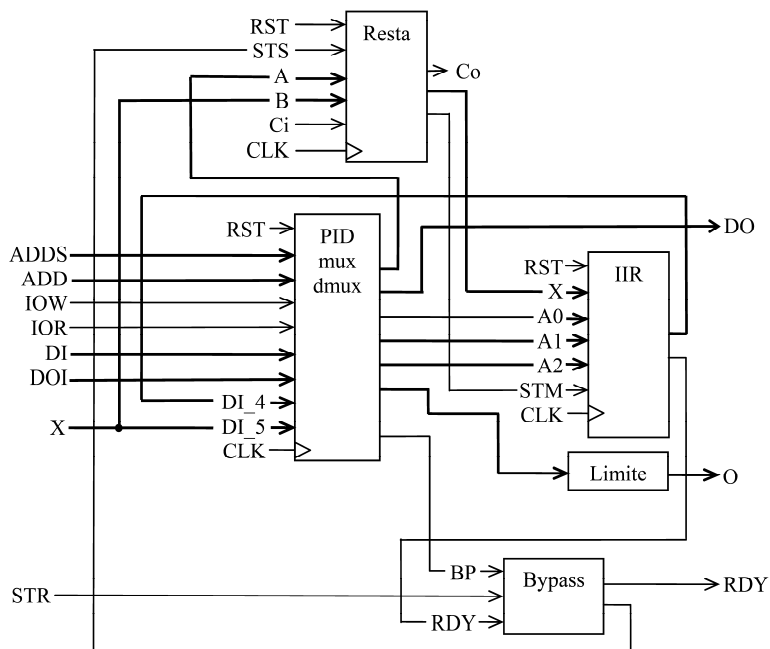


Figura 4.23. Bloque que conforma el controlador PID digital.

El módulo PID se compone de diversos componentes (figura 4.23), los cuales permiten que se lleve a cabo cada ciclo de control. El componente “Resta”, se encarga de calcular la señal de error, mediante la resta del set-point(12 bits + signo, siempre positivo) y de la entrada del dato proporcionado por el ADC, que es la retroalimentación del sistema (12 bits + signo, puede ser positivo o negativo), con lo cual podemos obtener un número tanto positivo como negativo. A la señal del error obtenido, se le agregan bits para hacer que la señal se haga de 32 bits y así concuerde con las entradas del componente IIR. El componente IIR es el módulo que cuenta con la estructura de filtro de respuesta infinita al impulso y es el encargado de realizar la operación matemática para el cálculo de la señal de comando. El componente “Limite” limita la salida de 32 bits a una salida de 12 bits, para que esta pueda ser enviada al convertidor digital-analógico, si la salida es negativa, al convertidor llega 7FFh, y si la salida es mayor o igual a 0000.FFFF, entonces la salida será FFFh, esto debido a que a la mitad del intervalo del convertidor, la salida es 0V. El componente “PID_mux_dmux” se encarga de decodificar las direcciones para las escrituras o lecturas a los registros, contener los registros, así como de repartir estos datos a los diversos componentes que así lo requieren. El componente “Bypass” se encarga de dirigir la señal de inicio de ciclo de control al componente IIR si se está en

automático, y de dirigir esta señal a la salida de fin de ciclo de control, si es que el modulo se encuentra en manual.

El componente IIR (figura 4.24), encargado de realizar la operación matemática para el cálculo de la señal de comando de control, se encuentra compuesto de diversos componentes, los cuales se describen brevemente a continuación: Los módulos “Reg”, se encargan de retener un dato $t-1$ de la salida, además de $t-1$ y $t-2$ de la entrada, con el fin de cumplir con lo requerido por la ecuación de diferencias. Todos estos datos se encuentran multiplexados para poder ingresar a la Mac72. Otros datos que también entran a la “Mac72”, son los coeficientes de la ecuación de diferencias, para poder llevar a cabo la operación. El modulo “Mac72” genera una señal que cambia de canal al multiplexor y de dato del modulo “ROM” que es en sí otro multiplexor. Conforme se van recorriendo los datos, estos son multiplicados y acumulados por la “Mac72”, al final del recorrido de los cuatro datos, se presenta el resultado de la “Mac72” y se envía la señal de fin de ciclo de control. La “Mac72” proporciona una salida de 72 bits de ancho, debido a la multiplicación de dos palabras de 32 bits cada una, además de un incremento de 8 bits para evitar que se llegue a desbordar el multiplicador o la acumulación.

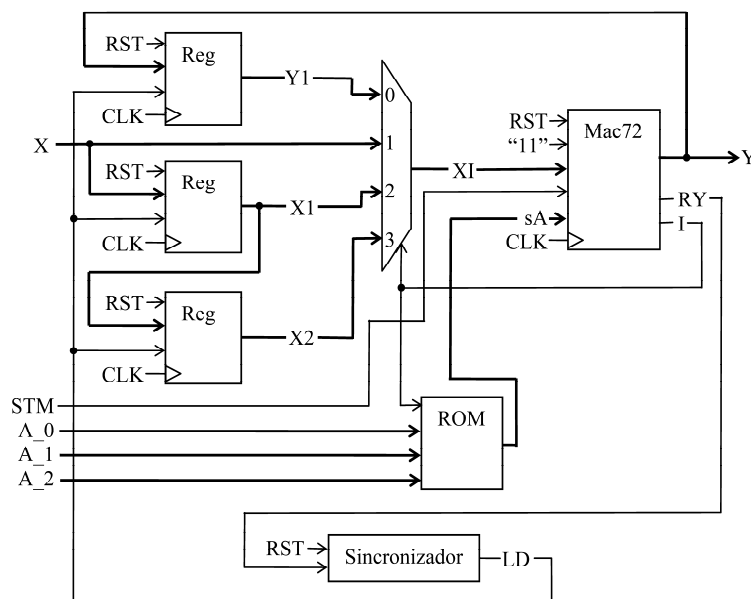


Figura 4.24. Diagrama de bloques de controlador PID digital.

4.1.11. Sistema digital de control y cálculo de moles

Para poder mejorar la respuesta del sistema, se implemento una etapa que realiza el promedio de los últimos 128 datos de los sensores de presión y de nivel (figura 4.25), antes de que estos ingresen en el sistema digital para su posterior empleo en los cálculos. Entre los diversos módulos, se cuenta con un registro de desplazamiento que se encarga de almacenar los últimos 128 datos muestreados por los ADCs y entregarlos para su posterior promedio. Se cuenta además con un modulo que realiza la suma de estos últimos 128 datos muestreados, uno por uno. El registro de acumulación permite retener el resultado de la suma para poder sumar los 128 datos. El registro de resultado permite retener el resultado final durante todo el proceso de promediado y cuando no se está llevando a cabo. El modulo contador, se encarga de llevar la cuenta del numero de datos siendo sumados, así como de proporcionar el índice para decirle al registro de desplazamiento que dato mandar al modulo sumador. El modulo de control se encarga de dar la pauta a cada uno de los módulos antes mencionados para que estos puedan a cabo la operación de promediado.

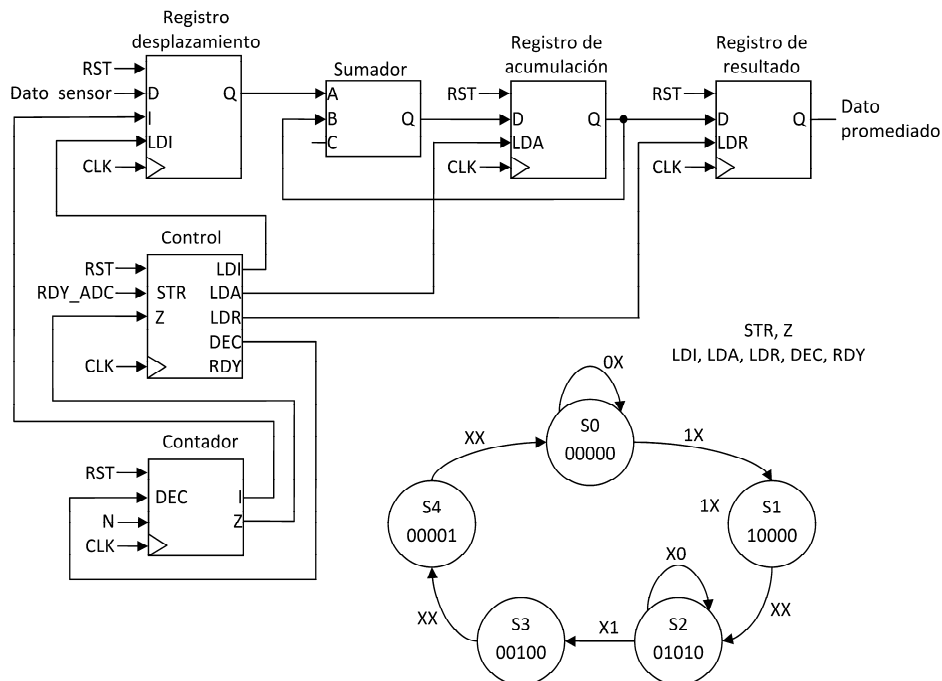


Figura 4.25. Esquema del modulo de filtro promediador.

La máquina de estados finita que coordina el sistema digital encargado de realizar todas las operaciones para el sensado se puede ver en la figura 4.26. En donde: RC2S es la señal de fin de cuenta del temporizador de diez segundos, RMP es la respuesta de fin de toma de muestra parcial, RC2M es la señal de fin de cuenta de temporizador de 20 minutos, CODE es una señal definida por el usuario para definir la mezcla de prueba, RMT es la respuesta de fin de toma de muestra total, STR_FSM entrada de señal de arranque de prueba, C2S es la señal que habilita el contador de diez segundos, ZL es la señal que ordena el almacenamiento del valor de cero elevado del nivel de liquido, MA es la señal de habilitación para la toma de muestra de aire, C2M es la señal que habilita al temporizador de 20 minutos, AIR_VALVE señal de activación de válvula de ingreso de aire , CO2_VALVE señal de activación de válvula de ingreso de CO₂, COMPRESSOR señal de activación de compresor para ingreso de CO₂, RECIRCULATING_PUMP señal para activación de bomba de recirculación de agua de absorción.

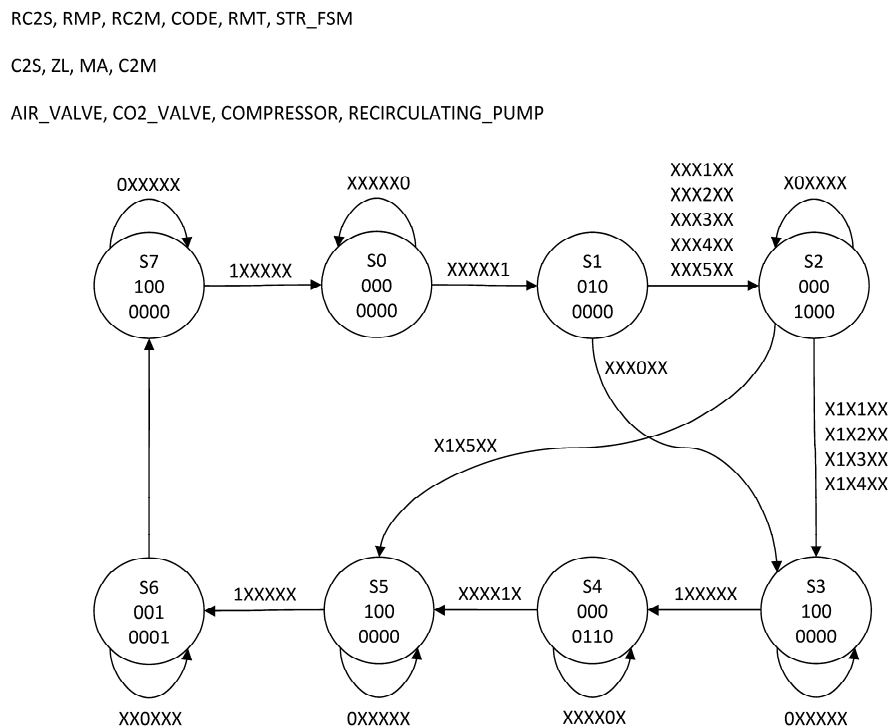


Figura 4.26. Máquina de estados finita de coordina al sensor.

El componente que se encarga de contar el tiempo de diez segundos (figura 4.27), se compone de un contador programable de 16 bits, el cual se encuentra configurado para contar hasta el número 100, y es activado por un pre-escalador con una frecuencia de salida de 0.1 Hz. Este modulo se encarga de temporizar eventos de asentamiento del sensor para llevar a cabo el cálculo de la cantidad de moles en distintas partes del proceso.

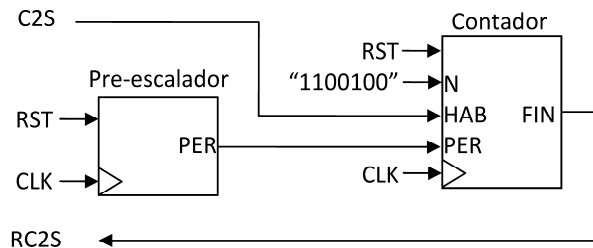


Figura 4.27. Módulo que compone el contador de diez segundos.

El modulo que se encarga de generar el volumen de muestra que ingresa al sistema se puede ver en la figura 4.28.

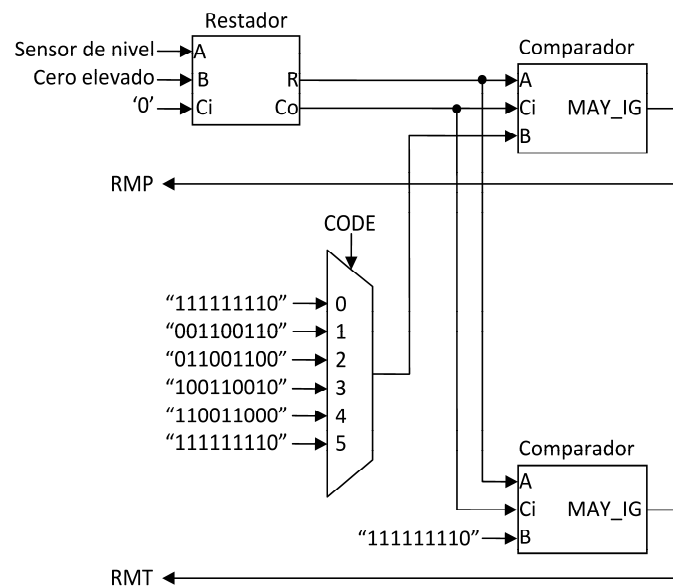


Figura 4.28. Esquema del sistema de generación de mezcla.

Este sistema se compone de dos comparadores que envían a la máquina de estados las señales RMP y RMP. Estas señales le indican al sistema cuando se ha

terminado de ingresar el CO2 y el aire de la mezcla y así poder continuar con el sensado. Esto de acuerdo a la señal CODE, que le dice al sistema el porcentaje que se requiere de mezcla requerido.

El modulo encargado de medir el intervalo de tiempo de 20 minutos, se puede ver en la figura 4.28. Este modulo se compone por un contador programable ajustado a una cuenta de 1200, y se encuentra dirigido por una frecuencia de 0.1 Hz. Con lo que se obtiene la temporización de 20 minutos. Al final de la cuenta, el contador envía a la máquina de estados principal una señal de fin de cuenta. Este modulo lleva a cabo el proceso de absorción.

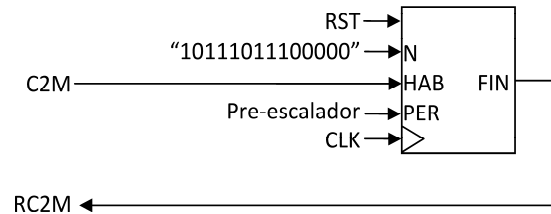


Figura 4.29. Esquema del contador de 20 minutos.

La figura 4.30 muestra los módulos necesarios para llevar a cabo el cálculo de moles. Estos módulos se activan en cascada al momento en que el filtro promediador presenta los datos necesarios. Este modulo se encuentra haciendo el caculo continuamente. El dato generado por el cálculo se encuentra disponible para la computadora personal.

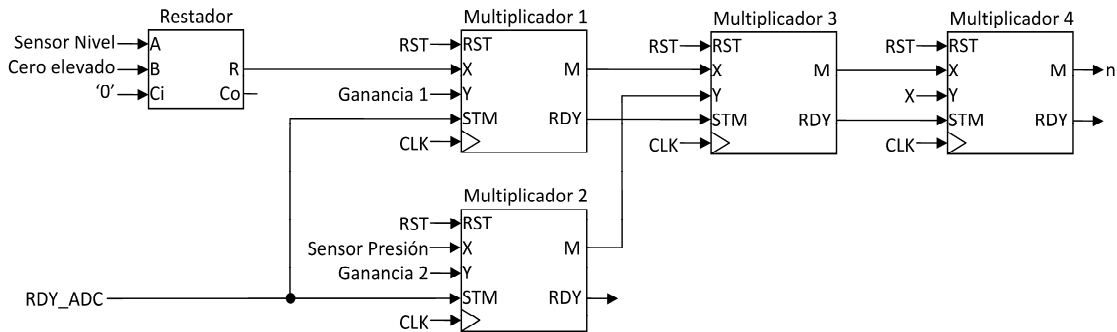


Figura 4.30. Esquema de sistema de cálculo de moles.

4.2. Evaluación funcional

Con el fin de poder evaluar el desempeño del dispositivo construido, se utilizaron algunas herramientas estadísticas, las cuales se describen a continuación.

El principio de calibración del dispositivo se basa en la inyección de una mezcla conocida de gas compuesta de CO₂ y aire, y su posterior análisis con el instrumento desarrollado con el fin de determinar su respuesta.

El procedimiento de calibración aplicado se describe a continuación.

1. Se introducen 100 cm³ de agua de absorción a la celda volumétrica, la cual, previamente ha sido dejada al ambiente.
2. El sistema digital fija el nivel de líquido de refrigeración a partir del cual se comenzara a realizar la medición.
3. Se ingresan los moles requeridos de aire para la mezcla.
4. Se permite al sistema su estabilización por 10 segundos.
5. Se ingresan los moles requeridos de CO₂ para la mezcla.
6. Se permite al sistema su estabilización por 10 segundos.
7. Se lleva a cabo la absorción durante 20 minutos.
8. Se permite al sistema su estabilización por 10 segundos.

Con el propósito de evaluar el desempeño del dispositivo, se utilizó una variedad de mezclas conocidas compuestas de CH₄ y CO₂ en proporciones de 0.0% CH₄ con 99.99% CO₂, 20.60% CH₄ con 79.39% CO₂, 40.24% CH₄ con 59.75% CO₂, 60.49% CH₄ con 39.50% CO₂, 79.78% CH₄ con 20.21% CO₂, y 99.99% de CH₄ con 0.0% CO₂ las cuales fueron creadas por INFRA. La cantidad de líquido de absorción utilizada fue de 5.148 moles o 92.74 cm³, la temperatura del sensor fue fijada en 15°C, y la presión atmosférica fue de alrededor de 0.815 Kg·cm⁻³.

Con el fin de conocer algunas de las características estadísticas del medidor de composición, se llevaron a cabo 5 ciclos de medición con cada una de las 6 mezclas de calibración en diferentes días. Los resultados estadísticos obtenidos de las mediciones llevadas a cabo se muestran en la Tabla 4.5

Tabla 4.5. Datos estadísticos obtenidos de las corridas del dispositivo.

Punto de calibración	Respuesta de contenido de CH ₄ (%)	Precisión (%)	Exactitud (%)
0.00%	22.28%	2.04%	±0.56%
20.61%	45.86%	2.58%	±1.47%
40.25%	62.27%	0.56%	±0.43%
60.50%	74.99%	2.24%	±2.09%
79.79%	85.48%	0.95%	±1.01%
99.99%	99.50%	0.28%	±0.35%

Las cinco corridas además de la grafica del dato obtenido del modelo con 4.0 moles de agua y la grafica con las mezclas de calibración utilizadas se muestran en la figura 4.31.

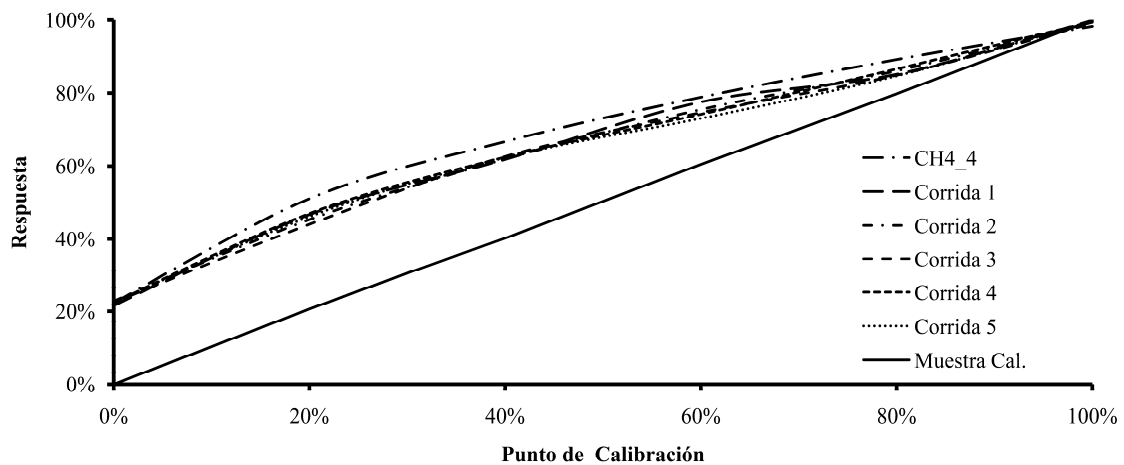


Figura 4.31. Se muestran cinco graficas de las respuestas del dispositivo experimental hechas en diferentes días, las cuales son Corrida 1 a Corrida 5, además de la grafica de la respuesta del modelo matemático con 4 moles de líquido de absorción (CH₄_4) y una grafica de las muestras de calibración empleadas.

Los resultados experimentales con 5.148 moles de agua son muy similares a los resultados del modelo con 4.0 moles de agua. Dicho comportamiento experimental puede

ser causado debido a interferencia de sustancias diluidas en el agua utilizada como liquido de absorción o debido a las características estructurales del dispositivo experimental.

Con el fin de traducir los datos obtenidos del dispositivo a datos fácilmente interpretables, se llevo a cabo una linealización polinomial. La ecuación polinomial empleada para linealizar los datos se muestra en la ecuación (1).

$$f(x) = -12.7742x^5 + 34.5923x^4 - 35.3856x^3 + 17.9448x^2 - 3.5978x + 0.2239 \quad (1)$$

En la figura 4.32 se muestran las curvas de las cinco corridas mostradas en la figura 4.31, pero linealizadas utilizando la ecuación de linealización mostrada en la ecuación (1), además de las graficas CH4_4 y de muestras de calibración como en la figura 4.31. En la figura 4.32, las corridas linealizadas se separan de la grafica CH4_4 y tienden de manera muy marcada a la grafica de las muestras de calibración, esto debido a la linealización.

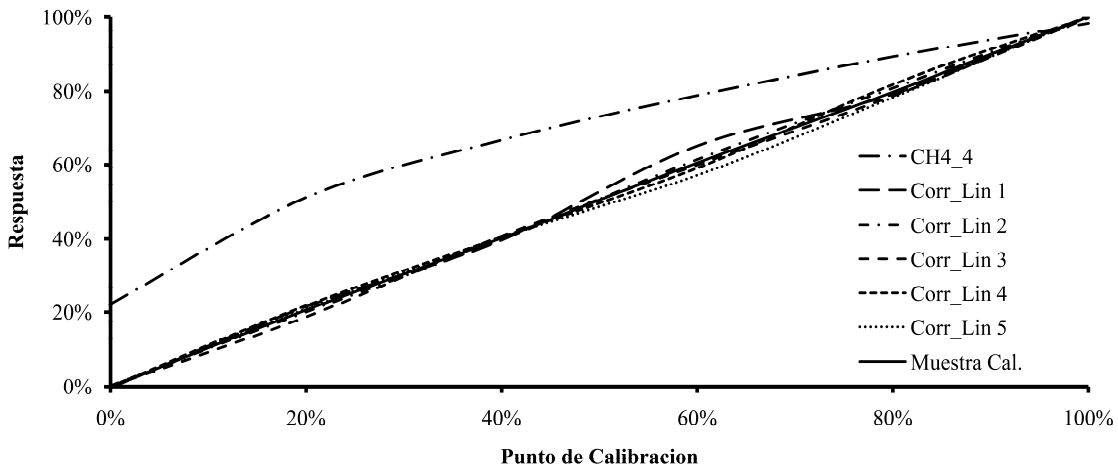


Figura 4.32. Se muestran cinco graficas de los datos experimentales después de linealización polinomial, las cuales son Corr_Lin 1 a Corr_Lin 5, además de la grafica del modelo matemático con 4 moles de líquido de absorción y la grafica de las muestras de calibración utilizadas.

Tres de las aportaciones originales que el trabajo ha generado, además de haber desarrollado un sistema independiente que permite resolver el problema de la determinación de la fracción de metano en el biogás generado en un reactor de digestión anaerobia. La primera aportación original consiste en haber realizado el análisis sistemático de la dilución de las especies gaseosas en agua, haciendo factible la aplicación de la diferencia de dilución en agua de especies gaseosas para medir su fracción en una mezcla. La segunda aportación original consiste en el análisis, adaptación, diseño y construcción del actuador de temperatura basado en celdas termoeléctricas, lo cual permitió mantener una temperatura controlada en el dispositivo con un tamaño reducido. La tercera aportación consiste en el diseño y realización en FPGA de los algoritmos de procesamiento de señales para la obtención de la lectura de la fracción de una de las especies gaseosas y el uso de técnicas de procesamiento de señales en circuitos integrados HSP (Hardware Signal Processing) aplicadas en el desarrollo de sensores químicos, resolviendo el problema mediante una solución de bajo costo que puede ser integrada fácilmente a los reactores de digestión anaerobia que se encuentran en el mercado regional.

4.2.1. Análisis de la diferencia de dilución de especies gaseosas en agua

Aunque el principio y el conocimiento de la dilución de gases en agua no son nuevos en sí, lo novedoso del trabajo consiste en haber planteado la utilización de la diferencia de dilución de gases en agua y el haber planteado el modelo analítico de los diversos factores que contribuyen a la extracción de la información sobre la fracción de metano contenida en el biogás. Este modelo analítico contempla los principales factores, no siendo los únicos pero sí los más importantes que afectan al principio empleado y el análisis presentado muestran el procedimiento para poder determinar, analíticamente, la respuesta del sistema de acuerdo a sus parámetros físicos.

Mediante el procedimiento planteado, es factible el desarrollo de sistemas equivalentes para la determinación de diferentes mezclas gaseosas binarias diferentes a las utilizadas en el presente trabajo.

4.2.2. Actuador para el control de temperatura basado en dispositivos termoeléctricos

Con el fin de poder mantener el sistema de medición a una temperatura por debajo de la temperatura ambiente, permitiendo un control de temperatura muy preciso y con costo en espacio muy reducido, se integro al problema original un actuador de temperatura basado en un modulo termoeléctrico o de efecto peltier. El empleo de esta clase de dispositivos en este trabajo permitió el poder obtener el conocimiento necesario para la aplicación de los mismos. Dichos dispositivos cuentan con una amplia variedad de aplicaciones, entre las que se cuentan: acondicionamiento de muestras, generación de energía, sistemas de enfriamiento o de calefacción, enfriamiento de semiconductores. El haber agregado este dispositivo como parte de la solución, permitió el poder mantener el sistema a una temperatura controlada, y así impedir el cambio de la capacidad de absorción del agua debido a los cambios de temperatura. Lo cual mejora las propiedades estadísticas del dispositivo como sensor.

4.2.3. Procesador de señales en hardware

El haber agregado como parte de la solución al problema original el uso de un circuito integrado FPGA donde se localiza el algoritmo de control y de procesamiento digital de señales abre un campo a la aplicación de técnicas HSP a los sensores químicos y a los bioprocesos. Con esta filosofía de diseño se permite el desarrollo de sistemas embebidos que pueden ser localizados en los reactores como parte del mismo, sin tener que incorporar equipo de propósito general anexo que encarece los costos y complica el uso cotidiano de los sistemas. Así como el presente sistema digital integrado en el FPGA resuelve parte del problema planteado originalmente, también se puede utilizar esta técnica de diseño para incorporar otras tareas como pueden ser de comunicación, monitoreo, computo y control a los reactores de manera distribuida, simplificando el equipo de computo necesario para su manejo automático y sin encarecer significativamente el costo total del sistema.

4.2.4. Prototipo

Se ha propuesto el principio físico de la diferencia de dilución de gases en agua como figura de mérito para estimar la fracción de metano contenido en biogás, con detección en línea. Se diseñó un dispositivo compuesto de un sistema para el manejo de muestras de biogás y de un sistema digital de control y de procesamiento de señales descrito en hardware. El sistema de medición se compone de una celda volumétrica, líquido de absorción, un sistema de refrigeración, un depósito de líquido de refrigeración, válvulas solenoide, compresores, bombas de líquido, sensores de presión y sensores de temperatura. Todo interconectado con el fin de poder manipular las muestras de gas y poder determinar su composición. Por otro lado, se encuentra el sistema de control y procesamiento de señales descrito en hardware. Este sistema se compone de un controlador PID digital, un sistema de comunicación con la computadora con fines de adquisición de datos y configuración del dispositivo, de un sistema de control de secuencia, filtros promediadores, temporizadores, y sistema de cálculo de moles. Este sistema completo proporciona el valor de la fracción de metano contenida en el biogás una vez que el ciclo de toma de muestra y absorción se ha completado. Los resultados obtenidos experimentalmente demuestran que el sistema para determinar la fracción de metano en el biogás opera adecuadamente.

4.3. Discusión

Partiendo de la diferencia de dilución de especies gaseosas en agua, y mediante el análisis de la interacción de ambas especies con un volumen determinado de agua bajo ciertas condiciones de presión y temperatura resulta una figura de mérito suficiente para determinar la fracción de metano contenida en un flujo de biogás, además de su implementación en un sistema digital de lógica reconfigurable. La realización de los algoritmos de procesamiento digital de señales en circuitos integrados permite obtener soluciones con una eficiente relación costo/desempeño.

Las aseveraciones presentadas en el párrafo anterior se sustentan en los resultados experimentales obtenidos con el desarrollo del actual trabajo. Parte de los procesos y principios involucrados para el desarrollo completo se han tomado de fuentes previas y otros procesos se han propuesto originalmente, logrando conjuntar todos los elementos en un procedimiento sistemático con vistas a ser generalizado.

4.3.1. Cálculo de diferencia de dilución de especies gaseosas en agua

Uno de los desarrollos medulares del trabajo consiste en haber realizado el análisis sistemático del principio de dilución de especies gaseosas en agua. El primer análisis realizado fue el cálculo de moles de agua para la dilución de muestra. Este análisis se lleva a cabo para poder conocer la mínima cantidad de agua de absorción necesaria para diluir una cantidad dada de gas, primero se debe de conocer la cantidad en moles de gas contenidos en la muestra que se desea tomar. Otro de los factores importantes, es conocer además, de los dos gases que se requiere muestrear, cual es el que tiene la mayor capacidad de dilución. Y se utiliza una muestra hipotética compuesta enteramente por el gas con mayor capacidad de dilución, con el fin de garantizar que el agua de absorción se encontrara en cantidad suficiente para cubrir todo el espectro de mezclas posible. Tomado como condiciones base, temperatura, presión, volumen de muestra de gas y aplicando la ecuación de los gases ideales. El otro análisis realizado es el cálculo de dilución de muestra. El cual se lleva a cabo para poder conocer el estado estacionario o de equilibrio que existe entre una cantidad finita de moles de una mezcla gaseosa binaria (CO_2 y CH_4) en y una cantidad finita de moles de agua de absorción, se deben de tomar en cuenta las ecuaciones que describen la fracción molar de los gases en agua, la fracción molar de los gases en la muestra y las ecuaciones que relacionan el gas disuelto en la fase líquida con el gas en la fase gaseosa.

Este proceso puede ser generalizado para cualquier mezcla binaria de gases, los cuales tengan una diferencia significativa en sus coeficientes de dilución.

4.3.2. Procesamiento de señales en hardware

Utilizar la técnica de desarrollo algorítmico HSP permite reducir los costos de los sistemas aplicados a la instrumentación y control de maquinaria industrial. El uso de computadoras y sistemas DSP de propósito general han podido resolver varios problemas de instrumentación y control en la industria; sin embargo, estos sistemas son muy costosos y pueden resultar poco prácticos en las aplicaciones industriales del entorno doméstico. En el presente trabajo se muestra un ejemplo de cómo los sistemas HSP puede resolver problemas específicos, manteniendo una alta relación costo/desempeño.

Conforme la tecnificación de las industrias crezca, se requerirán nuevos desarrollos eficientes en los sistemas de instrumentación y control donde el uso de las herramientas de diseño HSP será un factor clave para la viabilidad y éxito de un desarrollo tecnológico.

4.3.3. Prospectivas

El planteamiento y la realización de la solución presenta han permitido establecer algunas propuestas para continuar con la línea de desarrollo tecnológico iniciada en el actual trabajo. Destaca mencionar que existe mucho terreno para el desarrollo de sistemas integrales de instrumentación y control en bioprocesos basados en circuitos de aplicación específica para reducir los costos, comparados con los sistemas actuales de procesamiento general. Así mismo, es imperativo el trabajo en propuestas de nuevos algoritmos que vengan a solucionar los problemas actuales con que se enfrenta la industria en las áreas de bioprocesos y energías alternativas.

Concretamente se plantea como futuro desarrollo de sistemas de medición para diferentes variables del proceso de digestión anaerobia, controladores inteligentes, sistemas de comunicación para poder así optimizar el proceso de automatización.

Otra área que resulta conveniente seguir explorando es en la aplicación de otras opciones tecnológicas como son FPGAs, micro-controladores, microprocesadores, y computadoras. Estos sistemas individualmente o trabajando en conjunto permiten que el proceso de control y monitoreo se vea liberado de las altas demandas de cómputo intensivo que requieren todos los procesos asociados.

Existen muchas maneras mediante las cuales se puede mejorar el diseño de este dispositivo, por ejemplo, una mejor selección de los materiales y un mejor proceso de manufactura podría mejorar la confiabilidad y la robustez. Una memoria flash puede ser agregada con el fin de almacenar datos cuando la conexión a una computadora no es posible. Un módulo inalámbrico puede ser agregado con el fin de establecer comunicación de manera remota con fines de automatización y monitoreo. Un mejor aislamiento térmico reduciría el consumo energético por refrigeración. La reducción del tamaño podría mejorar la portabilidad y el despliegue en el campo. Una muestra más pequeña y una menor cantidad de líquido de absorción mejorarían el tiempo de respuesta.

4.4. Conclusiones

El desarrollo del presente trabajo ha permitido la propuesta y comprobación de tres ideas originales: el análisis sistemático de la dilución de las especies gaseosas en agua, haciendo factible la aplicación de la diferencia de dilución en agua de especies gaseosas para medir su fracción en una mezcla, el análisis, adaptación, diseño y construcción del actuador de temperatura basado en celdas termoeléctricas, lo cual permitió mantener una temperatura controlada en el dispositivo con un tamaño reducido, el diseño y realización en FPGA de los algoritmos de procesamiento de señales para la obtención de la lectura de la fracción de una de las especies gaseosas y el uso de técnicas de procesamiento de señales en circuitos integrados HSP (Hardware Signal Processing) aplicadas en el desarrollo de sensores químicos. La solución presentada con un costo total de estimado de \$20,000.00 M.N. resulta en un sistema competitivo comercialmente

cuando se compara con sistemas comerciales cuyos precios son superiores a los \$100,000.00 M.N.

Al proponer y comprobar estas ideas originales, además de haber resuelto el problema original de la detección de ruptura en herramientas de corte, se ha podido abrir una nueva línea de desarrollo tecnológico encaminada a la solución de problemas relacionados con el área por medio de algoritmos de procesamiento digital de señales, realizados en circuitos HSP y del desarrollo de sensores químicos. Esta línea es prometedora tanto tecnológica como académicamente para mejorar la productividad en futuros desarrollos.

REFERENCIAS

Acp, Cornare y Corantioquia. 1997. Manejo de elementos de la producción porcina que pueden causar efectos ambientales. Convenio de concertación para una producción más limpia en el sector porcícola y ambiental del Departamento de Antioquia. Medellín: 155 pp.

CENAM. 1996. Introducción a la metrología y a la estimación de la incertidumbre.

Chará, J. D. 2000. El potencial de las excretas porcinas para uso múltiple y los sistemas de descontaminación productiva. Centro para la investigación en sistemas sostenibles de producción agropecuaria (CIPAV).

Devore, J. L. 1998. Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias.

Doran, P. M. 1995. Bioprocess Engineering Principles. Elsevier Science & Technology Books.

Ferrotec. 2010. Thermoelectric Technical Reference. Disponible en: www.ferrotec.com.

Fong-Chan, Y., Moallem, M., and Wang, W. 2007. Design and Implementation of Modular FPGA-Based PID controllers. IEEE transactions on industrial electronics, August, Vol. 54, No. 4, 1898-1906.

Fraden, J. 2004. Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications 3rd ed. Springer.

Fraden, J. 2004. HANDBOOK OF MODERN SENSORS. Physics, Designs, and Applications. Springer.

Gerardi, M. H. 2003. The Microbiology of Anaerobic Digesters. Wiley & Sons, New Jersey.

- German Solar Energy Society (DGS) and Ecofys. 2005. Plannyn Planning and installing bioenergy systems : a guide for installers, architects and engineers. James & James and Earthscan, London.
- Ghosh, S. 1997. Anaerobic Digestion For Renewable Energy and Environmental Restoration. The 8th International Conference on Anaerobic Digestion, Sendai International Center, Sendai, Japan, Ministry of Education Japan.
- Glauser, M., Jenni, B., and Aragno, M. 1984. An inexpensive, automatic gas meter for laboratory-scale methane digesters and other gas-evolving systems, Journal of microbiological methods, 2, 159-164.
- Gonzalez, G. G., Kleerebezem, R., and Lettinga, G. 2002. Assessment of metabolic properties and kinetic parameters of methanogenic sludge by on-line methane production rate measurements
- INEGI. 1991. Censo Agrícola – Ganadero. México.
- INIFAP, UNAM, SCA y FAO. 2000. Reporte de la Iniciativa de la Ganadería, el Medio Ambiente y el Desarrollo (LEAD) – Integración por Zonas de la Ganadería y de la Agricultura Especializadas (AWI) – Opciones para el Manejo de Efluentes de Granjas Porcícolas de la zona Centro de México. Disponible en: <http://www.fao.org/WAIRDOCS/LEAD/X6372S/x6372s00.htm>.
- Jung, W. (ed). 2005. Op Amp Applications Handbook. Newnes. United States.
- Kester, W. (ed). 2005. Data Conversion Handbook. Newnes. United States.
- Kulkarni, R. 2006. Disruptive technology. IEE Computing & Control Engineering, Feb./Mar., 32-35.

- Lide, D. R. (ed). 2005. CRC Handbook of Chemistry and Physics, Internet Version, <<http://www.hbcnetbase.com>>, CRC Press, Boca Raton, FL.
- Lima, J., Menotti, R., Cardoso, J. M. P., and Marques, E. 2006. A Methodology to Design FPGA-based PID controllers. IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Taipei, Taiwan, Oct., 8-11.
- Liu, J., Olsson G., and Mattiasson, B. 2004. A volumetric meter for monitoring of low gas flow rate from laboratory-scale biogas reactors. Sensors and actuators B, 97, 369-372.
- Living Water. 1996. Ecological Desing Principles for Pond and Wetlands Based Systems. Living Water, Edinburgo. Impreso 7p.
- Lusk, P. D. 1995. Anaerobic Digestion of Livestock Manures: A Current Opportunities Casebook. Washington, D.C., U. S. Department of Energy.
- Macías, M., Pérez, M., Caro, I., and Cantero, D. 1995. Automatic gas meter for laboratory fermenters, Biotechnology Techniques, 9, 655-658.
- Malvino, A. P. 2000. Principios de Electrónica. Mc Graw Hill. España.
- Mandal, T., Kiran, B. A., and Mandal, N. K. 1999. Determiantion of the quality of biogas by flame temperature measurement. Energy Conversion & Management, 40, 1225-1228.
- Mata, J., Martínez, A., and Torres, A. 1986. A simple device to measure biogas production en laboratory scale digesters, Biotechnology Letters, 8, 719-720.
- Moletta, R., and Albagnac, G. 1982. A gas meter for low rates of gas flow: Application to the methane fermentation, Biotechnology Letters, 4, 319-322.

- Ogata, K. 1996. *Sistemas de Control en Tiempo Discreto* 2ª edición. Pearson Education, México.
- Osornio-Rios, R. A., Romero-Troncoso, R. J., Herrera-Ruiz, G., and Castañeda-Miranda, R. 2008. The application of reconfigurable logic to high speed CNC milling machines controllers. *Control Engineering Practice*, 16, 674-684.
- Parhami., B. 2000. *Computer arithmetic, algorithms and hardware design*. Oxford University Press. New York.
- Polprasert C. 1989. *Organic Waste Recycling*, Asian Institute of Technology. Bangkok. John Wiley & Sons London. 357p.
- Rego, R. and Mendes, A. 2004. Carbon dioxide/methane gas sensor based on the permselectivity of polymeric membranes for biogas monitoring. *Sensors and Actuators B Chemical*, 103, 2-6.
- Romero, R. J. 2004. *Sistemas digitales con VHDL*. Editorial Legaria. México.
- Roos, K. F. 1991. *Profitable Alternatives for Regulatory Impacts on Livestock Waste Management*. National Livestock, Poultry and Aquacultural Waste Management National Workshop, Kansas, MI, USDA Extension Service.
- Samet, L., Masmoudi, N., Kharrat, M. W., and Kamoun, L. (1998). A digital PID controller for real time and multi loop control. 5ème Colloque d'Informatique Industrielle CII'98, Djerba, Tunisie, février.
- Sedlačík, R., Dvořáčková, M. and Hruška, F. 2007. Application experiences of measurement devices of methane and carbon dioxide concentration. *Archives of Materials Science*, 28, 1-4.

- SIAP. 2004. Población porcina, elaborado por el servicio de información y estadística agroalimentaria y pesquera (SIAP) con información de las delegaciones de la SAGARPA. Disponible en: www.siap.gob.mx/ar_compec_pobgan.html
- Smith, S. W. 2003. Digital Signal Processing, A practical guide for Engineers and Scientist. Newnes. United States.
- Speece, R. E. 1996. Anaerobic Biotechnology for Industrial Wastewaters. Vanderbilt University, Arachae Press.
- Steyer, J. P., Bouvier, J. C., Conte, T., Gras, P., Sousbie, P. 2002. Evaluation of a four year experience with a fully instrumented anaerobic digestion process. Water Science and Technology, vol. 45, n° 4-5, 495-502.
- Subasri, K., Lavanya, K., and Umamaheswari, B. 2006. Implementation of Digital PID controller in Field Programmable Gate Array (FPGA). Proceedings of India International Conference on Power Electronics. India.
- Visioli, A. 2006. Practical PID Control. Springer-Verlag. London.
- Wilkie, A. C. 2000a. Anaerobic Digestion: Holistic Bioprocessing of Animal Manure. Gainesville, FL, University of Florida.
- Wilkie, A. C. 2000b. Reducing Dairy Manure Odor and Producing Energy. BioCycle 41(9): 48-50.

Apéndice A

DIAGRAMAS ELECTRONICOS, Y PROTOTIPOS

Las diversas etapas de electrónica que comprenden el sistema, son en su mayoría de acondicionamiento de señal, adquisición, y distribución de datos. Ya sean estas analógicas o digitales, todas ellas necesarias para que el controlador digital pueda hacer la interfaz con la planta.

A.1. Etapa de adquisición analógica

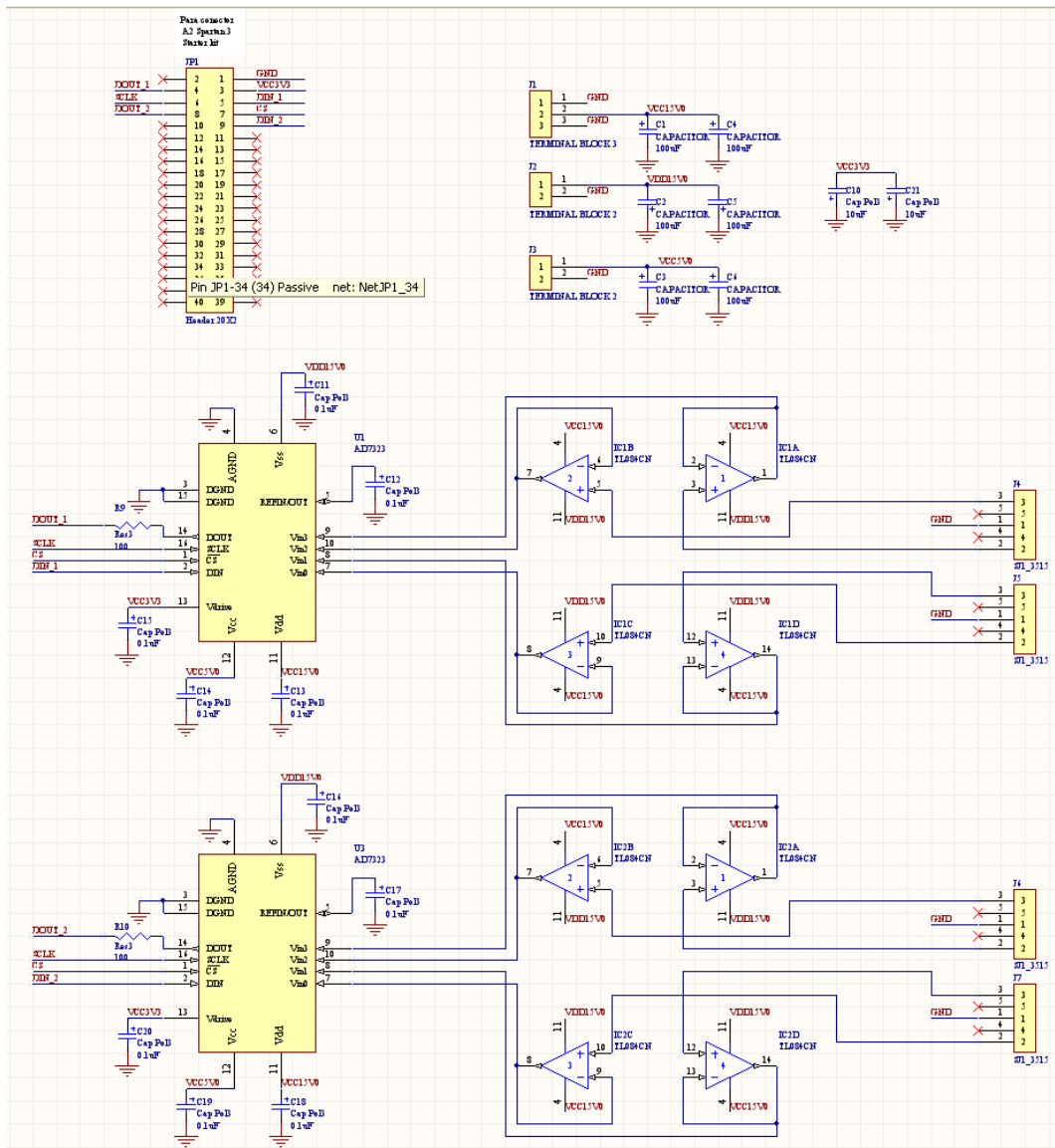
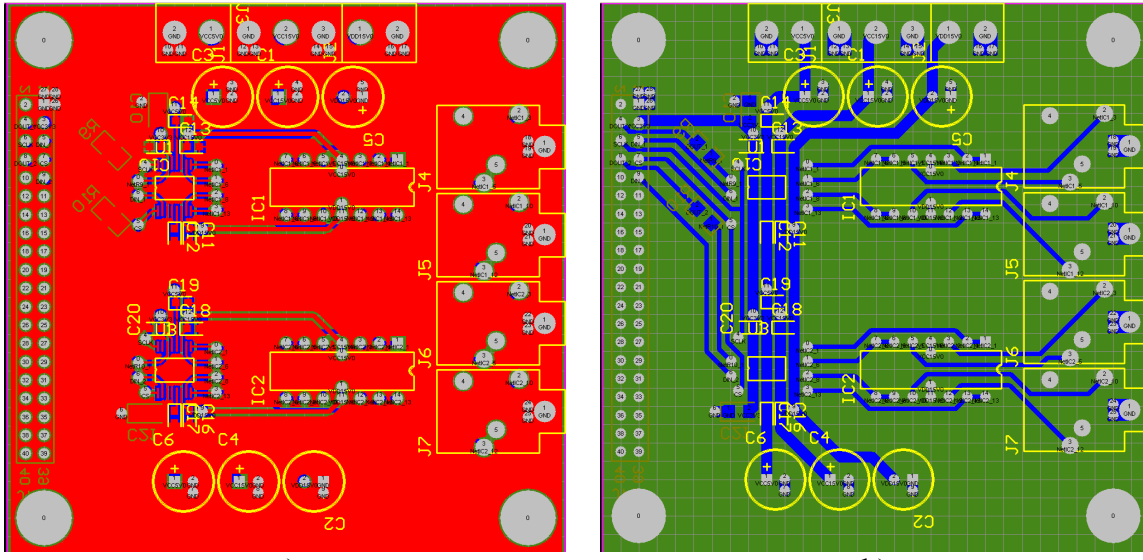


Figura A.1. Esquemático de la etapa de adquisición de datos analógicos.



a)

b)

Figura A.2. Tarjeta de circuito impreso de la etapa de adquisición de datos analógicos, Top Layer y Bottom Layer.

A.2. Etapa de distribución analógica

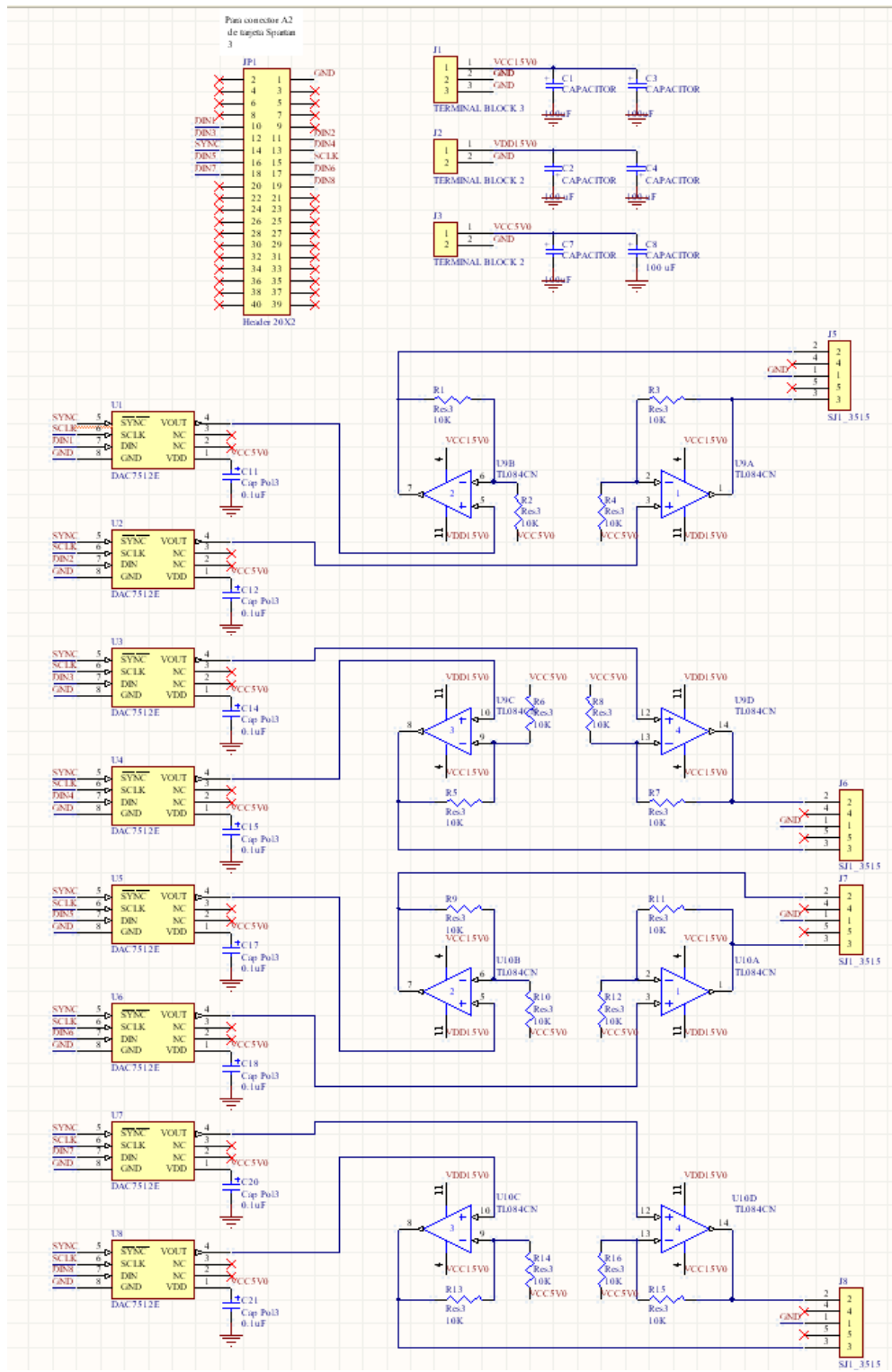


Figura A.3. Esquemático de la etapa de distribución de datos analógicos.

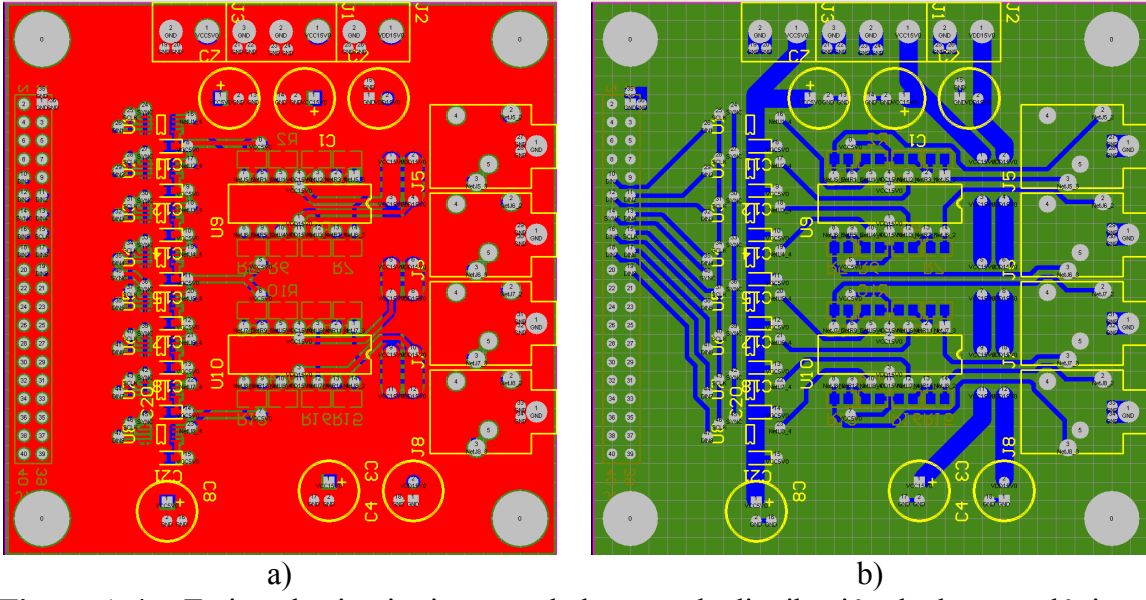


Figura A.4. Tarjeta de circuito impreso de la etapa de distribución de datos analógicos, Top Layer y Bottom Layer.

A.3. Etapa de fuente de alimentación

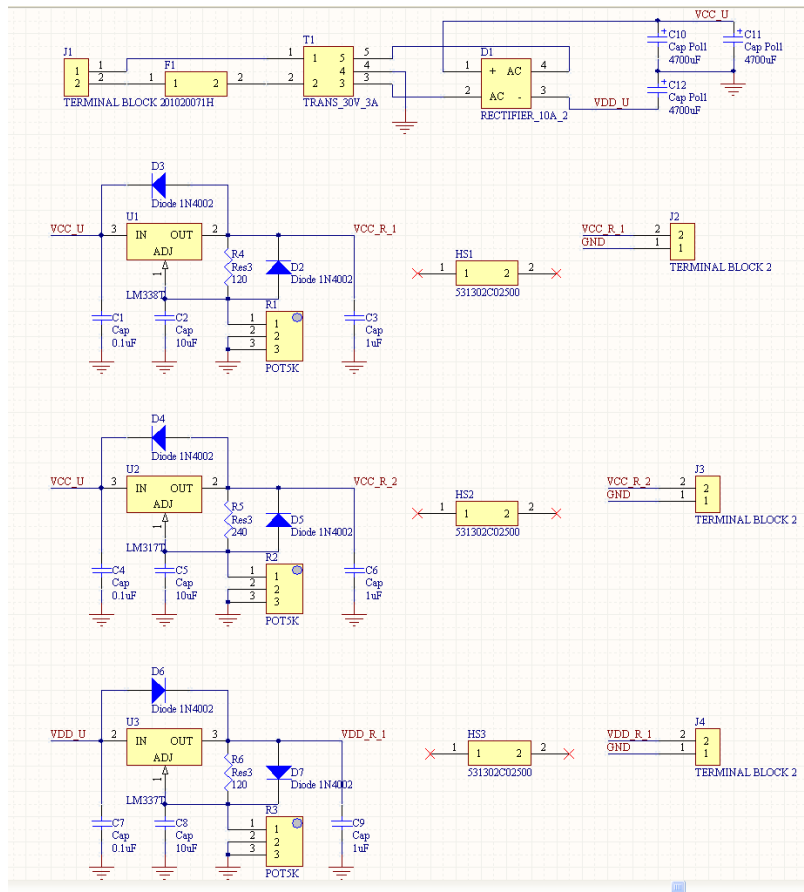


Figura A.5. Esquemático de fuente de alimentación de las diversas tarjetas de circuito impreso.

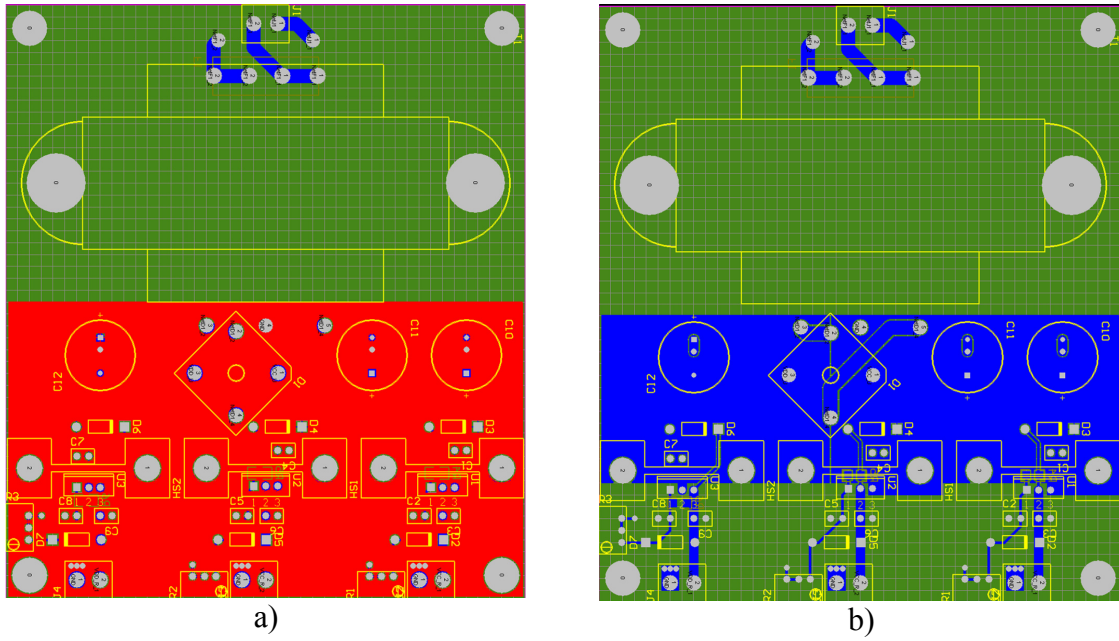


Figura A.6. Tarjeta de circuito impreso de fuente de alimentación centralizada, Top Layer y Bottom Layer.

Apéndice B

PROGRAMAS EN C, Y EN VHDL

B.1. Listado de programas en VHDL del sistema de control

Los programas que componen el sistema de adquisición de datos y controlador PID descritos en VHDL son los siguientes:

1. ADC_base_m.vhd
2. ADC_base_SCLK.vhd
3. ADC_ch_addr.vhd
4. ADC_dmux_1_4.vhd
5. ADC_ff.vhd
6. ADC_fsm.vhd
7. ADC_main.vhd
8. ADC_mux_2_1.vhd
9. ADC_mux_15_1.vhd
10. ADC_reg_corr.vhd
11. ADC_reg_range.vhd
12. ADC_sinc_pu.vhd
13. ADC_trama.vhd
14. DAC_base_sclk.vhd
15. DAC_fsm.vhd
16. DAC_main.vhd
17. DAC_mux_16_1.vhd
18. DAC_trama.vhd
19. main.vhd
20. PID_bypass.vhd
21. PID_IIR.vhd

22. PID_IIR_MAC_acumulador.vhd
23. PID_IIR_MAC_contador.vhd
24. PID_IIR_MAC_control.vhd
25. PID_IIR_MAC_recodificador.vhd
26. PID_IIR_MAC_registro_x.vhd
27. PID_IIR_MAC_registro_y.vhd
28. PID_IIR_MAC_resultado.vhd
29. PID_IIR_MAC_suma_72.vhd
30. PID_IIR_Mac72.vhd
31. PID_IIR_mux.vhd
32. PID_IIR_registro.vhd
33. PID_IIR_rom.vhd
34. PID_IIR_sincronizador.vhd
35. PID_limite.vhd
36. PID_main.vhd
37. PID_mux_dmux_reg.vhd
38. PID_RS.vhd
39. PID_RS_control.vhd
40. PID_RS_desplaza_1.vhd
41. PID_RS_desplaza_2.vhd
42. PID_RS_enlace.vhd
43. PID_RS_registro_1.vhd
44. PID_RS_registro_13.vhd
45. PID_RS_resta_1.vhd
46. PRM_acumulador.vhd
47. PRM_contador.vhd
48. PRM_control.vhd
49. PRM_main.vhd
50. PRM_reg_desp.vhd
51. PRM_resultado.vhd
52. PRM_suma_17.vhd

53. reg_data_2.vhd
54. RS232_rx_dmux_1_5.vhd
55. RS232_rx_ff.vhd
56. RS232_rx_fsm.vhd
57. RS232_rx_main.vhd
58. RS232_rx_reg_corr.vhd
59. RS232_rx_sclk.vhd
60. RS232_rx_sinc_pu.vhd
61. RS232_rx_sinc1.vhd
62. RS232_rx_trama.vhd
63. RS232_rx_tx_main.vhd
64. RS232_tx_ff.vhd
65. RS232_tx_fsm.vhd
66. RS232_tx_main.vhd
67. RS232_tx_mux_11_1.vhd
68. RS232_tx_mux_4_1.vhd
69. RS232_tx_sclk.vhd
70. RS232_tx_trama.vhd
71. SYS_calc_mol.vhd
72. SYS_comparador.vhd
73. SYS_con_prog_16.vhd
74. SYS_control.vhd
75. SYS_ff.vhd
76. SYS_M_acumulador.vhd
77. SYS_M_control.vhd
78. SYS_M_main.vhd
79. SYS_M_recodificador.vhd
80. SYS_M_registro_X.vhd
81. SYS_M_registro_Y.vhd
82. SYS_M_resultado.vhd
83. SYS_M_suma_64.vhd

- 84. SYS_main.vhd
- 85. SYS_mux_6_1.vhd
- 86. SYS_mux_dmux_reg.vhd
- 87. SYS_pre_01Hz.vhd
- 88. SYS_RS.vhd

El código correspondiente a algunos de estos programas es descrito a continuación:

```

library IEEE;
use IEEE.std_logic_1164.all;

entity main is
  port(
    RST   : in std_logic;           -- Entrada de RESET maestro
    CLK   : in std_logic;           -- Entrada de reloj maestro de 50 MHz
    -- comunicacion RS232
    Rx    : in std_logic;           -- Entrada de dato serial
    Tx    : out std_logic;          -- Salida de dato serial
    -- comunicacion ADCs
    ADC_CS : out std_logic;         -- CS para ADC
    ADC_SCLK : out std_logic;       -- salida de reloj para ADC;
    ADC_DOUT : in std_logic_vector(1 downto 0); -- Entrada de datos del ADC;
    ADC_DIN  : out std_logic_vector(1 downto 0); -- salida datos para el ADC;
    -- comunicacion DACs
    DAC_SYNC : out std_logic;       -- SYNC para DAC
    DAC_SCLK : out std_logic;       -- salida de reloj para DAC;
    DAC_DIN  : out std_logic_vector (7 downto 0) -- salida datos para el DAC
  );
end main;

architecture main of main is
  component rs232_rx_tx_main is
    port(
      RST   : in std_logic;           -- Entrada de RESET maestro
      CLK   : in std_logic;           -- Entrada de reloj maestro de 50 MHz
      Rx    : in std_logic;           -- Entrada de dato serial
      Tx    : out std_logic;          -- Salida de dato serial

      IOW   : out std_logic;          -- Salida de control de escritura
      IOR   : out std_logic;          -- Salida de control de lectura

      ADD   : out std_logic_vector(6 downto 0); -- Salida de bus de direccion
      DI    : out std_logic_vector(31 downto 0); -- Salida de dato hacia el dispositivo
      DO    : in std_logic_vector(31 downto 0) -- Entrada de dato hacia el exterior
    );
  end component;

  component ADC_main is
    port(
      RST   : in std_logic;           -- Entrada de RESET maestro
      CLK   : in std_logic;           -- Entrada de reloj maestro de 50 MHz

```

```

        ADDS : in std_logic_vector(6 downto 0); -- Entrada direccion que identifica al controlador de ADCs
        ADD  : in std_logic_vector(6 downto 0); -- Entrada de bus de direcciones
        IOW  : in std_logic;                -- Entrada de señal de escritura
        IOR  : in std_logic;                -- Entrada de señal de lectura
        -- Entrada y salida de bus de datos
        DI   : in std_logic_vector(31 downto 0); -- Entrada de bus de datos
        DO   : out std_logic_vector(31 downto 0); -- Salida de bus de datos
        DOI  : in std_logic_vector(31 downto 0); -- Entrada de datos de otro componente

        D0   : out std_logic_vector(12 downto 0); -- Salida de dato de canal 0
        D1   : out std_logic_vector(12 downto 0); -- Salida de dato de canal 1
        D2   : out std_logic_vector(12 downto 0); -- Salida de dato de canal 2
        D3   : out std_logic_vector(12 downto 0); -- Salida de dato de canal 3
        D4   : out std_logic_vector(12 downto 0); -- Salida de dato de canal 4
        D5   : out std_logic_vector(12 downto 0); -- Salida de dato de canal 5
        D6   : out std_logic_vector(12 downto 0); -- Salida de dato de canal 6
        D7   : out std_logic_vector(12 downto 0); -- Salida de dato de canal 7

        CS   : out std_logic;                -- CS para ADC
        SCLK : out std_logic;                -- salida de reloj para ADC;
        DOUT : in std_logic_vector(1 downto 0); -- Entrada de datos del ADC;
        DIN  : out std_logic_vector(1 downto 0); -- salida datos para el ADC;

        RDY  : out std_logic                -- salida de indicacion de final de conversion
    );
end component;

component DAC_main is
    port(
        RST : in std_logic;                -- Entrada de RESET maestro
        CLK : in std_logic;                -- Entrada de reloj maestro de 50 MHz
        STR : in std_logic;                -- Entrada de inicio de conversion.
        D0  : in std_logic_vector (11 downto 0); -- Entrada de datos para DAC_0
        D1  : in std_logic_vector (11 downto 0); -- Entrada de datos para DAC_1
        D2  : in std_logic_vector (11 downto 0); -- Entrada de datos para DAC_2
        D3  : in std_logic_vector (11 downto 0); -- Entrada de datos para DAC_3
        D4  : in std_logic_vector (11 downto 0); -- Entrada de datos para DAC_4
        D5  : in std_logic_vector (11 downto 0); -- Entrada de datos para DAC_5
        D6  : in std_logic_vector (11 downto 0); -- Entrada de datos para DAC_6
        D7  : in std_logic_vector (11 downto 0); -- Entrada de datos para DAC_7
        SYNC : out std_logic;                -- SYNC para DAC
        SCLK : out std_logic;                -- salida de reloj para DAC;
        DIN  : out std_logic_vector (7 downto 0) -- salida datos para el DAC
    );
end component;

component PID_main is
    port(
        RST : in std_logic;                -- Entrada de RESET maestro
        CLK : in std_logic;                -- Entrada de reloj maestro de
50 MHz
        ADDS : in std_logic_vector(6 downto 3); -- Entrada direccion que identifica cada PID
        ADD  : in std_logic_vector(6 downto 0); -- Entrada de bus de direcciones
        IOW  : in std_logic;                -- Entrada de señal de escritura
        IOR  : in std_logic;                -- Entrada de señal de lectura
        -- inicio y fin
        STR  : in std_logic;                -- Entrada de inicio
de procesamiento
        RDY  : out std_logic;                -- Salida de señal de fin de procesamiento
        -- Entrada y salida de bus de datos

```

```

DI      : in std_logic_vector(31 downto 0); -- Entrada de bus de datos
DO      : out std_logic_vector(31 downto 0); -- Salida de bus de datos
DOI     : in std_logic_vector(31 downto 0); -- Entrada de datos de otro componente
-- Entrada y salida de datos procesados
X       : in std_logic_vector(12 downto 0); -- Entrada de vector de retroalimentacion
Y       : out std_logic_vector(11 downto 0) -- Salida de control
);
end component;

component reg_data is
port(
RST    : in std_logic;
CLK    : in std_logic;

ADDS   : in std_logic_vector(6 downto 0); -- Entrada direccion que identifica al controlador de ADCs
ADD    : in std_logic_vector(6 downto 0); -- Entrada de bus de direcciones
IOW    : in std_logic;                  -- Entrada de señal de escritura
IOR    : in std_logic;                  -- Entrada de señal de lectura
-- Entrada y salida de bus de datos
DI     : in std_logic_vector(31 downto 0); -- Entrada de bus de datos
DO     : out std_logic_vector(31 downto 0); -- Salida de bus de datos
DOI    : in std_logic_vector(31 downto 0); -- Entrada de datos de otro componente
-- Entrada y salida de datos internos
D_0    : in std_logic_vector(12 downto 0);
D_1    : in std_logic_vector(12 downto 0);
Q_0    : out std_logic_vector(12 downto 0);
Q_1    : out std_logic_vector(12 downto 0)
);
end component;

signal sIOW    : std_logic;
signal sIOR    : std_logic;
signal sADD    : std_logic_vector (6 downto 0);
signal sDI     : std_logic_vector (31 downto 0);
signal sDO     : std_logic_vector (31 downto 0);
--signal sPID_RDY_1 : std_logic;
signal sDOI_0  : std_logic_vector (31 downto 0);
signal sDOI_1 : std_logic_vector (31 downto 0);
signal sDOI_2 : std_logic_vector (31 downto 0);
signal sDOI_3 : std_logic_vector (31 downto 0);
signal sDOI_4 : std_logic_vector (31 downto 0);

signal sADC_D0 : std_logic_vector (12 downto 0);
signal sADC_D1 : std_logic_vector (12 downto 0);
signal sADC_D2 : std_logic_vector (12 downto 0);
signal sADC_D3 : std_logic_vector (12 downto 0);
signal sADC_D4 : std_logic_vector (12 downto 0);
signal sADC_D5 : std_logic_vector (12 downto 0);
signal sADC_D6 : std_logic_vector (12 downto 0);
signal sADC_D7 : std_logic_vector (12 downto 0);
signal sADC_RDY : std_logic;

signal sDAC_D0 : std_logic_vector (12 downto 0);
signal sDAC_D1 : std_logic_vector (12 downto 0);
signal sDAC_D2 : std_logic_vector (12 downto 0);
signal sDAC_D3 : std_logic_vector (12 downto 0);
signal sDAC_D4 : std_logic_vector (12 downto 0);
signal sDAC_D5 : std_logic_vector (12 downto 0);
signal sDAC_D6 : std_logic_vector (12 downto 0);
signal sDAC_D7 : std_logic_vector (12 downto 0);

begin

```

```

    l_rx_tx      : rs232_rx_tx_main port map(RST, CLK, Rx, Tx, sLOW, sIOR, sADD, sDI, sDO);

    main_ADC    : ADC_main      port map(RST, CLK, "0000000", sADD, sLOW, sIOR, sDI, sDO, sDOI_0, sADC_D0,
sADC_D1, sADC_D2, sADC_D3, sADC_D4, sADC_D5, sADC_D6, sADC_D7, ADC_CS, ADC_SCLK, ADC_DOUT, ADC_DIN,
sADC_RDY);
    main_DAC    : DAC_main      port map(RST, CLK, sADC_RDY, sDAC_D0(11 downto 0), sDAC_D1(11 downto
0), sDAC_D2(11 downto 0), sDAC_D3(11 downto 0), sDAC_D4(11 downto 0), sDAC_D5(11 downto 0), sDAC_D6(11 downto 0),
sDAC_D7(11 downto 0), DAC_SYNC, DAC_SCLK, DAC_DIN);
    main_registro_1 : reg_data  port map(RST, CLK, "0000001", sADD, sLOW, sIOR, sDI, sDOI_0, sDOI_1, sADC_D0,
sADC_D1, sDAC_D0, sDAC_D1);
    main_registro_2 : reg_data  port map(RST, CLK, "0000010", sADD, sLOW, sIOR, sDI, sDOI_1, sDOI_2, sADC_D2,
sADC_D3, sDAC_D2, sDAC_D3);
    main_registro_3 : reg_data  port map(RST, CLK, "0000011", sADD, sLOW, sIOR, sDI, sDOI_2, sDOI_3, sADC_D4,
sADC_D5, sDAC_D4, sDAC_D5);
    main_registro_4 : reg_data  port map(RST, CLK, "0000100", sADD, sLOW, sIOR, sDI, sDOI_3, sDOI_4, sADC_D6,
sADC_D7, sDAC_D6, sDAC_D7);
    --main_PID_1   : PID_main    port map(RST, CLK, "0001", sADD, sLOW, sIOR, sADC_RDY, sPID_RDY_1, sDI,
sDOI_0, sDOI_1, sX_0, sY_0);
    sDOI_4 <= (others => '0');

end main;
library IEEE;
use IEEE.std_logic_1164.all;

entity ADC_main is
    port(
        RST : in std_logic; -- Entrada de RESET maestro
        CLK : in std_logic; -- Entrada de reloj maestro de 50 MHz

        ADDS : in std_logic_vector(6 downto 0); -- Entrada direccion que identifica al controlador de ADCs
        ADD : in std_logic_vector(6 downto 0); -- Entrada de bus de direcciones
        IOW : in std_logic; -- Entrada de señal de escritura
        IOR : in std_logic; -- Entrada de señal de lectura
        -- Entrada y salida de bus de datos
        DI : in std_logic_vector(31 downto 0); -- Entrada de bus de datos
        DO : out std_logic_vector(31 downto 0); -- Salida de bus de datos
        DOI : in std_logic_vector(31 downto 0); -- Entrada de datos de otro componente

        D0 : out std_logic_vector(12 downto 0); -- Salida de dato de canal 0
        D1 : out std_logic_vector(12 downto 0); -- Salida de dato de canal 1
        D2 : out std_logic_vector(12 downto 0); -- Salida de dato de canal 2
        D3 : out std_logic_vector(12 downto 0); -- Salida de dato de canal 3
        D4 : out std_logic_vector(12 downto 0); -- Salida de dato de canal 4
        D5 : out std_logic_vector(12 downto 0); -- Salida de dato de canal 5
        D6 : out std_logic_vector(12 downto 0); -- Salida de dato de canal 6
        D7 : out std_logic_vector(12 downto 0); -- Salida de dato de canal 7

        CS : out std_logic; -- CS para ADC
        SCLK : out std_logic; -- salida de reloj para ADC;
        DOUT : in std_logic_vector(1 downto 0); -- Entrada de datos del ADC;
        DIN : out std_logic_vector(1 downto 0); -- salida datos para el ADC;

        RDY : out std_logic -- salida de indicacion de final de conversion
    );
end ADC_main;

architecture ADC_main of ADC_main is

component ADC_base_m is
    port(

```



```

        RST : in std_logic;
        CLK : in std_logic;
        N   : in std_logic_vector(15 downto 0);           --1100001101010000 muestreo cada milisegundo
        Y   : out std_logic
    );
end component;

component ADC_fsm is
    port(
        RST : in std_logic; -- Entrada de reinicializacion general
        CLK : in std_logic; -- Entrada de reloj maestro de 50 MHz
        S_RST : in std_logic; -- Entrada de reinicializacion por software de la maquina de estados
        STR : in std_logic; -- Entrada de señal de arranque de maquina de estados
        FT : in std_logic; -- Entrada de señal de fin de trama
        CS : out std_logic; -- Salida para reiniciar base de tiempo SCLK
        S : out std_logic; -- Salida que hace el cambio de dato a ser enviado a los ADCs
        RDY : out std_logic -- Salida de señal de fin de conversion
    );
end component;

component ADC_base_SCLK is
    port(
        RST : in std_logic;
        CLK : in std_logic;
        CS : in std_logic;
        SCLKP : out std_logic;
        SCLK : out std_logic
    );
end component;

component ADC_reg_range is
    port(
        RST : in std_logic;
        CLK : in std_logic;
        ADDS : in std_logic_vector(6 downto 0); -- Entrada de direccion que identifica a cada PID
        ADD : in std_logic_vector(6 downto 0); -- Entrada de bus de direcciones
        IOW : in std_logic; -- Entrada de señal de escritura
        IOR : in std_logic; -- Entrada de señal de lectura
        Di : in std_logic_vector(31 downto 0); -- Entrada de bus de datos de comunicacion
        Do : out std_logic_vector(31 downto 0); -- Salida de bus de datos de comunicacion
        Doi : in std_logic_vector(31 downto 0); -- Entrada de datos de otro componente
        Do_0 : out std_logic_vector(9 downto 0); -- Salida de dato de intervalos de voltajes de conversion ADC_0
        Do_1 : out std_logic_vector(9 downto 0) -- Salida de dato de intervalos de voltajes de conversion ADC_1
    );
end component;

component ADC_mux_2_1 is
    port(
        S : in std_logic; -- Selector
        P0 : in std_logic_vector (9 downto 0); -- Entrada 0
        P1 : in std_logic_vector (9 downto 0); -- Entrada 1
        Q : out std_logic_vector (9 downto 0) -- Salida
    );
end component;

component ADC_ch_addr is
    port(
        RST : in std_logic;
        CLK : in std_logic;
        FT : in std_logic;
        ADD : out std_logic_vector (1 downto 0)
    );

```

```

end component;

component ADC_dmux_1_4 is
port(
  S : in std_logic_vector(1 downto 0); -- Selector
  X : in std_logic;           -- Entrada
  Y0 : out std_logic;        -- Salida 0
  Y1 : out std_logic;        -- Salida 1
  Y2 : out std_logic;        -- Salida 2
  Y3 : out std_logic         -- Salida 3
);
end component;

component ADC_trama is
port(
  RST : in std_logic;
  CLK : in std_logic;
  CLKP : in std_logic;
  CS : in std_logic;
  FT : out std_logic;
  S : out std_logic_vector(3 downto 0)
);
end component;

component ADC_mux_15_1 is
port(
  S : in std_logic_vector(3 downto 0); -- Selector
  X : in std_logic_vector(9 downto 0); -- Entrada
  Y : out std_logic                    -- Salida
);
end component;

component ADC_reg_corr is
generic(n : integer := 16);
port(
  CLK : in std_logic;
  RST : in std_logic;
  D : in std_logic;
  CLKP : in std_logic;
  Q : out std_logic_vector(14 downto 0)
);
end component;

component ADC_sinc_pu is
port(
  X : in std_logic; --entrada asincrona
  CLK : in std_logic;
  RST : in std_logic;
  XSP : out std_logic --salida sincrona
);
end component;

component ADC_ff is
port(
  CLK : in std_logic;
  RST : in std_logic;
  PER : in std_logic;
  D : in std_logic_vector(12 downto 0); --entrada de datos
  Q : out std_logic_vector(12 downto 0) --salida datos
);
end component;

```

```

signal sSTR : std_logic;
signal sFT : std_logic;
signal sCS : std_logic;
signal sS : std_logic;
signal sSCLKP : std_logic;
signal sRANGE_0 : std_logic_vector(9 downto 0);
signal sRANGE_1 : std_logic_vector(9 downto 0);

signal sFTSP : std_logic;
signal sCHANN : std_logic_vector(9 downto 0);

signal sREG_0 : std_logic_vector(9 downto 0);
signal sREG_1 : std_logic_vector(9 downto 0);

signal sADD : std_logic_vector(1 downto 0);
signal sSDIN : std_logic_vector(3 downto 0);
signal sDATO_0 : std_logic_vector(14 downto 0);
signal sDATO_1 : std_logic_vector(14 downto 0);

signal sCSSP : std_logic;
signal sCSRC_0 : std_logic_vector(3 downto 0);
signal sCSRC_1 : std_logic_vector(3 downto 0);

begin

    CS <= sCS;
    sCHANN(9 downto 8) <= "00";
    sCHANN(7 downto 6) <= sADD;
    sCHANN(5 downto 0) <= "000001";

    Muestreo : ADC_base_m port map(RST, CLK, "1100001101010000", sSTR);
    Fsm : ADC_fsm port map(RST, CLK, IOW, sSTR, sFT, sCS, sS, RDY);
    gen_sclk : ADC_base_SCLK port map(RST, CLK, sCS, sSCLKP, SCLK);

    reg_intervalo : ADC_reg_range port map(RST, CLK, ADDS, ADD, IOW, IOR, DI, DO, DOI, sRANGE_0,
sRANGE_1);

    mux_registros_0 : ADC_mux_2_1 port map(sS, sRANGE_0, sCHANN, sREG_0);
    mux_registros_1 : ADC_mux_2_1 port map(sS, sRANGE_1, sCHANN, sREG_1);

    sinc_pulso_u_1 : ADC_sinc_pu port map(sFT, CLK, RST, sFTSP);

    Address : ADC_ch_addr port map(RST, CLK, sFTSP, sADD);

    dmux_reg_corr_0 : ADC_dmux_1_4 port map(sDATO_0(14 downto 13), sCSSP, sCSRC_0(0), sCSRC_0(1),
sCSRC_0(2), sCSRC_0(3));
    dmux_reg_corr_1 : ADC_dmux_1_4 port map(sDATO_1(14 downto 13), sCSSP, sCSRC_1(0), sCSRC_1(1),
sCSRC_1(2), sCSRC_1(3));

    Trama : ADC_trama port map(RST, CLK, sSCLKP, sCS, sFT, sSDIN);

    mux_DIN_0 : ADC_mux_15_1 port map(sSDIN, sREG_0, DIN(0));
    mux_DIN_1 : ADC_mux_15_1 port map(sSDIN, sREG_1, DIN(1));

    reg_corr_0 : ADC_reg_corr port map(CLK, RST, DOUT(0), sSCLKP, sDATO_0);
    reg_corr_1 : ADC_reg_corr port map(CLK, RST, DOUT(1), sSCLKP, sDATO_1);

    sinc_pulso_u_2 : ADC_sinc_pu port map(sCS, CLK, RST, sCSSP);

    flip_flop_0_0 : ADC_ff port map(CLK, RST, sCSRC_0(0), sDATO_0(12 downto 0), D0);
    flip_flop_0_1 : ADC_ff port map(CLK, RST, sCSRC_0(1), sDATO_0(12 downto 0), D1);

```

```

flip_flop_0_2 : ADC_ff      port map(CLK, RST, sCSRC_0(2), sDATO_0(12 downto 0), D2);
flip_flop_0_3 : ADC_ff      port map(CLK, RST, sCSRC_0(3), sDATO_0(12 downto 0), D3);

flip_flop_1_0 : ADC_ff      port map(CLK, RST, sCSRC_1(0), sDATO_1(12 downto 0), D4);
flip_flop_1_1 : ADC_ff      port map(CLK, RST, sCSRC_1(1), sDATO_1(12 downto 0), D5);
flip_flop_1_2 : ADC_ff      port map(CLK, RST, sCSRC_1(2), sDATO_1(12 downto 0), D6);
flip_flop_1_3 : ADC_ff      port map(CLK, RST, sCSRC_1(3), sDATO_1(12 downto 0), D7);

end ADC_main;

library IEEE;
use IEEE.std_logic_1164.all;

entity DAC_main is
  port(
    RST : in std_logic;           -- Entrada de RESET maestro
    CLK : in std_logic;          -- Entrada de reloj maestro de 50 MHz
    STR : in std_logic;          -- Entrada de inicio de conversion.
    D0 : in std_logic_vector (11 downto 0);-- Entrada de datos para DAC_0
    D1 : in std_logic_vector (11 downto 0);-- Entrada de datos para DAC_1
    D2 : in std_logic_vector (11 downto 0);-- Entrada de datos para DAC_2
    D3 : in std_logic_vector (11 downto 0);-- Entrada de datos para DAC_3
    D4 : in std_logic_vector (11 downto 0);-- Entrada de datos para DAC_4
    D5 : in std_logic_vector (11 downto 0);-- Entrada de datos para DAC_5
    D6 : in std_logic_vector (11 downto 0);-- Entrada de datos para DAC_6
    D7 : in std_logic_vector (11 downto 0);-- Entrada de datos para DAC_7
    SYNC : out std_logic;        -- SYNC para DAC
    SCLK : out std_logic;        -- salida de reloj para DAC;
    DIN : out std_logic_vector (7 downto 0) -- salida datos para el DAC
  );
end DAC_main;

architecture DAC_main of DAC_main is

  component DAC_fsm is
    port(
      RST : in std_logic;
      CLK : in std_logic;
      STR : in std_logic;
      FT : in std_logic;
      SYNC : out std_logic
    );
  end component;

  component DAC_base_SCLK is
    port(
      RST : in std_logic;
      CLK : in std_logic;
      SYNC : in std_logic;
      SCLKP : out std_logic;
      SCLK : out std_logic
    );
  end component;

  component DAC_trama is
    port(
      RST : in std_logic;
      CLK : in std_logic;
      SCLKP : in std_logic;
      SYNC : in std_logic;
      FT : out std_logic;
      S : out std_logic_vector(4 downto 0)
    )
  end component;

```

```

    );
end component;

component DAC_mux_16_1 is
port(
    S : in std_logic_vector(4 downto 0); -- Selector
    X : in std_logic_vector(11 downto 0); -- Entrada
    Y : out std_logic           -- Salida
    );
end component;

signal sFT      : std_logic;
signal sSYNC    : std_logic;
signal sSCLKP   : std_logic;
signal sS_DIN   : std_logic_vector (4 downto 0);

begin
    SYNC <= sSYNC;

    fsm      : DAC_fsm      port map(RST, CLK, STR, sFT, sSYNC);
    gen_sclk  : DAC_base_SCLK port map(RST, CLK, sSYNC, sSCLKP, SCLK);
    trama     : DAC_trama   port map(RST, CLK, sSCLKP, sSYNC, sFT, sS_DIN);
    mux_DIN_0 : DAC_mux_16_1 port map(sS_DIN, D0, DIN(0));
    mux_DIN_1 : DAC_mux_16_1 port map(sS_DIN, D1, DIN(1));
    mux_DIN_2 : DAC_mux_16_1 port map(sS_DIN, D2, DIN(2));
    mux_DIN_3 : DAC_mux_16_1 port map(sS_DIN, D3, DIN(3));
    mux_DIN_4 : DAC_mux_16_1 port map(sS_DIN, D4, DIN(4));
    mux_DIN_5 : DAC_mux_16_1 port map(sS_DIN, D5, DIN(5));
    mux_DIN_6 : DAC_mux_16_1 port map(sS_DIN, D6, DIN(6));
    mux_DIN_7 : DAC_mux_16_1 port map(sS_DIN, D7, DIN(7));
end DAC_main;

library IEEE;
use IEEE.std_logic_1164.all;

entity PID_main is
port(
    RST : in std_logic; -- Entrada de RESET maestro
    CLK : in std_logic; -- Entrada de reloj maestro de
50 MHz
    ADDS : in std_logic_vector(6 downto 3); -- Entrada direccion que identifica cada PID
    ADD  : in std_logic_vector(6 downto 0); -- Entrada de bus de direcciones
    IOW  : in std_logic; -- Entrada de señal de escritura
    IOR  : in std_logic; -- Entrada de señal de lectura
    -- inicio y fin
    STR  : in std_logic; -- Entrada de inicio
de procesamiento
    RDY  : out std_logic; -- Salida de señal de fin de procesamiento
    -- Entrada y salida de bus de datos
    DI   : in std_logic_vector(31 downto 0); -- Entrada de bus de datos
    DO   : out std_logic_vector(31 downto 0); -- Salida de bus de datos
    DOI  : in std_logic_vector(31 downto 0); -- Entrada de datos de otro componente
    -- Entrada y salida de datos procesados
    X    : in std_logic_vector(12 downto 0); -- Entrada de vector de retroalimentacion
    Y    : out std_logic_vector(11 downto 0) -- Salida de control
    );
end PID_main;

architecture PID_main of PID_main is

component PID_mux_dmux_reg is
port(

```

```

RST : in std_logic;
CLK : in std_logic;
ADDS : in std_logic_vector(6 downto 3); -- Entrada de direccion que identifica a cada PID
ADD : in std_logic_vector(6 downto 0); -- Entrada de bus de direcciones
IOW : in std_logic; -- Entrada de señal de escritura
IOR : in std_logic; -- Entrada de señal de lectura
Di : in std_logic_vector(31 downto 0); -- Entrada de bus de datos de comunicacion
Do : out std_logic_vector(31 downto 0); -- Salida de bus de datos de comunicacion
Doi : in std_logic_vector(31 downto 0); -- Entrada de datos de otro componente
Do_0 : out std_logic_vector(31 downto 0); -- Salida de dato de Set Point
Do_1 : out std_logic_vector(31 downto 0); -- Salida de dato para ROM de coeficientes A0
Do_2 : out std_logic_vector(31 downto 0); -- Salida de dato para ROM de coeficientes A_1
Do_3 : out std_logic_vector(31 downto 0); -- Salida de dato para ROM de coeficientes A_2
Di_4 : in std_logic_vector(31 downto 0); -- Entrada de dato procesado de la MAC
Do_4 : out std_logic_vector(31 downto 0); -- Redireccion de dato procesado o valor definido por
el usuario hacia el limitador
Di_5 : in std_logic_vector(31 downto 0); -- Entrada de dato de retroalimentacion
BYPASS : out std_logic -- Salida de derivacion de
señal de inicio proceso de dato
);
end component;

component PID_RS is
port(
RST : in std_logic; -- Entrada de reset maestro
CLK : in std_logic; -- Entrada de reloj maestro
STS : in std_logic; -- Entrada de inicio de
conversion
A : in std_logic_vector(12 downto 0); -- Entrada de dato de Set Point
B : in std_logic_vector(12 downto 0); -- Entrada de dato de Retroalimentacion
Ci : in std_logic; -- Entrada de Carry
Co : out std_logic; -- Salida de Carry
S : out std_logic_vector(12 downto 0); -- Salida de resultado de la resta
RDY : out std_logic -- Salida que indica
fin de resta
);
end component;

component PID_IIR is
port(
RST : in std_logic;
CLK : in std_logic;
X : in std_logic_vector(31 downto 0);
A_0 : in std_logic_vector(31 downto 0);
A_1 : in std_logic_vector(31 downto 0);
A_2 : in std_logic_vector(31 downto 0);
STM : in std_logic;
Y : out std_logic_vector(31 downto 0);
RDY : out std_logic
);
end component;

component PID_bypass is
port(
BYPASS : in std_logic;
I : in std_logic;
I_0 : in std_logic;
O : out std_logic;
O_0 : out std_logic
);
end component;

```

```

component PID_limite is
    port(
        I : in std_logic_vector(31 downto 0);
        O : out std_logic_vector(11 downto 0)
    );
end component;

signal sDO : std_logic_vector(31 downto 0);
signal sDo_0 : std_logic_vector(31 downto 0);
signal sDo_1 : std_logic_vector(31 downto 0);
signal sDo_2 : std_logic_vector(31 downto 0);
signal sDo_3 : std_logic_vector(31 downto 0);
signal sDi_4 : std_logic_vector(31 downto 0);
signal sDo_4 : std_logic_vector(31 downto 0);
signal sDi_5 : std_logic_vector(31 downto 0);
signal sBYPASS : std_logic;
signal sO_0 : std_logic;
signal sCo : std_logic;
signal sERROR : std_logic_vector(31 downto 0);
signal sRS_RDY : std_logic;
signal sY : std_logic_vector(31 downto 0);
signal sI_0 : std_logic;
begin
    process(X)
    begin
        if(X(12) = '1')then
            sDi_5(31 downto 17) <= (others => '1');
        else
            sDi_5(31 downto 17) <= (others => '0');
        end if;
        sDi_5(16 downto 4) <= X;
        sDi_5(3 downto 0) <= (others => '0');
    end process;

    process(sERROR)
    begin
        if(sERROR(16) = '1')then
            sERROR(31 downto 17) <= (others => '1');
        else
            sERROR(31 downto 17) <= (others => '0');
        end if;
        sERROR(3 downto 0) <= (others => '0');
    end process;

    mux_demux_reg : PID_mux_dmux_reg port map(RST, CLK, ADDS, ADD, IOW, IOR, DI, DO, DOI, sDo_0, sDo_1,
sDo_2, sDo_3, sDi_4, sDo_4, sDi_5, sBYPASS);
    resta_serie : PID_RS port map(RST, CLK, sO_0, sDo_0(16 downto 4), X, '0', sCo, sERROR(16
downto 4), sRS_RDY);
    PID : PID_IIR port map(RST, CLK, sERROR, sDo_1, sDo_2, sDo_3, sRS_RDY, sY, sI_0);
    RDY_bypass : PID_bypass port map(sBYPASS, STR, sI_0, RDY, sO_0);
    limitador : PID_limite port map(sY, Y);

end PID_main;

library IEEE;
use IEEE.std_logic_1164.all;

entity rs232_rx_tx_main is
    port(
        RST : in std_logic; -- Entrada de RESET maestro
        CLK : in std_logic; -- Entrada de reloj maestro de 50 MHz
        Rx : in std_logic; -- Entrada de dato serial
    );
end entity;

```

```

        Tx      : out std_logic;                -- Salida de dato serial

        IOW     : out std_logic;                -- Salida de control de escritura
        IOR     : out std_logic;                -- Salida de control de lectura

        ADD     : out std_logic_vector(6 downto 0); -- Salida de bus de direccion
        DI      : out std_logic_vector(31 downto 0); -- Salida de dato hacia el dispositivo
        DO      : in  std_logic_vector(31 downto 0) -- Entrada de dato hacia el exterior
    );
end rs232_rx_tx_main;

architecture rs232_rx_tx_main of rs232_rx_tx_main is

    component rs232_rx_main is
        port(
            RST  : in  std_logic;                -- Entrada de RESET maestro
            CLK  : in  std_logic;                -- Entrada de reloj maestro de 50 MHz
            Rx   : in  std_logic;                -- Entrada de dato serial

            D0   : out std_logic_vector(7 downto 0); -- Salida de dato serial 0
            D1   : out std_logic_vector(7 downto 0); -- Salida de dato serial 1
            D2   : out std_logic_vector(7 downto 0); -- Salida de dato serial 2
            D3   : out std_logic_vector(7 downto 0); -- Salida de dato serial 3
            D4   : out std_logic_vector(7 downto 0); -- Salida de dato serial 4

            RDY  : out std_logic                 -- salida de indicacion de final de recepcion de trama
        );
    end component;

    component rs232_tx_main is
        port(
            RST  : in  std_logic;                -- Entrada de RESET maestro
            CLK  : in  std_logic;                -- Entrada de reloj maestro de 50 MHz
            STR  : in  std_logic;                -- Entrada de señal de arranque

            D0   : in  std_logic_vector(7 downto 0); -- Entrada de dato paralelo 0
            D1   : in  std_logic_vector(7 downto 0); -- Entrada de dato paralelo 1
            D2   : in  std_logic_vector(7 downto 0); -- Entrada de dato paralelo 2
            D3   : in  std_logic_vector(7 downto 0); -- Entrada de dato paralelo 3

            Tx   : out std_logic;                -- salida de dato transmitido
            RDY  : out std_logic                 -- salida de indicacion de final de recepcion de trama
        );
    end component;

    signal sDI   : std_logic_vector(7 downto 0);
    signal sIOR  : std_logic;
    signal sRDY_rx : std_logic;
    signal sRDY_tx : std_logic;

    begin
        ADD <= sDI(6 downto 0);
        IOW <= sRDY_rx and sDI(7);
        sIOR <= sRDY_rx and not sDI(7);
        IOR <= sIOR;

        l_rx : rs232_rx_main port map(RST, CLK, Rx, sDI, DI(7 downto 0), DI(15 downto 8), DI(23 downto 16), DI(31
downto 24), sRDY_rx);
        l_tx : rs232_tx_main port map(RST, CLK, sIOR, DO(7 downto 0), DO(15 downto 8), DO(23 downto 16), DO(31
downto 24), Tx, sRDY_tx);
    end rs232_rx_tx_main;

```


B.2. Listado de programas en C++ del sistema de control

Se presenta el código del programa en C++ que se encarga de la interfaz con el sistema de control.

```
#include <dos.h>
#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <math.h>
#include <time.h>

/* Defines Serial Ports Base Address */
/* COM1 0x3F8 */
/* COM2 0x2F8 */
/* COM3 0x3E8 */
/* COM4 0x2E8 */

#define PORT1 0x3F8 /* Port Address Goes Here */
#define IRQ4 0x0C /* Com Port's IRQ here (Must also change PIC setting) */
#define TRUE 1
#define FALSE 0
#define SAMPLE 0.001

unsigned int EOC;
unsigned long readData[4];
int events = 0;

float K_p = 0;
float K_i = 0;
float K_d = 0;

double K_p_double = 0;
double K_i_double = 0;
double K_d_double = 0;

unsigned int enteros[2];

double CHAN_1 = 0;
double CHAN_2 = 0;
double PRESION_P = 0;
double VOLUMEN_P = 0;
double MOL = 0;
double ZERO = 0;
double RESTA = 0;
double ESTADO = 0;
double TEMP = 0;
double COMANDO = 0;

time_t Adq_time_1, Adq_time_2;
time_t set_channel_1, set_channel_2;

void beginningofworks(void);
void endofworks(void);

//ESCRIBE O LEE UN SOLO CARACTER
void write_ch(unsigned char c);
```

```

//ESCRIBE O LEE DATOS EN BITS
void write_raw(unsigned char c, unsigned long l);
unsigned long read_raw(unsigned char c);

//ESCRIBE O LEE DATOS EN PUNTO FIJO 16 x 16
void write_float_16x16(unsigned char c, float f);
float read_float_16x16(unsigned char c);

//ESCRIBE O LEE DATOS EN PUNTO FIJO 16 x 16 DOUBLE
void write_double_16x16(unsigned char c, double f);
double read_double_16x16(unsigned char c);

//LEE DATOS EN PUNTO FIJO 3 x 29
float read_float_3x29(unsigned char c);

//LEE DATOS EN PUNTO FIJO 3 x 29 DOUBLE
double read_double_3x29(unsigned char c);

//ESCRIBE Y LEE PARAMETROS DE PID
void set_p_PID(unsigned char dir, float kp, float ki, float kd);
void get_p_PID(unsigned char dir);
void set_SP(unsigned char dir, float sp);
float get_SP(unsigned char dir);
void set_Y(unsigned char dir, float y);
float get_Y(unsigned char dir);
float get_R(unsigned char dir);

//ESCRIBE Y LEE PARAMETROS DE PID DOUBLE
void set_p_PID_double(unsigned char dir, double kp, double ki, double kd);
void get_p_PID_double(unsigned char dir);
void set_SP_double(unsigned char dir, double sp);
double get_SP_double(unsigned char dir);
void set_Y_double(unsigned char dir, double y);
double get_Y_double(unsigned char dir);
double get_R_double(unsigned char dir);

void read_enteros(unsigned char dir);
void write_enteros(unsigned char dir, unsigned int D1, unsigned int D0);

void reg_datos(void);
void set_channel_range(void);

void interrupt (*oldIrq4)(...);
void interrupt eocTrue(...);

void main(void)
{
    unsigned char ch;
    // double CHAN_1 = 0;
    // double CHAN_2 = 0;
    // double PRESION_P = 0;
    // double VOLUMEN_P = 0;
    // double MOL = 0;
    // double ZERO = 0;
    // double RESTA = 0;
    // double ESTADO = 0;
    // double TEMP = 0;
    // double COMANDO = 0;

    beginningofworks();
}

```

```

clrscr();

//configuracion de intervalo de medicion de 0 a 10 V para
//todos los canales de sistema de adquisicion de datos
//write_raw(0x0, 0xFFFF);

set_p_PID_double(0x10,20.0,5.0,0.0); //parametros PID temperatura reactor
set_SP_double (0x10, 0.28); //temperatura de 15 grados centigrados
get_p_PID_double(0x10);
//write_enteros(0x9, 0xF, 0x1);
read_enteros(0x9);

printf("Kp: %f Ki: %f Kd: %f\n",K_p_double,K_i_double,K_d_double);
printf("SP: %f\n\n", get_SP_double(0x10));

printf("Tiempo en decimas de segundo absorcion: %i\n",enteros[1]);
printf("Tiempo en decimas de segundo asentamiento: %i\n",enteros[0]);

/*
ch = getch();
if (ch != 27)
{
    write_raw(0x0, 0xFFFF);
    get_Y_double(0x10);
} */

clrscr();

while(ch != 27)
{
    if(kbhit())
    {
        ch = getch();
        if(ch == 27)
            continue;
    }

    CHAN_1 = read_double_16x16(0x1);

    gotoxy(1,1);
    cprintf("Canal 1 : %lf", CHAN_1*2.041378914);

    if(kbhit())
    {
        ch = getch();
        if(ch == 27)
            continue;
    }

    CHAN_2 = read_double_16x16(0x2);

    gotoxy(1,3);
    cprintf("Canal 2 : %f", CHAN_2*1.6044105);

    if(kbhit())
    {
        ch = getch();
        if(ch == 27)
            continue;
    }

    PRESION_P = read_double_16x16(0x3);

```

```

gotoxy(24,1);
cprintf("Prom : %f", PRESION_P);
gotoxy(43,1);
cprintf("Presion (Atm): %f", PRESION_P*2.041378914);

if(kbhit())
{
    ch = getch();
    if(ch == 27)
        continue;
}

VOLUMEN_P = read_double_16x16(0x4);

gotoxy(24,3);
cprintf("Prom : %f", VOLUMEN_P);
gotoxy(43,3);
cprintf("volumen (L) : %f", VOLUMEN_P*1.6044105);

if(kbhit())
{
    ch = getch();
    if(ch == 27)
        continue;
}

MOL = read_double_3x29(0x5);

gotoxy(1,6);
cprintf("No. moles parciales: %f", MOL);

if(kbhit())
{
    ch = getch();
    if(ch == 27)
        continue;
}

ZERO = read_double_16x16(0x6);

gotoxy(1,13);
cprintf("Zero elevado : %f", ZERO);
gotoxy(30,13);
cprintf("Volumen Zero (L) : %f", ZERO*1.6044105);

if(kbhit())
{
    ch = getch();
    if(ch == 27)
        continue;
}

RESTA = read_double_16x16(0x7);

gotoxy(1,15);
cprintf("Resta : %f", RESTA);
gotoxy(30,15);
cprintf("Volumen muestra (L) : %f", RESTA*1.6044105);

if(kbhit())

```

```

        {
            ch = getch();
            if(ch == 27)
                continue;
        }

ESTADO = read_double_16x16(0x8);

gotoxy(1,18);
cprintf("Estado : %f", ESTADO);

if(kbhit())
{
    ch = getch();
    if(ch == 27)
        continue;
}

TEMP = get_R_double(0x10);

gotoxy(41,18);
cprintf("Temperatura (C) : %f", TEMP * 50);

if(kbhit())
{
    ch = getch();
    if(ch == 27)
        continue;
}

COMANDO = get_Y_double(0x10);

gotoxy(41,20);
cprintf("Comando de control : %f", COMANDO);

if(ESTADO != 0.0)
    reg_datos();

set_channel_range();

}

endofworks();
}

void beginningofworks(void)
{
    outportb(PORT1+1,0); /* Turn off interrupts - Port1 */

    oldIrq4 = getvect(IRQ4); /* Save old Interrupt Vector of later
                             recovery */

    setvect(IRQ4, eocTrue); /* Set Interrupt Vector Entry */
                             /* COM1 - 0x0C */
                             /* COM2 - 0x0B */
                             /* COM3 - 0x0C */
                             /* COM4 - 0x0B */

/* PORT 1 - Communication Settings */

```

```

    outportb(PORT1+3, 0x80); /* SET DLAB ON */
    outportb(PORT1+0, 0x01); /* Set Baud rate - Divisor Latch Low Byte */
        /* Default 0x03 = 38,400 BPS */
        /* 0x01 = 115,200 BPS */
        /* 0x02 = 57,600 BPS */
        /* 0x06 = 19,200 BPS */
        /* 0x0C = 9,600 BPS */
        /* 0x18 = 4,800 BPS */
        /* 0x30 = 2,400 BPS */
    outportb(PORT1+1, 0x00); /* Set Baud rate - Divisor Latch High Byte */
    outportb(PORT1+3, 0x03); /* 8 Bits, No Parity, 1 Stop Bit */
    outportb(PORT1+2, 0xC7); /* FIFO Control Register */
    outportb(PORT1+4, 0x0B); /* Turn on DTR, RTS, and OUT2 */

    outportb(0x21,(inportb(0x21)&0xEF)); /* Set Programmable Interrupt Controller */
        /* COM1 (IRQ4) - 0xEF */
        /* COM2 (IRQ3) - 0xF7 */
        /* COM3 (IRQ4) - 0xEF */
        /* COM4 (IRQ3) - 0xF7 */

    outportb(PORT1 + 1 , 0x01); /* Interrupt when data received */

    EOC = FALSE;
}

void endofworks(void)
{
    //seccion sensor

    // set_Y(0x8,0,0); //manda a 0 la salida de control de temperatura

    // set_p_PID(0x8, 0, 0, 0); //parametros PID control de temperatura
    // set_SP (0x8, 0); //set point PID control de temperatura

    //seccion interrupcion RS_232

    outportb(PORT1 + 1 , 0); /* Turn off interrupts - Port1 */
    outportb(0x21,(inportb(0x21) | 0x10)); /* MASK IRQ using PIC */
        /* COM1 (IRQ4) - 0x10 */
        /* COM2 (IRQ3) - 0x08 */
        /* COM3 (IRQ4) - 0x10 */
        /* COM4 (IRQ3) - 0x08 */
    setvect(IRQ4, oldIrq4); /* Restore old interrupt vector */
    outportb(0x21,(inportb(0x21)|0x10));
    return;
}

void write_ch(unsigned char c)
{
    outportb(PORT1,c);
}

void write_raw(unsigned char c, unsigned long l)
{
    unsigned int A;
    unsigned long int i;
    unsigned char ch = 0x0;

    A = c|0x80;
    write_ch(A);

    for(i=0;i<=3;i++)

```

```

    {
        A = l>>8*i;
        write_ch(A);
    }
    for(i=0;i<=100000&&!ch;i++)
    {
        ch = inportb(PORT1+5);
        ch = ch&0x20;
    }
}

```

```

unsigned long read_raw(unsigned char c)
{
    unsigned long l = 0;
    unsigned long l2 = 0;
    unsigned long i;

    write_ch(c&0x7f);
    for(i = 0; i <= 9000000&&!EOC; i++)
    {}
    for(i=0;i<=3;i++)
    {
        l2 = readData[i];
        l2 = l2<<8*i;
        l = l + l2;
    }
    EOC = FALSE;
    return l;
}

```

```

void write_float_16x16(unsigned char c, float f)
{
    int    signo = 1;
    int    i = 0;
    long   l = 0;
    double exp = 0;

    if(f < 0)
    {
        f = f * -1;
        signo = -1;
    }

    for(i=30;i>=0;i--)
    {
        exp = pow(2,i-16);
        if(exp <= f)
        {
            f = f - exp;
            l = l + (long)pow(2,i);
        }
    }
    l = l * signo;

    write_raw(c,(unsigned long)l);
}

```

```

float read_float_16x16(unsigned char c)
{
    long    l = 0;
    float   fdata = 0;
    int     i = 0;
}

```

```

int    sign = 1;
unsigned long mask1 = 0x40000000;

l = read_raw(c);
if(l<0)
{
    sign=-1;
    l=l*-1;
}

for(i=30;i>=0;i--)
{
    if(l&mask1)
        fdato += pow(2,i-16);
    mask1 = mask1>>1;
}

fdato = fdato * sign;

return fdato;
}

void write_double_16x16(unsigned char c, double f)
{
    int    signo = 1;
    int    i    = 0;
    long   l    = 0;
    double exp  = 0;

    if(f < 0)
    {
        f = f * -1;
        signo = -1;
    }

    for(i=30;i>=0;i--)
    {
        exp = pow(2,i-16);
        if(exp <= f)
        {
            f = f - exp;
            l = l + (long)pow(2,i);
        }
    }
    l = l * signo;

    write_raw(c,(unsigned long)l);
}

double read_double_16x16(unsigned char c)
{
    long   l    = 0;
    double fdato = 0;
    int    i    = 0;
    int    sign = 1;
    unsigned long mask1 = 0x40000000;

    l = read_raw(c);
    if(l<0)
    {

```



```

        sign=-1;
        l=l*-1;
    }

    for(i=30;i>=0;i--)
    {
        if(l&mask1)
            fdata += pow(2,i-16);
        mask1 = mask1>>1;
    }

    fdata = fdata * sign;

    return fdata;
}

```

```

float read_float_3x29(unsigned char c)
{
    long    l = 0;
    float   fdata = 0;
    int     i = 0;
    int     sign = 1;
    unsigned long mask1 = 0x40000000;

    l = read_raw(c);
    if(l<0)
    {
        sign=-1;
        l=l*-1;
    }

    for(i=30;i>=0;i--)
    {
        if(l&mask1)
            fdata += pow(2,i-29);
        mask1 = mask1>>1;
    }

    fdata = fdata * sign;

    return fdata;
}

```

```

double read_double_3x29(unsigned char c)
{
    long    l = 0;
    double  fdata = 0;
    int     i = 0;
    int     sign = 1;
    unsigned long mask1 = 0x40000000;

    l = read_raw(c);
    if(l<0)
    {
        sign=-1;
        l=l*-1;
    }

    for(i=30;i>=0;i--)
    {

```

```

        if(l&mask1)
            fdato += pow(2,i-29);
        mask1 = mask1>>1;
    }

    fdato = fdato * sign;

    return fdato;
}

void set_p_PID(unsigned char dir, float kp, float ki, float kd)
{
    float A_0;
    float A_1;
    float A_2;

    A_0 = kp + (ki*SAMPLE) + (kd/SAMPLE);
    A_1 = (kp + (2*kd/SAMPLE)) * -1;
    A_2 = kd/SAMPLE;

    write_float_16x16(dir+1, A_0);
    write_float_16x16(dir+2, A_1);
    write_float_16x16(dir+3, A_2);
}

void get_p_PID(unsigned char dir)
{
    float A_0;
    float A_1;
    float A_2;

    A_0 = read_float_16x16(dir+1);
    A_1 = read_float_16x16(dir+2);
    A_2 = read_float_16x16(dir+3);

    K_p = (A_1+(2*A_2))*-1;
    K_i = (A_0-K_p-A_2)/SAMPLE;
    K_d = A_2*SAMPLE;
}

void set_SP(unsigned char dir, float sp)
{
    write_float_16x16(dir, sp);
}

float get_SP(unsigned char dir)
{
    return read_float_16x16(dir);
}

void set_Y(unsigned char dir, float y)
{
    write_float_16x16(dir+4, y);
}

float get_Y(unsigned char dir)
{
    return read_float_16x16(dir+4);
}

float get_R(unsigned char dir)
{

```

```

        return read_float_16x16(dir+5);
    }

void set_p_PID_double(unsigned char dir, double kp, double ki, double kd)
{
    double A_0;
    double A_1;
    double A_2;

    A_0 = kp + (ki*SAMPLE) + (kd/SAMPLE);
    A_1 = (kp + (2*kd/SAMPLE)) * -1;
    A_2 = kd/SAMPLE;

    write_double_16x16(dir+1, A_0);
    write_double_16x16(dir+2, A_1);
    write_double_16x16(dir+3, A_2);
}

void get_p_PID_double(unsigned char dir)
{
    double A_0;
    double A_1;
    double A_2;

    A_0 = read_double_16x16(dir+1);
    A_1 = read_double_16x16(dir+2);
    A_2 = read_double_16x16(dir+3);

    K_p_double = (A_1+(2*A_2))*-1;
    K_i_double = (A_0-K_p_double-A_2)/SAMPLE;
    K_d_double = A_2*SAMPLE;
}

void set_SP_double(unsigned char dir, double sp)
{
    write_double_16x16(dir, sp);
}

double get_SP_double(unsigned char dir)
{
    return read_double_16x16(dir);
}

void set_Y_double(unsigned char dir, double y)
{
    write_double_16x16(dir+4, y);
}

double get_Y_double(unsigned char dir)
{
    return read_double_16x16(dir+4);
}

double get_R_double(unsigned char dir)
{
    return read_double_16x16(dir+5);
}

void read_enteros(unsigned char dir)
{
    unsigned long l;

```

```

        l = read_raw(dir);

        enteros[0] = l;

        l = l >> 16;

        enteros[1] = l;
    }

void write_enteros(unsigned char dir, unsigned int D1, unsigned int D0)
{
    unsigned long l;
    unsigned long temp = 0;

    temp = (unsigned long)D1 << 16;
    l = temp + (unsigned long)D0;
    write_raw(dir,l);
}

void reg_datos(void)
{
    FILE *fp;
    static int inicial = 0;
// time_t Adq_time_1, Adq_time_2;

// double CHAN_1 = 0;
// double CHAN_2 = 0;
// double PRESION_P = 0;
// double VOLUMEN_P = 0;
// double MOL = 0;
// double ZERO = 0;
// double RESTA = 0;
// double ESTADO = 0;
// double TEMP = 0;
// double COMANDO = 0;

    if(inicial == 0)
    {
        Adq_time_1 = time(NULL);
        inicial = 1;
    }

    Adq_time_2 = time(NULL);

    if((Adq_time_2-Adq_time_1) >= 1)
    {
        fp = fopen("sensor.txt", "a+");

        fprintf(fp, "%ld,%.15f,%.15f,%.15f,%.15f,%.15f,%3.1f,%.15f,%.15f\n", Adq_time_2, PRESION_P*2.041378914, VOLUMEN_
P*1.6044105, MOL, ZERO*1.6044105, RESTA*1.6044105, ESTADO, TEMP*50, COMANDO);
        fclose(fp);
        Adq_time_1 = Adq_time_2;
    }
}

void set_channel_range(void)
{
    static int inicial = 0;

    if(inicial == 0)
    {

```

```

        set_channel_1 = time(NULL);
        inicial = 1;
    }

    set_channel_2 = time(NULL);

    if((set_channel_2-set_channel_1) >= 1)
    {
        //configuracion de intervalo de medicion de 0 a 10 V para
        //todos los canales de sistema de adquisicion de datos
        write_raw(0x0, 0xFFFF);
        set_channel_1 = set_channel_2;
    }
}

```

```

void interrupt eocTrue(...) /* Interrupt Service Routine (ISR) for PORT1 */
{
    disable();

    readData[events]=inportb(PORT1);
    events=events+1;
    if(events>3)
    {
        EOC=TRUE;
        events=0;
    }
    outportb(0x20,0x20);
    enable();
    return;
}

```

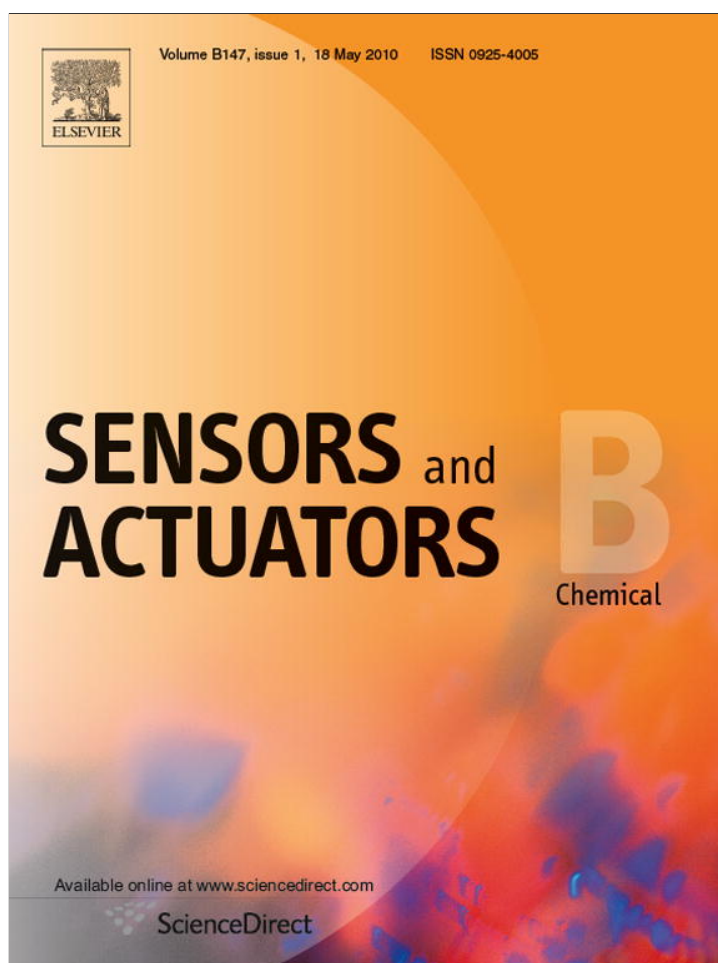
Apéndice C

PUBLICACIONES

Cadena-Pereda, R. O., Rivera-Muñoz, E. M., Herrera-Ruiz, G., and Herrera-Ruiz, G. 2010. Automatic volumetric gas flow meter for monitoring biogas production from laboratory-scale anaerobic digester. *Sensors and Actuators B: Chemical*, Volumen 147, Numero 1, 10-14.

Cadena-Pereda, R. O., Rivera-Muñoz, E. M., Herrera-Ruiz, G., Gomez-Melendez, D. J., Anaya-Rivera E. K. 2012. Automatic carbon dioxide-methane gas sensor base on the solubility of gases in water. *Sensors*, 12, 1-x.

Provided for non-commercial research and education use.
Not for reproduction, distribution or commercial use.



This article appeared in a journal published by Elsevier. The attached copy is furnished to the author for internal non-commercial research and education use, including for instruction at the authors institution and sharing with colleagues.

Other uses, including reproduction and distribution, or selling or licensing copies, or posting to personal, institutional or third party websites are prohibited.

In most cases authors are permitted to post their version of the article (e.g. in Word or Tex form) to their personal website or institutional repository. Authors requiring further information regarding Elsevier's archiving and manuscript policies are encouraged to visit:

<http://www.elsevier.com/copyright>



Contents lists available at ScienceDirect

Sensors and Actuators B: Chemical

journal homepage: www.elsevier.com/locate/snb

Automatic volumetric gas flow meter for monitoring biogas production from laboratory-scale anaerobic digester

R.O. Cadena Pereda^{a,*}, E.M. Rivera Muñoz^b, G. Herrera Ruiz^c^a Laboratorio de Biotrónica, Departamento de Investigación y Posgrado, Universidad Autónoma de Querétaro, Centro Universitario Cerro de las Campanas S/N, 76010, Querétaro, Qro, Mexico^b Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada U.N.A.M., Blvd. Juriquilla No. 3001, Col. Jurica La Mesa, 76230, Querétaro, Qro., Mexico^c Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Centro Universitario Cerro de las Campanas S/N, 76010, Querétaro, Qro, Mexico

ARTICLE INFO

Article history:

Received 4 October 2008

Received in revised form 17 February 2010

Accepted 15 March 2010

Available online 25 March 2010

Keywords:

FPGA

Reconfigurable logic

Gas flow meter

Biogas

Volumetric cell

ABSTRACT

Biogas rate production is a relevant variable in anaerobic digestion processing, where, an indicator of volatile solids conversion rate or an earlier indicator of digester failure is needed. Reconfigurable devices like Field Programmable Gate Arrays (FPGAs) have advantages over microprocessors and DSPs with similar logic complexity because their open architecture makes them suitable for system on-a-chip applications. The contribution of this work is the development of an improved water displacement gas flow meter, intended to be used in laboratory-scale anaerobic digestion reactors. Results show automatic gas flow meter functionality, where its calibration stability promotes reliable biogas rate production readings. The synthesis of its digital processing and control system into a low-cost FPGA platform had permitted the successful application of the digital data acquisition and processing in a standalone water displacement gas flow meter.

© 2010 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

Laboratory-scale anaerobic reactors generally range from 1 to 50 dm³ [1], such processing volumes promotes small biogas production rates, as well as biogas production as low as 100 cm³ h⁻¹ during startup period [2]. It is well known that small quantities of biogas are difficult to measure because a vast quantity of commercial gas flow meters does not measure such small flow rates [3–8]. Due to this fact, a gas flow meter for laboratory-scale reactors has higher demands on physical and electronics design compared with a conventional scale anaerobic reactor; this requires low biogas losses, stable calibration through time, and higher sampling rates, which gives a reliable biogas measurement. Liquid displacement has proven to be a simple and reliable method to measure small gas flow rates [2,9–12]. A problem of solubility of carbon dioxide, and in lesser degree methane, exists as long as biogas is in contact with displaceable liquid. If displaceable liquid is in contact with atmosphere, and at the same time in contact with biogas, then displaceable liquid becomes an aqueous path to dissolved gases, promoting erroneous measurements. Other phenomenon that seriously degrades measurements over time occurs when displaceable liquid is in direct and continuous contact with atmosphere. It promotes displaceable liquid evaporation, and its eventual loss to

atmosphere, directly affecting its volume and therefore gas measurement.

Due to the sequential processing data flow on commercially available DSPs and microprocessors, the increase in sampling rate, mathematical processing, or versatility can impose severe restrictions on the processor performance; therefore, other alternatives for signal processing must be considered in order to achieve real time data acquisition and preprocessing. Data acquisition and data processing are generally harbored in a personal computer (PC) or microcontrollers. FPGA devices have been getting market in system on-a-chip (SOC) applications, because they can integrate processing units defined by the user and related peripheral logic in hardware, combining open architectures that do not depend on the manufacturer or specific platforms. An FPGA is an array of basic logic blocks where the user can define its interconnectivity, making them programmable in a fully open architecture. Therefore, an FPGA provides the advantages of a general purpose processor and a specialized circuit that can be reconfigured as many times as it is necessary until the required functionality is achieved. The speed and size of the FPGA are comparable with the application-specific integrated circuit (ASIC), but FPGA is more versatile and its design cycle is shorter because of its reconfigurability. FPGA applications go beyond the simple implementation of digital logic; they can be used for implementations of specific architectures for speeding up some algorithm. A specific architecture for an algorithm implemented into an FPGA could have 10–100 times higher performance than the implementation on a DSP or microprocessor. On

* Corresponding author. Tel.: +52 4422667362; fax: +52 442192100x6006.
E-mail address: rocadena@gmail.com (R.O. Cadena Pereda).

the other hand, DSPs and microprocessors have a fixed sequential architecture for computation, which can be easily overloaded when the processing time between samples is significantly reduced, as in high-speed control, while FPGA have a natural parallel architecture for high-speed computation. Along with the advantages previously cited, FPGA development is performed under hardware description languages (HDL), which make the design portable and platform independent, which is not the case for commercially available DSPs or microprocessors.

The main objective of this paper is to show the profitability and advantages in the design of a liquid displacement gas flow meter with improved characteristics, and using a FPGA compared with other devices, highlighting the versatility, utility and practicality that result in laboratory applications. The experimental results show an economic and simple option that satisfies the accuracy and online processing time requirements on the data acquisition, processing, and functionality of an automatic liquid displacement gas flow meter.

2. FPGA applied to a volumetric gas flow meter with improved characteristics for monitoring biogas production from laboratory-scale anaerobic digester

A literature survey was conducted on liquid displacement volumetric gas flow meters and the findings shows that very few mention the use of a microcontroller for the implementation, and all of them have a variety of characteristics that makes them unreliable at long-term. Liu et al. [2] developed a liquid displacement volumetric gas flow meter capable of measuring biogas volumes ranging from 1 to 950 cm³ h⁻¹. This device consists of a fixed volume, U shaped tube filled of paraffin oil in contact with biogas and atmosphere, and make use of optical detectors. A microcontroller is used for data acquisition, data processing, and personal computer communication. Authors report low mechanical vibration sensibility, 1 cm³ resolution, ± 3.3 accuracy, and $\pm 1.0\%$ repeatability. Mata et al. [9] designed a liquid displacement volumetric gas flow meter consisting of two communicating tubes, both filled with water. Water is in contact with atmosphere and in contact with biogas. Volumetric cell cannot be adjusted. Authors use an electronic counter to know the total volume produced. Glauser et al. [10] created a device that is capable of measure biogas flow from 1 to 100 cm³ min⁻¹. Biogas is in direct contact with displaceable liquid and with atmosphere. The device needs compressed air in order to operate, due to this fact, the measuring system is bulky. The system allows change in the volume measured by means of changing position of level detectors. System does not promote biogas pressure changes; thus, pressure inside the reactor remains constant. The device uses a microcontroller, in order to measure biogas production rate and total amount produced. Moletta and Albagnac [11] designed a device composed of two communicated flasks. When biogas goes into one flask, water is displaced to another flask. Displaceable liquid is in direct contact with biogas and atmosphere. The measurement volume is fixed. Level detection system relies on electrical contacts. The system shows the total volume generated per day, but not the dynamics of the biogas production. Macías et al. [12] reports a device composed of three measuring flasks, and two water deposits. Due to this design, the device is bulky. In this device, the displaceable liquid is in direct contact with atmosphere and biogas. Level detection is accomplished by electrical contacts. The measuring volume is fixed. The system needs a liquid restitution method, due to its inherent construction. After an exhaustive search over specialized literature, no references for FPGA implementation of controllers, data acquisition, and data processing in automatic volumetric gas flow meters have been found to date, as well as the use of poly-

meric barriers, in order to isolate displaceable liquid from biogas and atmosphere.

In this paper, the case of study is an automatic volumetric gas flow meter with improved characteristics. The novelty of this work is composed of two parts. In one side, the FPGA has the capacity to make data acquisition, data distribution, data processing, data communication, and control, adding functionality to an automatic volumetric gas flow meter. This solution is inexpensive compared with microcontrollers and microprocessors, because it can integrate the whole solution in a single chip without decreasing performance, due to its parallel nature. In the other side, improved characteristics in the structure of the liquid displacement gas flow meter, drastically reducing problems related to CO₂ dilution in displaceable liquid and losses to atmosphere of dissolved CO₂ and evaporated displaceable liquid. Making volumetric cell calibration to last longer and avoiding biogas losses per event, improving system stability and reliability. The hardware developed design is divided into several components: RS-232 Interface, Data Processing, Inter-event Timer, Activation State Timer, Sampling Time Base, Data Acquisition and Distribution, Control. In Fig. 1, a general block diagram of the complete digital subsystem for the automatic gas flow meter is shown.

3. Description of the gas meter

The meter is composed of a container, a volumetric cell, an adjustable level optical detector, a expansion barrier reservoir, a three-way solenoid valve, a mini-compressor, and electronics for control, data acquisition, data processing, data distribution, displaying, and computer communication. Fig. 2 shows a schematic of the gas flow measurement system. The container is made of 6.35 mm thick, 88.9 mm output diameter, 300 mm long acrylic tube. PVC threaded adapters are glued to both acrylic tube ends. Threaded sides of the adapters are closed with threaded caps. The container counts with three 6 mm outside diameter, flexible tube ports, one on the top side, and two on the bottom side. The container holds the volumetric cell and displaceable water. The volumetric cell is made of flexible PVC, with an effective volume of 250 cm³, and it is totally submerged in displaceable liquid inside the container. Volumetric cell is attached by the inside to one of the bottom side ports of the container. This connection permits biogas inflow from the anaerobic reactor, and biogas outflow to the mini-compressor, causing expansion and contraction of the volumetric cell, directly affecting displaceable liquid level inside the container. The volumetric cell is intended to serve as a barrier between biogas and displaceable liquid, in order to minimize CO₂ dilution problems and hence minimizing measuring degradation. Although, it is true, that CO₂ permeates through PVC barrier, it is not of significant extent to degrade measurement considerably, indeed, it prevents CO₂ to dilute too fast in displaceable liquid. Brandrup et al. [14] establishes that permeability of CO₂ across PVC is in the order of 1.21×10^{-9} cm³ cm cm⁻² s⁻¹ atm⁻¹. Using a CO₂ differential partial pressure of 4.0×10^{-1} atm, volumetric cell PVC film thickness of 3.3×10^{-2} cm, and a volumetric cell PVC film contact surface of 125.0 cm², the CO₂ permeation through the PVC film is in the order of 1.83×10^{-6} cm³ s⁻¹. The volumetric gas flow meter, with a calibrated volume of 100 cm³, is capable of a measurement range from 10 to 55,000 cm³ h⁻¹. In the minimum flow, the biogas is retained inside the volumetric cell a maximum of 10 h; therefore the maximum CO₂ permeated volume is up to 6.6×10^{-2} cm³. In this case, the lost is about 0.066% of volume in every reading, amount affordable without degrading performance sensibly.

Even though the container is rigid, it counts with a port that permits expansion and contraction of the volumetric cell. To avoid direct contact of the displaceable liquid with atmosphere, a barrier

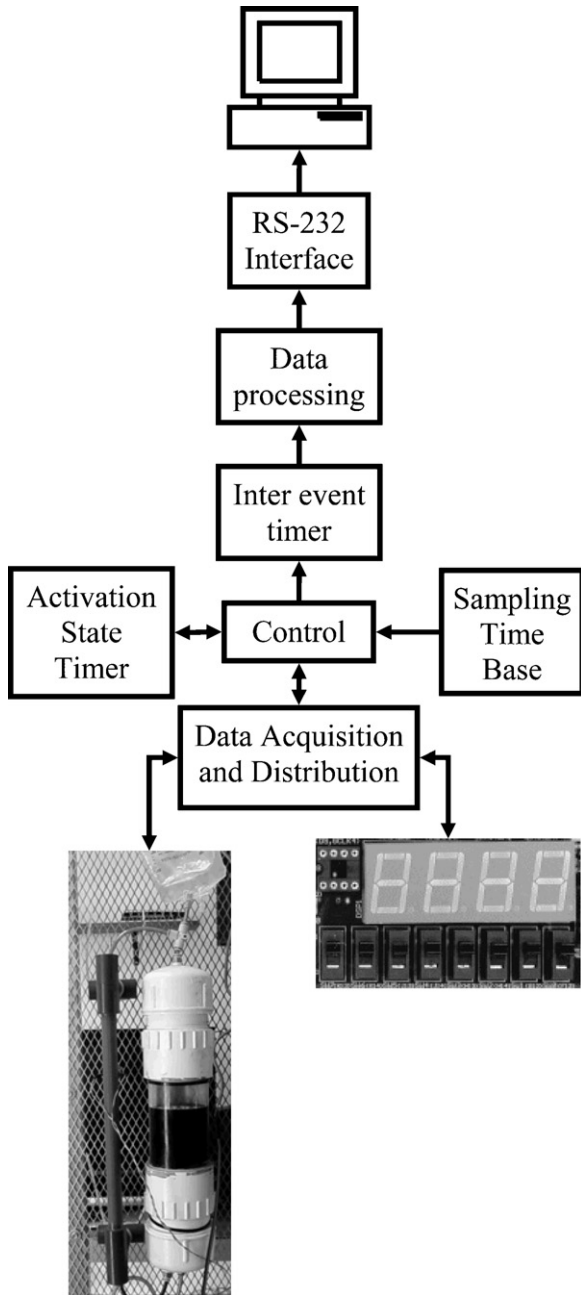


Fig. 1. Block diagram of the volumetric gas flow meter plus digital system.

flexible PVC reservoir is attached to this port. This barrier decrease escaping of displaceable liquid to atmosphere due to evaporation, making it to last longer inside the container and improving calibration stability. This barrier also decreases CO₂ transfer from displaceable liquid to atmosphere, presenting a second barrier to CO₂ losses, improving measurement stability. Attached at the same port used by the flexible reservoir, through a “T” connector, is a 6 mm output diameter translucent flexible tube. This tube is also attached to a port at the bottom of the container, reflecting the liquid level inside the container, providing a way in which an optical detector can sense the liquid level. To produce a light beam, a light emitting diode (LED) is used. A phototransistor goes to a saturated state when the produced light beam excites it. LED and phototransistor are faced, with a separation of 8 mm between them, forming the optical detector. The optical detector is placed on the translucent flexible tube. Displaceable liquid inside the container, and,

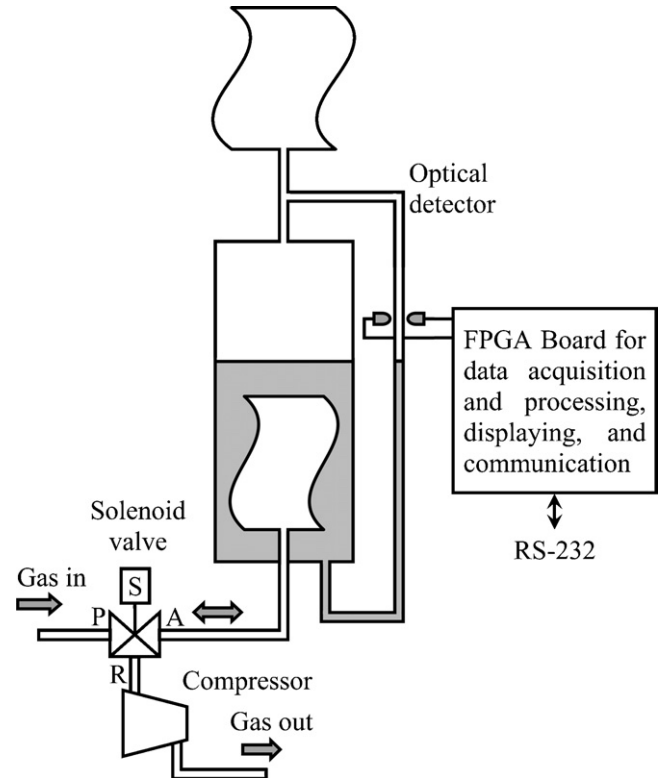


Fig. 2. Schematic of the volumetric gas flow meter, were A is a common port, R is the normally closed port, and P is the normally open port of the solenoid valve.

hence inside the translucent flexible tube, is black colored. Black colorant absorbs the light beam, preventing it to reach the phototransistor, allowing level detection. The uttermost volume capacity of the volumetric cell per event is 250 cm³. Volume per event can be adjusted, starting at 250 cm³ to downwards. The optical detector is also mounted over a screw. Driving the screw, the volume per event can be accurately adjusted.

Control of gas inflow and outflow of the volumetric cell, is carried out by a three-way, two-states solenoid valve. The volumetric cell, the valve, and the laboratory-scale anaerobic reactor are connected in such a way that, when solenoid valve is in its initial state, or not energized, it permits biogas to flow from reactor to volumetric cell; otherwise, when solenoid valve is in its second state, or energized, reactor flow is blocked and biogas flow from volumetric cell to compressor is allowed. When solenoid valve is energized the compressor is also energized, evacuating biogas from volumetric cell.

When measurement system is in initial state, and the level inside the container is high enough to be taken as a measurement event, the digital subsystem shifts the system into the second state. The actions carried out by the digital subsystem during the second state are: energize solenoid valve, energize compressor, and start a countdown timer. These actions prepare the volumetric cell for a new measurement cycle. Once, the countdown finishes, the system returns to an initial state and is ready for a new measurement cycle.

4. FPGA implementation

Digital subsystem that carries out data acquisition, data processing, data distribution, control, PC communication, and local functionality was implemented in a Spartan-3 FPGA [13]. This device has 200,000 gates, 216 kb random access memory (RAM), 12 18 × 18 bit multipliers and 173 inputs and outputs defined by the user. The reference clock runs at 50 MHz. Furthermore, the board

counts with a four-character seven-segment LED display that is controlled by the FPGA as a means to exhibit the processed data. One of eight slide switches allows the operator to select which of two sets of processed data is going to be displayed. Finally, a 9-pin RS-232 serial port devised to establish communication with a personal computer for data acquisition purposes is also utilized.

A hardware description language (VHDL) was used to describe the digital subsystem. The digital subsystem description was synthesized in the FPGA. Digital subsystem is composed of many elements, as can be seen in Fig. 1. The RS-232 interface module carries out communication with a personal computer (PC) for data acquisition purposes, using the computer serial port. The Data Processing module accumulates total gas volume generated by the digester in every measurement event. It also performs the mathematical operations required to obtain the volumetric gas flow presented in $\text{cm}^3 \text{h}^{-1}$, which consist of the cell calibrated volume divided by the time in seconds between two consecutive measurement events, the resulting data is then multiplied by 3600. Inter-event Timer module is intended to measure the time in seconds, between events, this data is required by the Data Processing module to carry on biogas production calculations. Activation State Timer module carries out the count of time in which solenoid valve, and mini-compressor are active, and at the end of the specified time, it informs the Control module. Sampling Time Base module dictates the rate at which the state of the optical detector is sampled, in this case, every 0.02 s. Data acquisition and distribution module acquires optical detector and slide switch state, passing this information to the Control module. It also passes the command information from the Control module to energize solenoid valve and compressor, and data to be displayed in the four digits, seven segments display. The data displayed is calculated in real time since data is processed and result displayed in every gas rate measurement event. The digital input provided by the user determines the data to be showed by the LED display as needed, data displayed could be the total gas volume accumulated or current gas flow rate. Control module, is a finite state machine (FSM) that gives commands to some modules to execute an action or respond to certain stimulus from other modules, in order to synchronize actions carried out to complete gas rate measurement cycles. Results A graduated burette with an effective volume of 25 cm^3 was used to

calibrate the volumetric cell to 100 cm^3 , and to obtain the statistical properties outlined below. Volumetric cell calibration was carried out using a procedure very similar as used by Glauser [10]. A flask filled with room air, was connected to the inlet of the volumetric gas flow meter. A known water volume was put inside the flask, in order to displace air from the flask to the volumetric cell. The known air volume expands the volumetric cell, which raises level of displaceable liquid inside the container, proportionally to the expansion of the volumetric cell. By driving the screw that modifies the position of the optical detector, the gas volume at which the optical detector will respond, can be precisely adjusted.

Volumetric cell calibration and adjustment to a certain capacity, is based on the expected biogas production. If is expected a small biogas production rate, is more suitable to adjust a small displaceable volume per event, and hence, to increase the device resolution. In other case, if it is expected a high production rate, it will be better to adjust a greater displaceable volume per event. A bigger displacement volume increases the measurement capacity per event, but decreases the device resolution [2]. When the volumetric cell is calibrated and adjusted to a capacity of 100 cm^3 , the gas flow meter is capable of measuring biogas flows from 10 to $55,000 \text{ cm}^3 \text{h}^{-1}$, and their resolution is about 10 cm^3 . Gas flow meter precision is 1.35% while accuracy is $\pm 0.637 \text{ cm}^3$. In order to decrease the time in which the volumetric cell is idle, or not measuring, a small compressor is set. As speed at which biogas is extracted from the volumetric cell is raised, the measurement capacity is improved without decreasing performance. An option to achieve this is by replacing compressor that extract biogas from the volumetric cell for a larger capacity compressor. The depicted volumetric gas flow meter was successfully utilized to monitor gas production rate from a 50 dm^3 laboratory-scale anaerobic batch reactor, for more than 1 month. The batch reactor was loaded with 20 dm^3 of nursery pig manure, and 20 dm^3 of water.

In order to validate the performance of the depicted volumetric gas flow sensor, a commercial gas flow meter of similar measuring capacity was obtained. The commercial gas flow meter is a D6F-P0010A MEMS flow sensor [15], from OMRON. This device is capable of measuring up to $60000 \text{ cm}^3 \text{h}^{-1}$ of dry air, with an accuracy of $\pm 5\%$ full scale. The output of the device is analog from 0.5 to 2.5 V, been 2.5 V equivalent to $60,000 \text{ cm}^3 \text{h}^{-1}$. In order to digitalize

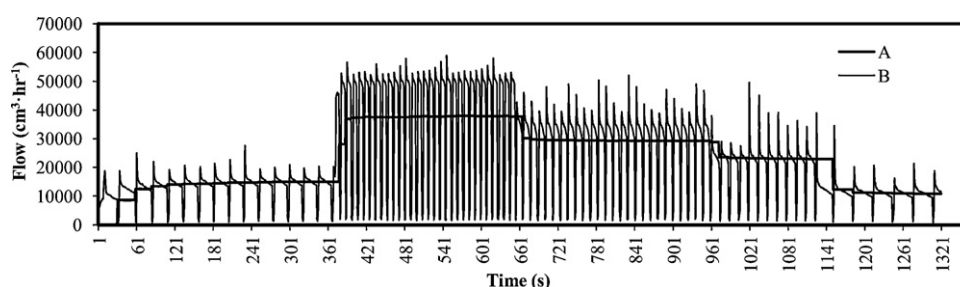


Fig. 3. Air flow measured for both devices registered every second during 22 min. Plot A represents the built gas flow meter; plot B represents the commercial gas flow meter.

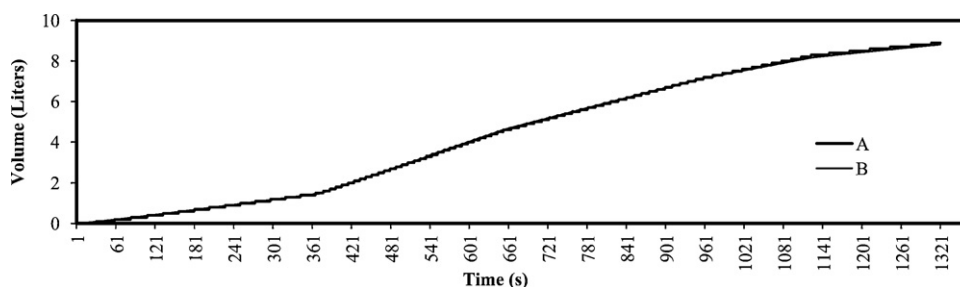


Fig. 4. Total flow measurement for both devices registered every second during 22 min. Plot A represents the built gas flow meter; plot B represents the commercial gas flow meter.

the analog signal and make it useful for the FPGA, it was used a 12 bits plus sign analog to digital converter AD7323 [16], from analog devices. In order to compare measurements of both devices, the same flow was moved through them. Both, the built volumetric gas flow meter and the commercial gas flow meter were connected to a personal computer in order to implement the data acquisition. Air flow rate was registered every second as can be seen in Fig. 3 for both devices. The flow was varied in steps of different amplitude, and these maintained for different periods of time. The oscillations present in the commercial flow data plot, are sudden flow changes caused for the measurement cycles of the built volumetric gas flow meter. In order to clarify measurement comparison between both devices, it was also registered the total volume measured for both devices during the test, as can be seen in Fig. 4. This plot shows a close relation in both measurements, showing that the volumetric gas flow meter described in this document, is a reliable, economic, and a simple option that satisfies the accuracy to measure biogas production in a laboratory-scale anaerobic digester.

6. Conclusions

The volumetric gas flow meter depicted in this paper has many characteristics that represents improvement over other devices described in literature, such as: reliable measurement due to measured biogas is isolated inside the volumetric cell, avoiding direct contact with displacement liquid, hence CO₂ dissolution is minimized; stable calibration over longer periods of time, owing to displacement liquid is not in direct contact with atmosphere, therefore decrementing evaporation losses; immunity to moderate vibration, because displacement liquid that activates optical detector is inside a 6 mm diameter flexible tube, it minimizes liquid waving and miscounting; easiness in getting materials, assembly, calibration, adjustment, and operation. This device is a useful tool to process engineers, scientist an all those interested in following the biogas production dynamics in a laboratory-scale anaerobic digestion process.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge Dr. Rene Romero Troncoso and Dr. Ibrahim Serroukh for technical support.

References

- [1] W.L. Hochfeld, Growth & Synthesis: Fermenters, Bioreactors & Biomolecular Synthesizers, 1st ed., Interpharm Press, Buffalo Grove, 1994, p. 79.
- [2] J. Liu, G. Olsson, B. Mattiasson, A volumetric meter for monitoring of low gas flow rate from laboratory-scale biogas reactors, *Sensors and Actuators B: Chemical* 97 (2004) 369–372.
- [3] <http://www.smcusa.com>.
- [4] <http://www.abb.us/instrumentation>.
- [5] <http://www.aerzenusa.com>.
- [6] <http://www.clarksol.com>.
- [7] <http://www.dwyer-inst.com>.
- [8] <http://www.koboldusa.com>.
- [9] J. Mata, A. Martinez, A. Torres, A simple device to measure biogas production en laboratory scale digesters, *Biotechnology Letters* 8 (1986) 719–720.
- [10] M. Glauser, B. Jenni, M. Aragno, An inexpensive, automatic gas meter for laboratory-scale methane digesters and other gas-evolving systems, *Journal of Microbiological Methods* 2 (1984) 159–164.
- [11] R. Moletta, G. Albagnac, A gas meter for low rates of gas flow: application to the methane fermentation, *Biotechnology Letters* 4 (1982) 319–322.
- [12] M. Macías, M. Pérez, I. Caro, D. Cantero, Automatic gas meter for laboratory fermenters, *Biotechnology Techniques* 9 (1995) 655–658.
- [13] Xilinx, Spartan-3 Family FPGAs Data Sheet (2005). <http://www.xilinx.com>.
- [14] J. Brandrup, E.H. Immergut, E.A. Grulke, *Polymer Handbook*, 4th ed., John Wiley & Sons, Inc., United States, 1999, p. VI/550.
- [15] Omron, a D6F-P0010A MEMS flow sensor Data Sheet, 2009, <http://www.omron.com>.
- [16] Analog Devices, AD7323 ADCs Data Sheet, 2006, <http://www.analog.com>.

Biographies

R.O. Cadena Pereda received his M.Sc. degree in Instrumentation and Automatic Control from DEPEFI-Universidad Autónoma de Querétaro, México in 2008. He is currently a Ph.D. student at the DEPEFI-Universidad Autónoma de Querétaro. Since 2004, his research study has been mainly focused in printed circuit board design, data acquisition and distribution, hardware signal processing, embedded control, renewable energy, and bioprocess, and in second place in artificial intelligence, and robotics.

E. M. Rivera Muñoz received his B.Sc. in Physics (1987), and his M.Sc. (1992) and Ph.D. (1997) in Materials Science from the National Autonomous University of Mexico. He made a postdoctoral stay at the Chemistry Department of the University of Texas at El Paso (USA) for two years. He is working as a scientist at the Center of Applied Physics and Advanced Technology of the National Autonomous University of Mexico. His present research interest includes Solid State Physics, Materials Science, Synthesis and characterization of materials, nanotechnology, etc. He is also working in diverse research and development fields such as fabrication, characterization and implementation of flow meter devices and data processing.

G. Herrera Ruiz received his BS and M.Sc. in electronic system engineering from Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM) México. He received Ph.D. from Hungary Academy of Sciences and Pos Ph.D. from Institute of Engineering Mechanics, University of Tsukuba, Japan. He obtained Machine Tool Technology Award by Japan Society of Mechanic Engineering, ADIAT by Asociación Mexicana de Directivos de la Investigación y el Desarrollo Tecnológico, Award and Research Nacional Award by Academia Mexicana de Ciencias.

Article

Automatic Carbon Dioxide-Methane Gas Sensor Based on the Solubility of Gases in Water

Raúl O. Cadena-Pereda ^{1,2,*}, Eric M. Rivera-Muñoz ³, Gilberto Herrera-Ruiz ⁴, Domingo J. Gomez-Melendez ² and Ely K. Anaya-Rivera ²

¹ Laboratorio de Biotrónica, Departamento de Investigación y Posgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Centro Universitario Cerro de las Campanas S/N, Querétaro 76010, México

² Universidad Politécnica de Querétaro, Carretera Estatal 420 S/N, El Rosario, C.P. 76240, El Marqués, Querétaro 76010, México; E-Mails: domingo.gomez@upq.mx (D.J.G.-M.); karina.anaya@upq.mx (E.K.A.-R.)

³ Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada Universidad Nacional Autónoma de México, A. P. 1-1010, Querétaro 76000, México; E-Mail: emrivera@fata.unam.mx ([E.M.R.-M.](mailto:emrivera@fata.unam.mx))

⁴ Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Centro Universitario Cerro de las Campanas S/N, Querétaro 76010, México; E-Mail: gherrera@uaq.mx ([G.H.-R.](mailto:gherrera@uaq.mx))

* Author to whom correspondence should be addressed; E-Mail: omar.cadena@upq.edu.mx ([R.O.C.-P.](mailto:omar.cadena@upq.edu.mx)); Tel.: +52-442-266-7362; Fax: +52-111-111-112.

Received: 1 May 2012; in revised form: 31 May 2012 / Accepted: 5 June 2012 /

Published:

Abstract: Biogas methane content is a relevant variable in anaerobic digestion processing where knowledge of process kinetics or an early indicator of digester failure is needed. The contribution of this work is the development of a novel, simple and low cost automatic carbon dioxide-methane gas sensor based on the solubility of gases in water as the precursor of a sensor for biogas quality monitoring. The device described in this work was used for determining the composition of binary mixtures, such as carbon dioxide-methane, in the range of 0–100%. The design and implementation of a digital signal processor and control system into a low-cost Field Programmable Gate Array (FPGA) platform has permitted the successful application of data acquisition, data distribution and digital data processing, making the construction of a standalone carbon dioxide-methane gas sensor possible.

Keywords: reconfigurable logic; gas solubility; binary gas sensor; mathematical model

1. Introduction

Low-cost chemical analysis sensors can have a great impact in fields such as environmental preservation and energy efficiency. There is a growing market for this kind of sensor, especially for low-cost and reliable sensors focused on carbon dioxide (CO₂)-methane (CH₄) mixtures in biogas quality monitoring applications [1]. Currently, the most studied method to transform waste into energy is anaerobic digestion, which can convert a variety of wastes, such as agricultural waste from animals and plants and municipal waste, into a full energy product such as biogas [2]. The preferred technology for the analysis of single components in raw biogas, specifically to determine the CH₄ and CO₂ content, is optical sensors, which detect infrared absorption in the characteristic wavelengths for these molecules [3]. In the literature, biogas composition has been measured with gas infrared analyzers, such as those used by Sedlačík and Dvořáčková [2], who utilized a GASCARD II infrared gas sensor from Edinburgh Instruments [4]; Nordberg *et al.* [5], who used a Model 6500 visible/near-infrared scanning monochromator from FOSS NIRSystems [6] and Steyer *et al.* [7], who used a Siemens Ultramat 22P, which works on the principle of the nondispersive absorption of infrared light [8]. Additionally, semiconductor diode lasers for use in the mid-infrared spectral region based upon lead-salt operating near 7.8 μm have also been used for methane measurements [9]. However, there are two main drawbacks to the sensors outlined above: high cost and difficulty of installation at all biogas production sites [1]. For comparison, the cost of a commercial FTIR spectrophotometer is near \$20,000 USD [10], while the estimated cost of the gas sensor described here is approximately \$5,000 USD. The described sensor is also easy to build and operate.

Methods for the acquisition of biogas methane content based in a variety of measurement principles have been reported in the literature. For example, Mandal *et al.* [11] determined biogas quality using flame temperature as the measurement principle. In this case, the steady-state flame temperature was measured using a system consisting of a thermocouple probe and an analog temperature indicator. In addition, Rego and Mendes [1] and Rego *et al.* [12] described a permselective gas sensor for determining the composition of carbon dioxide-methane mixtures in the 0–100% range. The sensor consisted of a permselective membrane, a pressure transducer for measuring the permeate pressure and a needle valve for controlling the permeate outlet to the atmosphere. Furthermore, Rozzi *et al.* [13] used a thermostatically controlled cell containing 0.1 moles·L⁻¹ sodium bicarbonate in which the pH was monitored by an Orion combination glass electrode and an Orion Model 601A specific ion meter. When the pH reading had stabilized, gas samples were taken using a syringe and analyzed for CO₂ and CH₄ content using gas-solid chromatography on molecular sieves with nitrogen as the carrier gas and a katharometer for the detector.

Carlson and Martisson [14] presented a technique to quantify variations in ultrasound pulse shape caused by interactions between the constituents of a two-component gas mixture as an alternative method to extract information concerning the molar fraction of a gas in a binary mixture. Additionally, Tardy *et al.* [15] developed a dynamic thermal conductivity sensor for gas detection based on the

transient thermal response of a SiC micro-plate slightly heated by a screen-printed Pt resistance. This device was intended for specific application in the determination of the specific gases in a mixture.

Gonzalez *et al.* [16] used a device that passed the produced biogas through an Erlenmeyer flask filled with a 20% NaOH solution followed by a tube filled with soda lime pellets. The gas then passed through a Mariotte flask system containing water for the quantification of methane production. The displaced water was collected in a plastic container on a pressure sensor (QB 745, DS-Europe) for continuous monitoring of CH₄ production.

A Field Programmable Gate Array (FPGA) is an array of basic logic blocks where the user can define its interconnectivity, making it programmable in a fully open architecture. Therefore, an FPGA provides the advantages of a general-purpose processor and a specialized circuit that can be reconfigured as many times as necessary until the required functionality is achieved. The speed and size of the FPGA are comparable with the Application Specific Integrated Circuit (ASIC), but the FPGA is more versatile and its design cycle is shorter because of its reconfigurability. FPGA applications go beyond the simple implementation of digital logic; they can be used for the implementation of specific architectures for speeding up some algorithms. A specific structure for an algorithm implemented into an FPGA could have 10–100 times higher performance than its implementation on a Digital Signal Processor (DSP) or microprocessor.

Due to the sequential processing data flow on commercially available DSPs and microprocessors, the increase in sampling rate, mathematical processing, or versatility can impose severe restrictions on processor performance. Therefore, other alternatives for signal processing must be considered to achieve real-time data acquisition and data pre-processing. Moreover, FPGA devices have been gaining market share in system on chip (SOC) applications because they can integrate processing units defined by the user and related peripheral logic in the hardware, combining open architectures that do not depend on the manufacturer or specific platforms. However, DSPs and microprocessors have a fixed sequential construction for computation, which can easily be overloaded when the processing time between samples is significantly reduced, as in high-speed control, while FPGAs have a natural parallel architecture for high-speed computation. Along with the advantages previously cited, FPGA development is performed under Hardware Description Language (HDL), making the design portable and platform independent, which is not the case for commercially available DSPs or microprocessors.

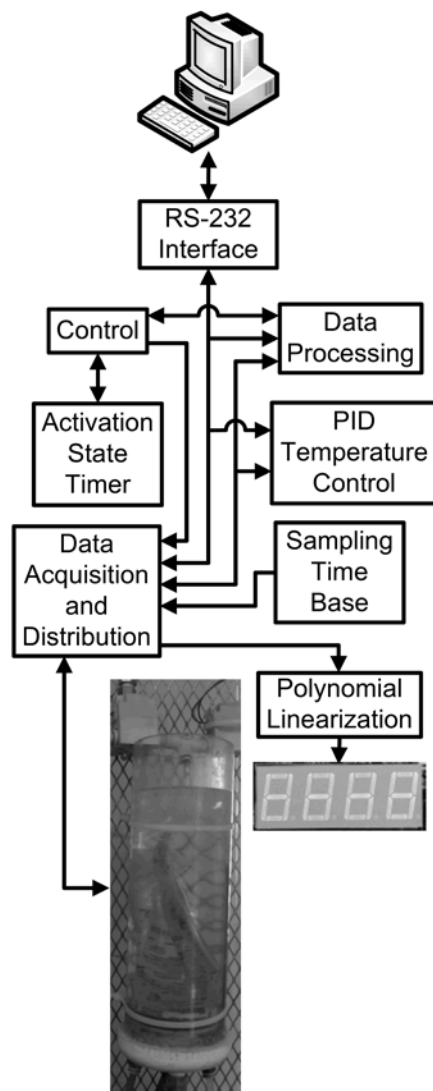
In this paper, the development of a low-cost automatic carbon dioxide-methane gas sensor based on the principle of the solubility of gaseous species in water is reported. The novelty of this work is two-fold. First, a physical principle, never used before, is applied for binary mixture quantification, drastically reducing the cost and complexity of the equipment and facilitating on-line monitoring. Second, the hardware implemented in the FPGA has the capacity for data acquisition, data distribution, data processing, data communication and control, adding functionality and autonomy to the automatic carbon dioxide-methane gas sensor and allowing it to be deployed in the field.

2. Experimental Section

The design of the hardware developed is divided into several components: an RS-232 Interface, an Activation State Timer, the Control, proportional integral derivative (PID) Temperature Control, Data Processing, Sampling Time Base, Data Acquisition and Distribution and Polynomial Linearization.

A general block diagram of the complete digital system for the automatic carbon dioxide-methane gas sensor is shown in Figure 1.

Figure 1. Block diagram of the carbon dioxide-methane gas sensor with the digital system.



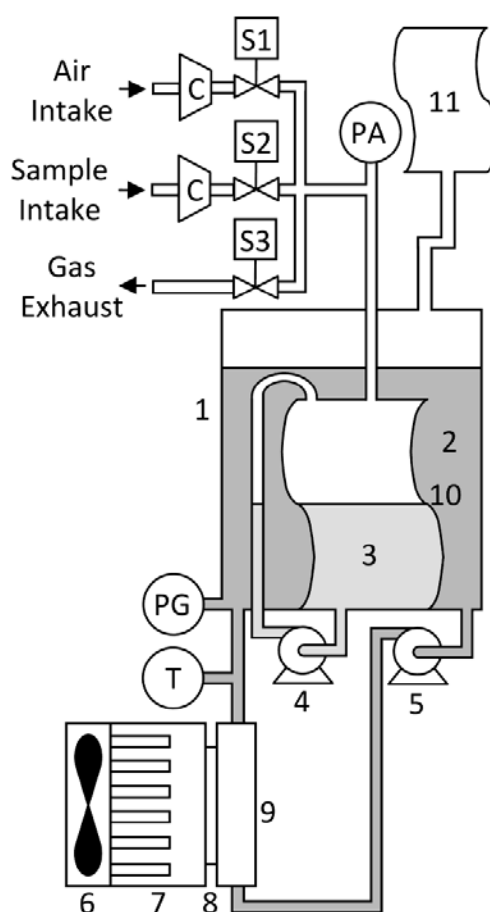
2.1. Description of the Gas Sensor

To quantitatively determine the binary gas mixture, the carbon dioxide-methane gas sensor has to perform a three-stage cycle: sampling, adsorption and regeneration. In the sampling stage, the device takes in a predefined volume of gas in the measuring cell and calculates the number of moles of the binary gas mixture inside the measurement cell. In the next stage (absorption), the gas sensor removes the CO_2 from the gaseous sample by movement-enhanced contact with a fixed quantity of absorption liquid. At the end of the absorption stage, the digital system calculates the remaining number of moles and displays the methane content percentage in the sample. In the third and last stage (regeneration), the gas sensor regenerates the CO_2 saturated absorption liquid by movement-enhanced contact with air, releasing absorbed CO_2 to the atmosphere. Figure 2 depicts the carbon dioxide-methane gas sensor, the constituent parts of which are a container (1), heat transfer fluid; (2), absorption liquid; (3), an absorption liquid recirculation pump; (4), a heat transfer fluid recirculation pump; (5), a fan; (6), a heat

sink;

(7), a thermoelectric module; (8), a heat exchanger; (9), a flexible measurement cell; (10), a flexible PVC reservoir; (11), an air intake 2-way solenoid valve (S1), a gaseous binary mixture sample intake 2-way solenoid valve (S2), a gas exhaust 2-way solenoid valve (S3), two mini compressors (C), an absolute pressure sensor (PA), a gauge pressure sensor (PG) used as level sensor, a temperature sensor (T) and electronics for control, data acquisition, data processing, data distribution, displaying and computer communication.

Figure 2. Schematic of the carbon dioxide-methane gas sensor. 1—container; 2—heat transfer fluid; 3—absorption liquid; 4 and 5—recirculation pump; 6—fan; 7—heat sink; 8—thermoelectric cell; 9—heat exchanger; 10—measurement cell; 11—flexible PVC reservoir; S1, S2 and S3—2-way solenoid valve; C—mini-compressor; PA—absolute pressure sensor; PG—gauge pressure sensor; T—temperature sensor.



The container is composed of an acrylic tube (6.35 mm thick, 88.9 mm output diameter and 300 mm long) with two PVC caps attached to both ends. The aim of the container is to hold the measurement cell and the heat transfer fluid and to prevent heat transfer fluid evaporation loss to the atmosphere. The aim of the heat transfer fluid, together with the refrigeration system, is to keep the temperature of the measurement system stable. The level of the heat transfer fluid inside the container is affected by the volume inside the measurement cell, which together with a gauge pressure sensor,

allows the digital system to monitor volume changes inside the measurement cell. Water was chosen as the heat transfer fluid because it has a high specific heat, is non-polluting and is abundant.

Inside the measurement cell, the absorption liquid is found. The objective of the absorption liquid is to remove the CO₂ from the sample of the gaseous binary mixture. Water was chosen because, at 288.15 K, the CO₂ ($X_1 = 8.21 \times 10^{-4}$ mole fraction) is 26.29 times more soluble than CH₄ ($X_1 = 3.122 \times 10^{-5}$ mole fraction) [17]. Such a difference helps to efficiently separate both gaseous species, which is the physical principle proposed in this paper.

For the recirculation of the absorption liquid, a wiper washer mini-pump from ACDelco [18] was chosen because it has a small size that is suitable for this application, wide availability and low cost. This mini-pump re-circulates the absorption liquid inside the measurement cell to enhance the contact between the phases. The heat transfer fluid recirculation pump, which is also an automotive centrifugal mini-pump, re-circulates the heat transfer fluid inside the container and through the heat exchanger, promoting heat transfer from the measurement system to the atmosphere. The thermoelectric module (C1-54-2808 from Tellurex) is a semiconductor-based device that functions as a heat pump, moving heat from one of its sides to the other [19]. Among its characteristics, it can create a maximum temperature difference of 79 °C between its hot and cold sides and a maximum thermal load of 139.7 watts, achieving temperatures well below the ambient temperature. This device removes energy from the heat exchanger, pumping it to the atmosphere.

The heat exchanger is a copper plate with polished surfaces to which the thermoelectric cell can be attached, promoting heat transfer. The copper plate has holes drilled into it to allow the heat transfer fluid to re-circulate through, keeping the liquid confined but allowing heat transfer. The measurement cell is made of flexible PVC with an effective volume of 250 cm³, holding a fixed volume of absorption liquid necessary to absorb CO₂ from the sample. During the sampling stage, the measurement cell also holds the volume of the gaseous binary mixture sample ready to be analyzed (100 cm³). The volumetric cell is also intended to serve as a barrier between the absorption liquid and the heat transfer fluid to prevent measurement error due to CO₂ dilution into the heat transfer fluid. Although a small amount of CO₂ permeates through the flexible PVC barrier, it is not a significant source of error. The volumetric cell film has a contact surface of 125.0 cm² and a thickness of 3.3×10^{-2} cm. Therefore, using a CO₂ differential partial pressure of 4.0×10^{-1} atm (4.13×10^{-1} Kg·cm⁻²), the CO₂ permeation through this PVC film is on the order of 1.83×10^{-6} cm³·s⁻¹ [20]. The flexible PVC barrier actually prevents a too rapid CO₂ dilution into the heat transfer fluid.

This carbon dioxide-methane gas sensor, with a calibrated volume of 100 cm³, is capable of measuring methane concentrations from 0 to 100%. Considering a worst-case scenario where the methane concentration is at a minimum, the gaseous sample is retained inside the volumetric cell for 20 min at most, so the maximum CO₂ permeated volume reaches 2.2×10^{-3} cm³. Thus, the maximum loss is 0.0022% of the volume in every reading, an amount that can be afforded without a significant decrease in performance. The flexible PVC reservoir that permits the expansion and contraction of the measurement cell serves as a barrier to avoid direct contact of heat transfer fluid with the atmosphere, preventing evaporation and CO₂ loss and improving measurement stability and reliability. The air intake valve (2-way solenoid) is the actuator that allows air to enter into the measuring cell each time the system is in the regeneration step. The gaseous sample intake valve (2-way solenoid) is the actuator that permits sample access to the measurement cell every time the

sensor is in the sampling stage. Finally, the gas exhaust valve (2-way-solenoid) is the actuator that permits gases to exit the measurement cell every time the sensor is in the regeneration stage.

Two KPV-20A mini-compressors from Clark solutions [21] were used to move the gaseous binary mixture to be analyzed or the air for absorption liquid regeneration into the measurement cell. A US381-000005-030PA sensor from Measurement Specialties [22] was used to measure the absolute pressure inside the measurement cell. The pressure readings obtained allow the system to calculate the number of moles that enter the system. This sensor has a measurement range of 0 to 30 psi (0 to $2.109 \text{ Kg}\cdot\text{cm}^{-2}$) of absolute pressure, with an output current range of 4 to 20 mA. A gauge pressure sensor (26PC01SMT, Honeywell) [23] was used as a level sensor of the heat transfer fluid inside the container. The gauge pressure readings properly transformed in level data represent the volume of the gas inside the measurement cell. This pressure sensor is temperature compensated, with a voltage output of $16.7 \text{ mV}\cdot\text{psi}^{-1}$ and a range of 0 to 1 psi (0 to $4.88 \times 10^{-4} \text{ Kg}\cdot\text{cm}^{-2}$).

The sensor used for monitoring and controlling the heat transfer fluid temperature is a LM35 temperature sensor from National Semiconductor [24]. This sensor has a measurement range from -55 to $150 \text{ }^\circ\text{C}$ (218.16 to 423.16 K) and a linear voltage output of $10 \text{ mV}\cdot\text{K}^{-1}$. The temperature of the device is maintained at 288.15 K ; control is needed because CO_2 absorption is strongly temperature dependent. It has been reported that the absorption coefficient at 288.15 K is 8.21×10^{-4} and at 293.15 K it is 7.07×10^{-4} , translating to a change of 13.8% with a $5 \text{ }^\circ\text{C}$ temperature change [17].

In the initial state, the air intake valve and sample intake valve are closed, with both mini-compressors off, as is the absorption liquid recirculation mini-pump. The exhaust valve is open and the measurement system is ready to begin a measurement cycle. When a measurement cycle begins, the reading from the heat transfer liquid level sensor is recorded. This value is a reference from which any level change is caused by the gaseous sample and not by absorption liquid inside the measurement cell. Once the level reading is stored, the digital system closes the exhaust valve, opens the sample intake valve (S2) and the corresponding mini-compressor is turned on to pull a sample of a gaseous binary mixture with a volume of 100 cm^3 . Next, the sample intake valve (S2) closes, the mini-compressor that injects the sample is turned off, the number of moles admitted with the sample is calculated and the data obtained is stored to later calculate the CH_4 percentage in the sample. Once the number of moles in the sample is calculated, the system turns on the absorption liquid mini-pump for 20 min. This action promotes interfacial contact between the gaseous sample and the absorption liquid, extracting CO_2 from the sample. Once the absorption step is finished, the quantity of moles of the remaining gaseous sample inside the measurement cell is computed and the resulting data are stored.

The algebraic difference between the quantity of moles in the sample and the quantity of moles remaining after CO_2 absorption is computed to obtain the percentage of methane content in the sampled binary mixture. The data obtained, due to the non-linear response of the system, are not easy to interpret. To overcome this situation, a polynomial linearization is also performed. The residual gas inside the measurement cell is released to the atmosphere through the activation of the gas exhaust solenoid valve (S3). To perform the regeneration cycle, the air intake valve (S1) is opened and the corresponding mini-compressor is turned on, injecting a volume of 100 cm^3 of air into the measurement cell. At this point, the recirculation mini-pump is kept active for five minutes, after which the gas inside the measurement cell is released to the atmosphere. This cycle is repeated four

times and is intended to remove CO₂ from the absorption liquid and leave the system ready for another measurement cycle.

2.2. Mathematical Model

The measurement principle on which the carbon dioxide-methane gas meter is based is the difference between the water dilution coefficients of CH₄ and CO₂ at a given temperature (*i.e.*, a larger quantity of one gas dissolves than the other at the selected temperature). A mathematical model was thus developed to predict the theoretical behavior of this physical phenomenon and to serve as a guide into the design of the sensor. The mathematical model was also useful to validate the operational performance of the sensor. To calculate the number of moles of water needed to completely dissolve a sample consisting exclusively of CO₂, the following equation is used:

$$n_{H_2O} = \frac{n_{CO_2} - n_{CO_2} X_{CO_2}}{X_{CO_2}} \quad (1)$$

where n_{H_2O} is the number of moles of water, n_{CO_2} is the number of moles of CO₂ in a sample consisting exclusively of this substance and X_{CO_2} is the molar fraction of CO₂ in the water.

To determine the equilibrium that exists between a finite number of moles of a binary gas mixture (CO₂ and CH₄) and a finite number of moles of absorption water, the equations that describe the molar fraction of gases in water and the mole fraction of gases in the sample should be considered. The equation relating the gas dissolved in the liquid phase in contact with the gas phase should also be considered.

The following equations describe the dilution in water saturated with a binary mixture of gaseous species:

$$X_{CO_2} P_{CO_2p} = \frac{n_{CO_2}}{n_{CO_2} + n_{CH_4} + n_{H_2O}} \quad (2)$$

$$X_{CH_4} P_{CH_4p} = \frac{n_{CH_4}}{n_{CO_2} + n_{CH_4} + n_{H_2O}} \quad (3)$$

where X_{CO_2} is the CO₂ molar fraction in water, P_{CO_2p} is the partial pressure of CO₂ (in atm), n_{CO_2} is the number of moles of CO₂ dissolved in the absorption water, n_{CH_4} is the number of moles of CH₄ dissolved in the absorption water, n_{H_2O} is the number of moles of absorption water, X_{CH_4} is the CH₄ molar fraction in water and P_{CH_4p} is the partial pressure of CH₄ (in atm).

Equation (2) is solved for n_{CO_2} and Equation (3) is solved for n_{CH_4} to obtain Equations (4) and (5), respectively:

$$n_{CO_2} = \frac{X_{CO_2} P_{CO_2p} (n_{CH_4} + n_{H_2O})}{1 - X_{CO_2} P_{CO_2p}} \quad (4)$$

$$n_{CH_4} = \frac{X_{CH_4} P_{CH_4p} (n_{CO_2} + n_{H_2O})}{1 - X_{CH_4} P_{CH_4p}} \quad (5)$$

Equations (6) and (7) describe the concentrations of CO₂ and CH₄ in the gaseous phase, respectively. These equations are equivalent to the partial pressure of each of the gases in the mixture:

$$P_{CO_2p} = \frac{n_{CO_2g}}{n_{CO_2g} + n_{CH_4g}} \quad (6)$$

$$P_{CH_4p} = \frac{n_{CH_4g}}{n_{CO_2g} + n_{CH_4g}} \quad (7)$$

where P_{CO_2p} is the partial pressure of CO_2 in the mixture (in atm), n_{CO_2g} is the moles of CO_2 in the gaseous phase, n_{CH_4g} is the moles of CH_4 in the gaseous phase and P_{CH_4p} is the partial pressure of CH_4 in the mixture (in atm).

When a gas sample is taken, there exists a finite quantity of moles of CO_2 and CH_4 , which are in contact with a finite quantity of moles of the absorption liquid. Part of those moles in the gaseous phase will dilute into the absorption liquid until equilibrium is reached. Despite this fact, the quantity of moles of both gases remains the same. The constant quantity of moles for both of the gases is described by Equations (8) and (9), respectively:

$$n_{CO_2m} = n_{CO_2} + n_{CO_2g} \quad (8)$$

$$n_{CH_4m} = n_{CH_4} + n_{CH_4g} \quad (9)$$

where n_{CO_2m} is the number of moles of CO_2 in the unaltered sample, n_{CO_2} is the number of moles of CO_2 dissolved in the absorption liquid, n_{CO_2g} is the number of moles of CO_2 in the gaseous phase, n_{CH_4m} is the number of moles of CH_4 in the unaltered sample, n_{CH_4} is the number of moles of CH_4 dissolved in the absorption liquid and n_{CH_4g} is the number of moles of CH_4 in the gaseous phase. By solving Equation (8) for n_{CO_2g} and Equation (9) for n_{CH_4g} , Equations (10) and (11) are obtained:

$$n_{CO_2g} = n_{CO_2m} - n_{CO_2} \quad (10)$$

$$n_{CH_4g} = n_{CH_4m} - n_{CH_4} \quad (11)$$

To leave these equations in terms of n_{CO_2} , n_{CH_4} , n_{CO_2m} and n_{CH_4m} , Equations (10) and (11) are substituted into Equations (6) and (7), resulting in Equations (12) and (13):

$$P_{CO_2p} = \frac{n_{CO_2m} - n_{CO_2}}{n_{CO_2m} - n_{CO_2} + n_{CH_4m} - n_{CH_4}} \quad (12)$$

$$P_{CH_4p} = \frac{n_{CH_4m} - n_{CH_4}}{n_{CO_2m} - n_{CO_2} + n_{CH_4m} - n_{CH_4}} \quad (13)$$

Equations (12) and (13) describe the partial pressures of CO_2 and CH_4 in terms of n_{CO_2} , n_{CH_4} , n_{CO_2m} and n_{CH_4m} . These equations are substituted in Equations (4) and (5), resulting in Equations (14) and (15), respectively:

$$n_{CO_2} = \frac{X_{CO_2} \left(\frac{n_{CO_2m} - n_{CO_2}}{n_{CO_2m} - n_{CO_2} + n_{CH_4m} - n_{CH_4}} \right) (n_{CH_4} + n_{H_2O})}{1 - X_{CO_2} \left(\frac{n_{CO_2m} - n_{CO_2}}{n_{CO_2m} - n_{CO_2} + n_{CH_4m} - n_{CH_4}} \right)} \quad (14)$$

$$n_{CH_4} = \frac{X_{CH_4} \left(\frac{n_{CH_4m} - n_{CH_4}}{n_{CO_2m} - n_{CO_2} + n_{CH_4m} - n_{CH_4}} \right) (n_{CO_2} + n_{H_2O})}{1 - X_{CH_4} \left(\frac{n_{CH_4m} - n_{CH_4}}{n_{CO_2m} - n_{CO_2} + n_{CH_4m} - n_{CH_4}} \right)} \quad (15)$$

Equation (14) is solved for n_{CO_2} and Equation (15) is solved for n_{CH_4} again, resulting in Equations (16) and (17):

$$n_{CO_2} = \frac{\left(n_{CH_4} - n_{CH_4m} - n_{CO_2m} - n_{CH_4} X_{CO_2} + n_{CO_2m} X_{CO_2} - n_{H_2O} X_{CO_2} \pm \sqrt{\left(-n_{CH_4} + n_{CH_4m} + n_{CO_2m} + n_{CH_4} X_{CO_2} - n_{CO_2m} X_{CO_2} + n_{H_2O} X_{CO_2} \right)^2 - 4(-1 + X_{CO_2}) \left(-n_{CH_4} n_{CO_2m} X_{CO_2} - n_{CO_2m} n_{H_2O} X_{CO_2} \right)} \right)}{2(-1 + X_{CO_2})} \quad (16)$$

$$n_{CH_4} = \frac{\left(-n_{CH_4m} + n_{CO_2} - n_{CO_2m} - n_{CO_2m} X_{CH_4} - n_{CO_2} X_{CH_4} - n_{H_2O} X_{CH_4} \pm \sqrt{\left(n_{CH_4m} - n_{CO_2} + n_{CO_2m} - n_{CH_4m} X_{CH_4} + n_{CO_2} X_{CH_4} + n_{H_2O} X_{CH_4} \right)^2 - 4(-1 + X_{CH_4}) \left(-n_{CH_4m} n_{CO_2} X_{CH_4} - n_{CH_4m} n_{H_2O} X_{CH_4} \right)} \right)}{2(-1 + X_{CO_2})} \quad (17)$$

These equations have one square root each; therefore, there are two possible solutions that satisfy each of them. To make them independent of each other, Equation (16) was substituted into Equation (17) and *vice versa*. The resulting equations were then solved for n_{CO_2} and n_{CH_4} , providing Equations (18) and (19):

$$n_{CO_2} = \frac{\left(\left(n_{CH_4m} X_{CO_2} + n_{CO_2m} X_{CO_2} - n_{CH_4m} X_{CH_4} X_{CO_2} \right) - \left(-n_{H_2O} X_{CH_4} X_{CO_2} - n_{CO_2m} X_{CO_2}^2 + n_{H_2O} X_{CO_2}^2 \right) \right) - \sqrt{\left(-n_{CH_4m} X_{CO_2} - n_{CO_2m} X_{CO_2} + n_{CH_4m} X_{CH_4} X_{CO_2} \right)^2 + \left(n_{H_2O} X_{CH_4} X_{CO_2} + n_{CO_2m} X_{CO_2}^2 - n_{H_2O} X_{CO_2}^2 \right) - 4n_{CO_2m} n_{H_2O} X_{CO_2}^2 \left(-X_{CH_4} + X_{CO_2} + X_{CH_4} X_{CO_2} - X_{CO_2}^2 \right)}}{2(-X_{CH_4} + X_{CO_2} + X_{CH_4} X_{CO_2} - X_{CO_2}^2)} \quad (18)$$

$$n_{CH_4} = \frac{\left(\left(n_{CH_4m} X_{CH_4} + n_{CO_2m} X_{CH_4} - n_{CO_2m} X_{CH_4} X_{CO_2} \right) - \left(-n_{H_2O} X_{CH_4} X_{CO_2} - n_{CH_4m} X_{CH_4}^2 + n_{H_2O} X_{CH_4}^2 \right) \right) - \sqrt{\left(-n_{CH_4m} X_{CH_4} - n_{CO_2m} X_{CH_4} + n_{CO_2m} X_{CH_4} X_{CO_2} \right)^2 + \left(n_{H_2O} X_{CH_4} X_{CO_2} + n_{CH_4m} X_{CH_4}^2 - n_{H_2O} X_{CH_4}^2 \right) - 4n_{CH_4m} n_{H_2O} X_{CH_4}^2 \left(X_{CH_4} - X_{CO_2} + X_{CH_4} X_{CO_2} - X_{CH_4}^2 \right)}}{2(X_{CH_4} - X_{CO_2} + X_{CH_4} X_{CO_2} - X_{CH_4}^2)} \quad (19)$$

Equations (18) and (19) describe the number of moles of CO_2 and CH_4 , respectively, dissolved in the absorption water at equilibrium.

Finally, to obtain the response of the device based on the mathematical model, Equation (20) is applied:

$$Y = \left(\frac{(n_{CH_4m} + n_{CO_2m}) - (n_{CH_4} + n_{CO_2})}{n_{CH_4m} + n_{CO_2m}} \right) (100) \quad (20)$$

where Y is the theoretical response of the device and the data represent the percent of methane content.

2.3. FPGA Implementation

The digital subsystem that conducts the data acquisition, data processing, data distribution, control, PC communication and local functionality was implemented in a Spartan-3 XC3S200-FT256 FPGA [25]. This device counts with 200,000 gates, twelve 18K-bit block random access memory (RAM), twelve 18×18 hardware multipliers and 173 inputs and outputs defined by the user. The reference clock runs at 50 MHz. Furthermore, the board counts with a four-character, seven-segment light emitting diode (LED) display that is controlled by the FPGA to display the processed data. Finally, a 9-pin RS-232 serial port was devised to establish communication with a personal computer for data acquisition purposes. A HDL was used to describe the digital subsystem. This digital subsystem description was synthesized in the FPGA and is composed of many elements (Figure 1).

The RS-232 interface module conducts communication with a PC for data acquisition and configuration purposes. The PID temperature controller module, based on a difference equation, computes the control command for the cooling system, keeping the system temperature at 288.15 K. The Activation State Timer module keeps track of the time in which solenoid valves and mini-compressors are active, reporting to the Control module the end of this time. This timer module also provides the timing necessary in each stage of the measurement sequence. The number of moles inside the measurement cell and the percentage of methane present in the analyzed sample are computed by the Data Processing module. The Sampling Time Base module dictates the rate at which the analog to digital converters (ADCs) sample and the digital to analog converters (DACs) are updated (every 1.0×10^{-3} s). The Data Acquisition and Distribution modules sample, quantify and encode temperature, gauge pressure and absolute pressure electronic signals. They also translate the digital command information generated by the Control module into adequate electronic signals for solenoid valves, mini-compressors, mini-pumps, the cooling system and the display. The Polynomial Linearization module performs the computation of the mathematical operations needed to linearize the raw data obtained from the device, leaving it suitable for interpretation. The displayed data is computed and updated at the end of each measurement cycle. The Control module is a finite state machine (FSM) that commands modules to execute an action or respond to stimuli from other modules to synchronize actions in every measurement cycle.

2.4. Statistical Characteristics

The Accuracy is the degree of closeness of measurements of a quantity to that quantity's actual (true) value. The next equations are used. With Equation (21) data average is calculated which is a part of the accuracy. In the equation \bar{x} represents the average, n is the data number, i represents the index and x the data [26]:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (21)$$

Sample variance is calculated with Equation (22), value necessary to calculate standard deviation. In Equation (22), s^2 represents the sample variance, n is the data number, I stands for the index, x is the data and \bar{x} is the average value obtained with Equation (21) [26]:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \quad (22)$$

Standard Deviation is calculated with Equation (23), value necessary to calculate Accuracy. In Equation (23), s represents the standard deviation and s^2 is the sample variance value obtained with Equation (22) [26]:

$$s = \sqrt{s^2} \quad (23)$$

The accuracy is calculated with Equation (24). Where \bar{x} is the average value obtained in Equation (21), t is the critical value $t_{\alpha, n-1}$ for t distribution, α represents the trust range $100(1 - \alpha)\%$, n is the data number and s stands for the standard deviation [26]:

$$\bar{x} \pm t_{\alpha/2, n-1} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (24)$$

The precision is the degree to which repeated measurements under unchanged conditions show the same results. And the next equation is used.

The Variation Coefficient describes Precision, and it is calculated with Equation (25). To calculate the Variation Coefficient, the Standard Deviation and the Average values obtained with Equations (23) and (22) respectively are used [26]:

$$v.c. = \frac{s}{\bar{x}} (100\%) \quad (25)$$

2.5. Polynomial Curve Fitting

A polynomial curve fitting is made with Matlab R2009a to linearize the output of the device and improve user readiness. The command used is $p = \text{polyfit}(x, y, n)$ that finds the coefficients of a polynomial $p(x)$ of degree n that fits the data, $p(x(i))$ to $y(i)$, in a least squares sense. The result p is a row vector of length $n + 1$ containing the polynomial coefficients in descending powers as shown in Equation (26) [27]:

$$p(x) = p_1 x^n + p_2 x^{n-1} + \dots + p_n x + p_{n+1} \quad (26)$$

3. Results and Discussion

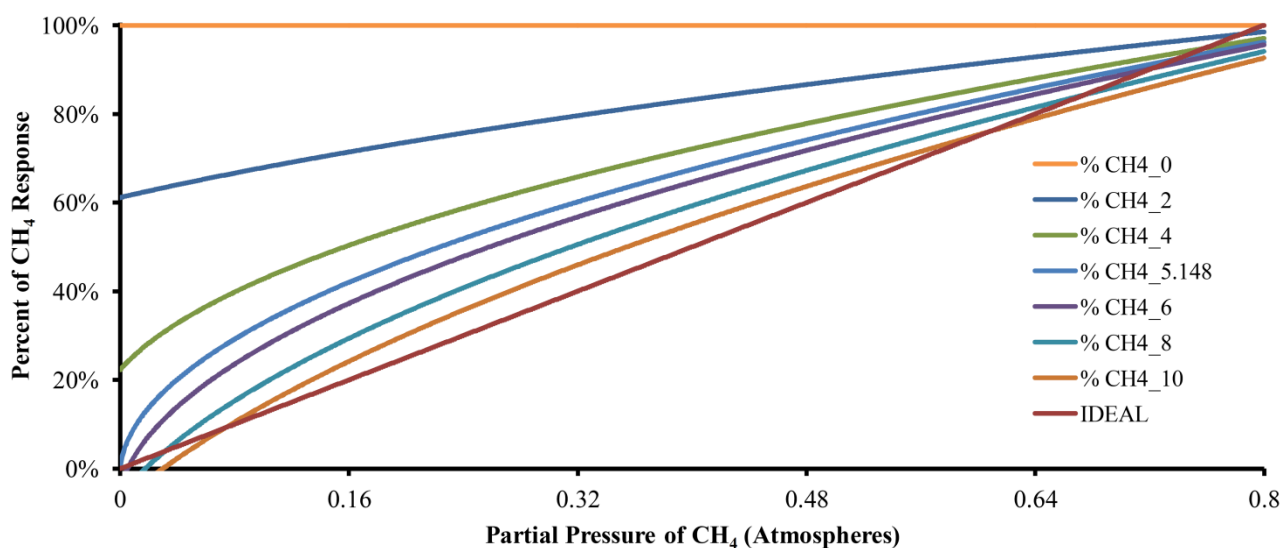
The composition of produced biogas is directly related to digester performance and is an early indicator of digester failure [28]. The carbon dioxide-methane gas sensor described in this work represents a first step in the creation of a low-cost device for biogas quality monitoring and can be used to optimize the operating conditions of anaerobic reactors. After an exhaustive search of specialized literature, no references were found regarding the use of the principle of solubility of gaseous species in water to determine the binary gas mixture composition or the use of FPGAs [29–34] in the implementation of digital controllers, data acquisition and data processing in sensors for determining the composition of binary gas mixtures.

The water dilution coefficients of CH_4 and CO_2 at 288.15 K are 3.122×10^{-5} and 8.21×10^{-4} molar fraction solubility, respectively [17]. This difference is what makes it possible to separate CH_4 and

CO₂ through dilution in water. Equation (1) was used to obtain the minimum quantity of water necessary to completely dissolve a sample of 100 cm³ (0.0033389 moles) of CO₂ (worst-case measurement scenario), obtaining a quantity of 5.148 moles of H₂O (or 92.74 cm³) with an atmospheric pressure of 0.789 atm (0.815 kg·cm⁻²) and a temperature of 288.15 K.

Equations (18) and (19) describe the number of moles of CO₂ and CH₄ dissolved in the absorption liquid at equilibrium, respectively. Equation (20) uses the data generated by Equations (18) and (19) to predict the behavior of the described device. Six responses of the mathematical model with different quantities of absorption liquid in addition to an ideal or perfect response are shown in Figure 3, where CH4_0, CH4_2, CH4_4, CH4_6, CH4_8 and CH4_10 correspond to the responses with zero, two, four, six, eight and ten moles of water, respectively. CH4_5.148 is the response with the calculated number of moles of water to be used by the device to absorb a sample of 100% CO₂ and IDEAL represents the plot of a perfect response.

Figure 3. The response of the mathematical model with different quantities of absorption liquid (in moles). CH4_0 with 0 moles, CH4_2 with 2 moles, CH4_4 with 4 moles, CH4_5.148 with 5.148 moles, CH4_6 with 6 moles, CH4_8 with 8 moles and CH4_10 with 10 moles. In addition, an IDEAL plot is included for a theoretical perfect response.



When there is no absorption liquid (plot CH4_0), the data value obtained from the model kept constant along the entire range of concentrations of CH₄ represented a sample composed of an insoluble gas. For CH4_2, the model has a theoretical quantity of two moles of absorption liquid and the curve starts near 60%. The same behavior can be observed for CH4_4, which corresponds to a theoretical quantity of four moles of absorption liquid, but now the curve starts at 20%. In both cases, such behavior indicates that the quantity of the absorption liquid was insufficient for maximum system sensitivity. The curve of CH4_5.148 shows the response of the model with 5.148 moles of absorption liquid and starts at 0%, showing the widest dynamic range of the instrument. When there are six, eight and ten moles of absorption liquid (curves CH4_6, CH4_8 and CH4_10, respectively), the system started to show a dead band in the lower concentration of CH₄ that increased with the number of moles of water. However, these curves show attenuation at higher concentrations of CH₄ due to over-absorption. In the last case (CH4_10), the greatest dead-band in the lower concentrations of CH₄ and the greatest

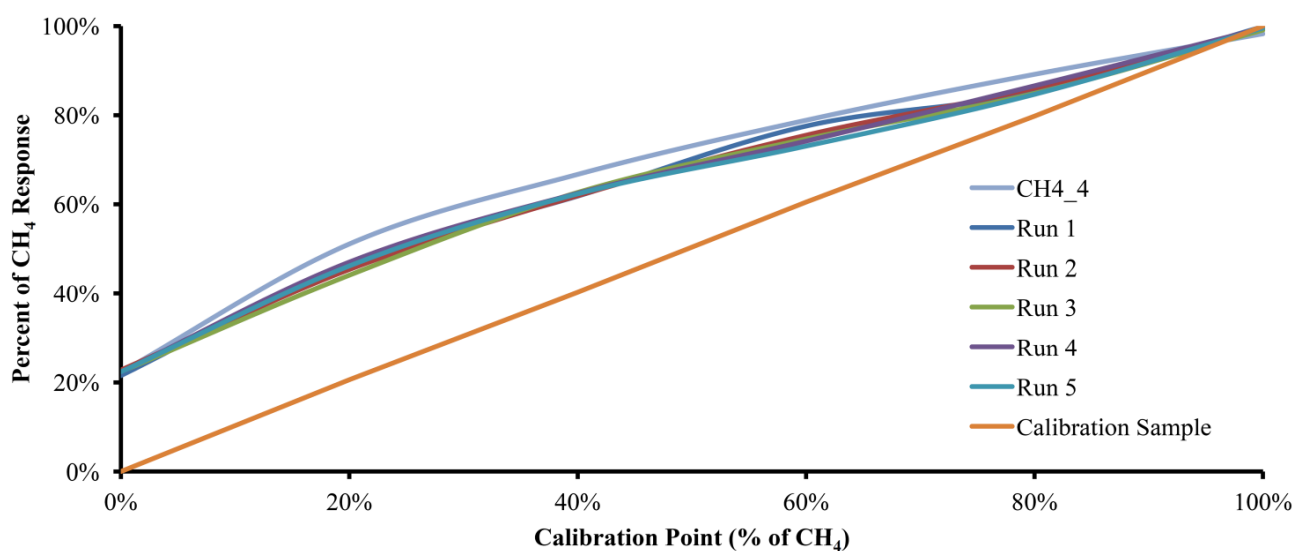
attenuation in the highest concentration of CH₄ were observed, complicating the measurement at both ends of the range and improving the linearity in the middle range. In summary, changes in the amount of absorption liquid changes the device characteristics.

To evaluate the operational performance of the binary gas sensor, a variety of CO₂-CH₄ binary mixture concentrations were used. The concentrations used are described in Table 1, and were made by INFRA [35]. The quantity of the absorption liquid used was 5.148 moles (92.74 cm³), the gas sensor temperature was set at 288.15 K and the atmospheric pressure was 0.815 kg·cm⁻³.

Table 1. Statistical characteristics obtained from the experimental data.

Calibration Point		Device Resp. (% of CH ₄)	Accuracy (%)	Precision (%)
(% of CH ₄)	(% of CO ₂)			
0.00%	99.99%	22.28%	±0.56%	2.04%
20.61%	79.39%	45.86%	±1.47%	2.58%
40.25%	59.75%	62.27%	±0.43%	0.56%
60.50%	39.50%	74.99%	±2.09%	2.24%
79.79%	20.21%	85.48%	±1.01%	0.95%
99.99%	0.00%	99.50%	±0.35%	0.28%

Figure 4. The experimental interday device response (run 1 to run 5). In addition, a plot of the mathematical model with 4 moles of absorption liquid and a plot of the Calibration Sample are shown.



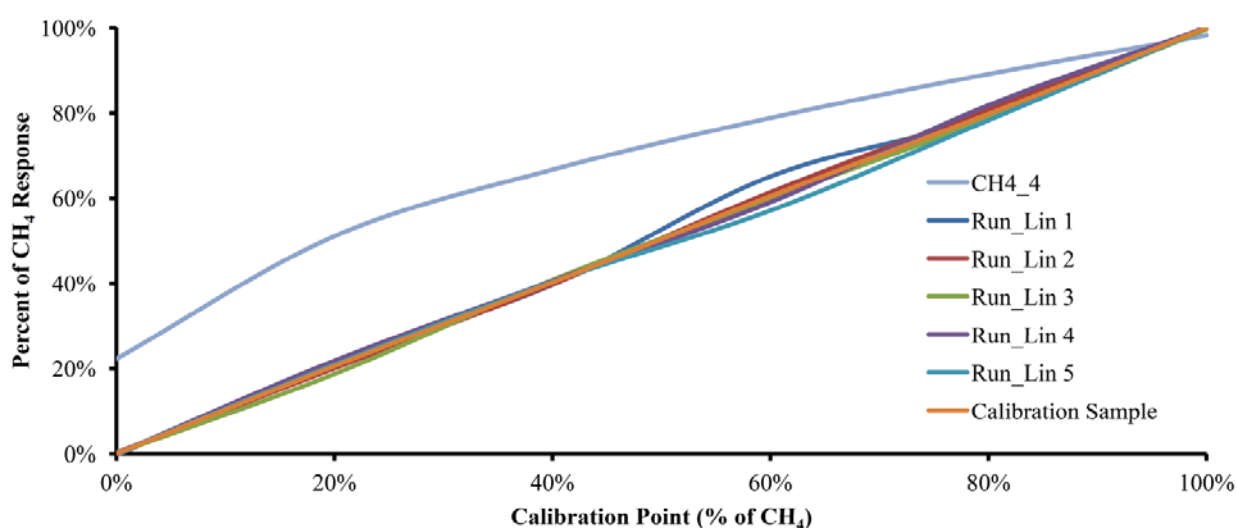
Five calibration cycles were performed with each of the six gas mixtures and on different days to account for variable ambient conditions. In order to obtain the Accuracy, the critical value t was set to 2.776 and α is set to 0.05. The five runs, along with the plot of the data obtained from the model with 4.0 moles of water and a plot with the calibration gas mixture used, are shown in Figure 4. Interestingly, the experimental results with 5.148 moles of water were very similar to the results of the mathematical model with 4.0 moles of water. Such experimental behavior could be attributed to humidity content in the sample, interference of other substances diluted in the water used as the absorption liquid or to structural characteristics of the experimental device.

A polynomial linearization with Matlab R2009a allows the data obtained from the device to be adjusted for ease of interpretation. The polynomial equation used to linearize the obtained data is shown in Equation (27):

$$f(x) = -12.7742x^5 + 34.5923x^4 - 35.3856x^3 + 17.9448x^2 - 3.5978x + 0.2239 \quad (27)$$

Figure 5 shows the curves of the same five runs from Figure 4 along with the plots for CH4_4 and the Calibration Sample, but using polynomial linearization Equation (21). As can be seen, the linearized plots move away from the CH4_4 curve and trend toward the Calibration Sample plot.

Figure 5. The experimental data after polynomial linearization (run 1 to run 5). In addition, a plot of the mathematical model with 4 moles of absorption liquid and a plot of the Calibration Sample are shown.



While there are several ways to further improve this device, it can be considered the first step toward the development of a biogas quality monitoring sensor.

4. Conclusions

The development of a novel, simple and low-cost automatic carbon dioxide-methane gas sensor, based on the solubility of gases in water, as the precursor of a sensor for biogas quality monitoring has been successfully completed. The device described in this work uses a novel measurement principle that makes it very simple to build and operate. The design, construction and setup of a digital processing and control system into a low-cost FPGA platform has permitted the successful implementation in a standalone carbon dioxide-methane gas sensor. The digital system developed to control the device and the data processing is very robust due to dedicated hardware implementation. The device prevents misreading due to its physical construction by minimizing CO₂ loss, performs auto-calibration of the heat transfer fluid level at the beginning of every measurement cycle and is unaffected by the ambient temperature. The described device is a step forward in the development of a biogas quality monitoring sensor, which once completed, could be a useful tool for engineers, scientists and all those interested in following biogas quality dynamics in any kind of anaerobic digestion process.

Acknowledgments

The authors gratefully acknowledge Rene Romero Troncoso for technical support.

References

1. Rego, R.; Mendes, A. Carbon dioxide/methane gas sensor based on the permselectivity of polymeric membranes for biogas monitoring. *Sens. Actuat. B* **2004**, *103*, 2–6.
2. Sedlačík, R.; Dvořáčková, M.; Hruška, F. Application experiences of measurement devices of methane and carbon dioxide concentration. *Arch. Mater. Sci.* **2007**, *28*, 1–4.
3. Hoppe, M.; Schley, P.; Uhrig, M. Metrological issues in energy measurement on biogas. *Accredit. Qual. Assur.* **2009**, *14*, 677–683.
4. Edinburgh Instruments. Available online: <http://www.edinst.com/> (accessed on 1 May 2012).
5. Nordberg, Å.; Hansson, M.; Sundh, I.; Nordkvist, E.; Carlsson, H.; Mathisen, B. Monitoring of biogas process using electronic gas sensors and near-infrared spectroscopy (NIR). *Water Sci. Technol.* **2000**, *41* 3, 1–8.
6. Foss NIRSystems. Available online: <http://www.foss-nirsystems.com/> (accessed on 1 May 2012).
7. Steyer, J.P.; Bouvier, J.C.; Conte, T.; Gras, P.; Sousbie, P. Evaluation of a four year experience with a fully instrumented anaerobic digestion process. *Water Sci. Technol.* **2002**, *45*, 495–502.
8. Siemens. Available online: <http://www.siemens.com/> (accessed on 1 May 2012).
9. Werle, P.; Slemr, F.; Maurer, K.; Kormann, R.; Mücke, R.; Jänker, B. Near- and mid-infrared laser-optical sensors for gas analysis. *Opt. Lasers Eng.* **2002**, *37*, 101–114.
10. Shimadzu. Available online: <http://www.shimadzu.com/> (accessed on 1 May 2012).
11. Mandal, T.; Kiran, B.A.; Mandal, N.K. Determination of the quality of biogas by flame temperature measurement. *Energy Convers. Manag.* **1999**, *40*, 1225–1228.
12. Rego, R.; Caetano, N.; Mendes, A. Development of a new gas sensor for binary mixtures based on the permselectivity of polymeric membranes: Application to carbon dioxide/methane and carbon dioxide/helium mixtures. *Anal. Chim. Acta* **2004**, *511*, 215–221.
13. Rozzi, A.; Burton, K.W.; Hawkes, D.L. Potentiometric method for the determination of carbon dioxide in biogas. *J. Agric. Eng. Res.* **1983**, *28*, 505–512.
14. Carlson, J.E.; Martinsson, P.E. Ultrasonic measurement of molar fractions in gas mixtures by orthogonal signal correction. In *Proceedings of the 50th Anniversary Joint Conference of IEEE International Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Montreal, Canada, 23–27 August 2004; pp. 821–825.
15. Tardy, P.; Coulon, J.R.; Lucat, C.; Menil, F. Dynamic thermal conductivity sensor for gas detection. *Sens. Actuat. B* **2004**, *98*, 63–68.
16. Gonzalez-Gil, G.; Kleerebezem, R.; Lettinga, G. Assessment of metabolic properties and kinetic parameters of methanogenic sludge by on-line methane production rate measurements. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* **2002**, *58*, 248–254.
17. Lide, D.R. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 85th ed.; CRC: Boca Raton, FL, USA, 2005; pp. 8:86–8:89.
18. ACDelco. Available online: <http://www.acdelco.com/parts/wiper-products/windshield-washer-pump/> (accessed on 1 May 2012).
19. Tellurex. Available online: <http://www.tellurex.com/> (accessed on 1 May 2012).

20. Cadena-Pereda, R.O.; Rivera-Muñoz, E.M.; Herrera Ruiz, G. Automatic volumetric gas flow meter for monitoring biogas production from laboratory-scale anaerobic digester. *Sens. Actuat. B* **2010**, *147*, 10–14.
21. Clark Solutions. Available online: <http://www.clarksol.com/> (accessed on 1 May 2012).
22. Measurement Specialties. Available online: <http://www.meas-spec.com/> (accessed on 1 May 2012).
23. Honeywell. Available online: <http://www.honeywell.com/> (accessed on 1 May 2012).
24. National Semiconductor. Available online: <http://www.national.com/> (accessed on 1 May 2012).
25. Xilinx. Available online: <http://www.xilinx.com/> (accessed on 1 May 2012).
26. Devore, J.L. *Probabilidad y Estadística Para Ingeniería y Ciencias*, 4th ed.; International Thomson: México City, México, 2003; pp. 278–281.
27. Mathworks. Available online: <http://www.mathworks.com/help/techdoc/ref/polyfit.html> (accessed on 1 May 2012).
28. Gerardi, M.H. *The Microbiology of Anaerobic Digesters*, 1st ed.; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2003; pp. 135–139.
29. Samet, L.; Masmoudi, N.; Kharrat, M.W.; Kamoun, L. A Digital PID controller for real time and multi loop control. In *Proceedings of the 5ème Colloque d’Informatique Industrielle*, Djerba, Tunisie, 8–10 February 1998.
30. Samet, L.; Masmoudi, N.; Kharrat, M.W.; Kamoun, L. A digital PID controller for real time and multi loop control: A comparative study. In *Proceedings of 1998 IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems*, Lisboa, Portugal, 7–10 September 1998; Volume 1, pp. 291–296.
31. Lima, J.; Menotti, R.; Cardoso, J.M.P.; Marques, E. A methodology to design FPGA-based PID controllers. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, Taipei, Taiwan, 8–11 October 2006; pp. 2577–2583.
32. Chan, Y.F.; Moallem, M.; Wang, W. Design and implementation of modular FPGA-based PID controllers. *IEEE Trans. Ind. Electron.* **2007**, *54*, 1898–1906.
33. Jeong-Seob, K.; Hyo-Won, J.; Seul, J. Hardware implementation of nonlinear PID controller with FPGA based on floating point operation for 6-DOF manipulator robot arm. In *Proceedings of the International Conference on Control, Automation and Systems 2007*, Seoul, Korea, 17–20 October 2007; pp. 1066–1071.
34. Subasri, V.; Lavanya, K.; Umamaheswari, B. Implementation of digital PID controller in field programmable gate array (FPGA). In *Proceedings of India International Conference on Power Electronics*, Chennai, India, 19–21 December 2006; pp. 172–176.
35. INFRA. Available online: <http://www.infra.com.mx/> (accessed on 1 May 2012).