

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE
TEMPERATURA PARA EL SECTOR PECUARIO**

JAIME ANDRÉS MORALES RINCÓN

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, NATURALES Y DE LA EDUCACIÓN
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
POPAYÁN
2005**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE
TEMPERATURA PARA EL SECTOR PECUARIO**

JAIME ANDRÉS MORALES RINCÓN

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título de Ingeniero
Físico**

**Director
JUAN FERNANDO FLOREZ MARULANDA**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, NATURALES Y DE LA EDUCACIÓN
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
POPAYÁN
2005**

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa su agradecimiento a:

A mi familia, por brindarme su apoyo y ayuda incondicional para culminar esta etapa tan importante de mi vida.

Juan Fernando Florez, Ingeniero y Director del trabajo de grado de la Universidad del Cauca, por su orientación y dirección en el trabajo de grado.

Universidad del Cauca. Por su formación durante el transcurso de nuestra carrera.

Y a todas aquellas personas que de una u otra forma, colaboraron o participaron en la realización de este trabajo, hago extensivo mi más sincero agradecimiento.

Nota de aceptación:

Director M.Sc. JUAN FERNANDO FLOREZ

Jurado M.Sc. FREDY JAVIER LOPEZ.

Jurado M.Sc. EDGAR MATALLANA

Fecha de sustentación:

Popayán, 10 de Mayo de 2005

CONTENIDO

	Pag.
RESUMEN	
INTRODUCCIÓN	20
1. IMPORTANCIA DEL SECTOR PECUARIO	21
2. IMPORTANCIA DE LA TEMPERATURA EN EL SECTOR PECUARIO	24
2.1 TRANSFERENCIA DE CALOR	25
2.1.1 Convección	26
2.1.2 Conducción	27
2.1.3 Radiación	28
2.1.4 Pérdidas de calor por evaporación	29
3. AUTOMATIZACIÓN PECUARIA	32
3.1 EQUIPOS DISPONIBLES EN EL MERCADO	32
3.1.1 Controlador farm hand vent master	32

3.1.2	Controlador ambiental farm hand master	33
3.1.3	Controlador farm hand power vent	35
3.1.4	Conmutador de luces manual.	35
3.1.5	Controlador de cortina powertack	36
3.1.6	Refrigeración evaporativa polar-cool	36
3.1.7	Calefactor de montaje externo	37
3.1.8	Criadora infrarroja super glo	38
3.1.9	Criadora bunsen jet	39
4	SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA POR BUS DE CAMPO	40
4.1	BUS DE CAMPO	42
4.2	NIVEL FISICO	42
4.2.1	Características Eléctricas	43
4.2.2	Terminaciones de línea	48
4.2.3	Interconexión física	53
4.3	NIVEL DE ENLACE	55

4.3.1 Descripción de la trama	61
4.3.1.1 Campo de dirección	61
4.3.1.2 Campo de función	61
4.3.1.3 Campo de datos	62
4.3.1.4 Campo de comprobación de error	63
4.3.1.5 Comprobación CRC	63
5 CONTROLADOR DE TEMPERATURA	66
5.1 CONTROL DE ENCENDIDO – APAGADO (ON - OFF)	66
5.1.1 Brecha diferencial.	68
5.2 IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR	70
5.2.1 Interfaz de usuario	71
5.2.2 Funciones del menú del controlador	76
5.2.2.1 Actualizar fecha hora	76
5.2.2.2 Ingresar lote	76
5.2.2.3 Cancelar lote	76

5.2.2.4 Edad y fecha actual del lote	76
5.2.2.5 Temperatura de las criadoras	76
5.2.2.6 Reporte de alarmas	76
5.2.2.7 Configuración del sistema	76
6 TRASMISOR DE TEMPERATURA	79
7 ACTUADOR A GAS	86
8 PRUEBAS DE CAMPO	90
9 CONCLUSIONES	91
BIBLIOGRAFÍA	93
ANEXOS	94

LISTA DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1. Rango de la temperatura de cría	70
Tabla 2. Teclado matricial del controlador de temperatura	75
Tabla 3. Coeficientes vs. Orden del filtro	98

LISTA DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1. Consumo mundial per cápita de carnes	22
Figura 2. Vías o formas por las que un animal puede ganar o perder calor	26
Figura 3. Farm hand vent master	33
Figura 4. Farm hand master	34
Figura 5. Farm hand power vent	35
Figura 6. Conmutador de luces manual	35
Figura 7. Controlador de cortina powertack	36
Figura 8. Refrigeración Evaporativa Polar-Cool	37
Figura 9. Calefactor de montaje externo	38
Figura 10. Criadora infrarroja super glo	38
Figura 11. Criadora bunsen jet	38
Figura 12. Esquema de una red de bus de campo	41

Figura 13. Descripción del sistema de control por bus de campo	41
Figura 14. Balanceo diferencial de líneas	43
Figura 15. Balanceo diferencial de línea a la entrada del receptor	44
Figura 16. Transceiver SN75176B	45
Figura 17. Tablas de función	45
Figura 18. Circuito de prueba para la sensibilidad de entrada y forma de onda resultante	46
Figura 19. Sensibilidad de entrada y voltaje resultante de dispositivos 485	47
Figura 20. Red típica RS485 comunicación por dos cables	48
Figura 21. Configuración diferencial sin terminación	49
Figura 22. Configuración diferencial con terminación en paralelo	50
Figura 23. Configuración diferencial con terminación AC	50
Figura 24. Estados del voltaje diferencial	50
Figura 25. Resistencias de pullup	52
Figura 26. Circuito equivalente para la impedancia de los receptores	54
Figura 27. Cable STP	55

Figura 28. Cable UTP	55
Figura 29. Velocidad de transmisión vs. Longitud del cable	56
Figura 30. Trama del mensaje	56
Figura 31. Ciclo de petición	57
Figura 32. Secuencia de bits en modo RTU con bit de paridad	59
Figura 33. Secuencia de bits en modo RTU con dos bits de parada	59
Figura 34. Trama del mensaje RTU	60
Figura 35. Intervalo silencioso entre caracteres	61
Figura 36. Posición de la válvula contra temperatura medida	66
Figura 37. Temperatura medida real contra tiempo y apertura de la válvula contra tiempo	67
Figura 38. Brecha diferencial en el control de encendido – apagado	69
Figura 39. Diagrama de bloque de un controlador de encendido - apagado	70
Figura 40. Conjuntos difusos de entrada al sistema fuzzy	71
Figura 41. Conjuntos de salida del sistema fuzzy	72
Figura 42. Reglas de relación entre conjuntos de entrada y salida del sistema fuzzy	73

Figura 43. Circuito electrónico del controlador de temperatura	77
Figura 44. Controlador de temperatura embebido	78
Figura 45. Transmisor de 4 a 20 mA	79
Figura 46. Diagrama de bloques del transmisor de temperatura	80
Figura 47. Sistema de adquisición de datos	80
Figura 48. Respuesta en frecuencia del filtro antialiasing	81
Figura 49. Circuito antialiasing	82
Figura 50. Respuesta en frecuencia del filtro FIR	83
Figura 51. Respuesta al escalón del filtro FIR.	83
Figura 52. Transmisor de temperatura embebido	84
Figura 53. Diagrama electrónico del transmisor de temperatura	85
Figura 54. Circuito electrónico del actuador a gas	87
Figura 55. Actuador a gas	88
Figura 56. Sistema de control de temperatura por red de bus de campo Embebido	89
Figura 57. Parámetros claves para el diseño de un filtro análogo	96

Figura 58. Respuesta de un filtro Butterworth para diferente número de polos	97
Figura 59. Respuesta a la frecuencia de los filtros más populares	98
Figura 60. Efecto del Aliasing	99
Figura 61. Fenómeno del aliasing en el dominio de la frecuencia	100
Figura 62. Señal de salida de un filtro pasa bajas	101
Figura 63. Señal cubierta de ruido	103
Figura 64. Señal filtrada	103
Figura 65. Procesamiento de la señal usando un filtro digital.	104

LISTA DE ANEXOS

	Pag.
Anexo A. Filtro análogo	96
Anexo B. Filtro digital	102

GLOSARIO

AMPLIFICADOR OPERACIONAL: amplificador en un circuito integrado con una entrada diferencial, que tiene una ganancia de voltaje y resistencia muy alta.

ATENUACIÓN: en redes, significa la atenuación progresiva de la potencia de la señal digital al aumentar la distancia.

CONTROL ENCENDIDO – APAGADO: el modo más simple de control, en que las únicas condiciones para el dispositivo corrector final son encendido y apagado total.

DIAFONIA: transferencia indeseada de energía desde una fuente perturbadora a otra, generalmente por acoplamiento electromagnético entre cables adyacentes.

ELECTROVALVULA: válvula manejada por solenoide que es útil para el modo de control encendido – apagado.

HALF DUPLEX: transmisión de la información en ambas direcciones, pero no al mismo tiempo utilizando el mismo medio.

HOMEOTERMIA: Control de la temperatura interna, que permite al animal mantener la temperatura corporal dentro de unos límites, independientemente de la temperatura ambiental.

MAESTRO / ESCLAVO: configuración donde un dispositivo es maestro y varios dispositivos son esclavos. Los esclavos solo pueden intercambiar datos con el maestro.

MEDIO DE TRANSMISIÓN: conexión eléctrica entre transmisor y receptor sin importar la distancia entre ellos.

RECEPTOR: extrae la señal deseada del medio de comunicación, dejándola en el transductor de salida.

RED: conjunto de equipos configurados estratégicamente para que mas de dos dispositivos puedan comunicarse entre si.

RED DE COMUNICACIÓN: conjunto de dispositivos que comparten información a través de un medio de comunicación y reglas llamadas protocolos.

RUIDO: señales aleatorias de tipo eléctrico originadas en forma natural dentro o fuera de un sistema.

SOLENOIDE: electroimán especializado que funciona como un dispositivo de actuación (para válvulas, contactos automáticos, etc.).

TEOREMA DE MUESTREO DE NYQUIST: teorema que establece que la frecuencia de muestreo no debe ser inferior al doble de la variación de frecuencia más alta que vaya a capturarse.

TRANSMISOR: modulador o codificador si la fuente de información es analógica o digital.

TRANSMISIÓN ASÍNCRONA: no existe sincronización entre los relojes del transmisor y el receptor.

RESUMEN

En el presente trabajo se diseña e implementa un sistema instrumentado digital de control de temperatura soportado en una red de bus de campo. El sistema permite garantizar condiciones de ambiente controlado que repercuten en una mejor crianza de animales en el sector pecuario, primordialmente el sistema esta enfocado en los subsectores avícola, porcícola y especies exóticas como las avestruces, gracias a que los rangos de temperatura y condiciones de crianza son similares.

El sistema básicamente consta de una red de bus de campo a la cual se pueden conectar tres dispositivos diferentes: un transmisor de temperatura que permite monitorear permanentemente la temperatura en un punto específico de un lote de crianza, un actuador o criadora a gas encargada en ultimas de garantizar la temperatura al manipular un flujo de gas que se combustiona e irradia calor al lote de crianza y un controlador de temperatura que se encarga de activar un grupo de actuadores. Todos los dispositivos se soportan en microcontroladores, el procesamiento es digital y la red de comunicación empleada es un estándar industrial abierto.

La ventaja principal del presente sistema de control de temperatura es su modularidad, ya que le permite al productor el crecimiento incremental del sistema, conectando nuevos dispositivos a la red de campo, tales como transmisores de temperatura y/o actuadores, que permitan cubrir nuevas áreas dentro del sitio de crianza dependiendo del volumen de producción. Además brinda la posibilidad de actualizar el sistema a medida que avanza la tecnología al poder reemplazar un dispositivo cualquiera dentro de la red. La segunda ventaja del sistema implementado es que permite contar con tecnología cien por ciento nacional, altamente confiable y unos precios muy asequibles para el productor local y esto le da gran utilidad comercial.

Finalmente, el objetivo general planteado en el anteproyecto fue diseñar e implementar un sistema de control de temperatura mediante microcontrolador. Así mismo los objetivos específicos fueron:

- Estudiar de manera correlacionada los parámetros físicos que intervienen en el control de temperatura para las especies del sector pecuario.
- Diseñar y construir los transmisores de temperatura que permitan el envío de la señal de medición de un sitio remoto hasta el controlador.

- Diseñar y construir los actuadores que permitan un control de flujo en las lámparas a gas.
- Diseñar y construir un controlador de temperatura tipo *PID* que permita obtener los rangos de temperatura adecuados con un máximo desempeño de los sensores y actuadores a diseñar.

INTRODUCCIÓN

El propósito de este trabajo, es brindar a los productores nacionales del sector pecuario, una herramienta de tecnología nacional para controlar las condiciones de temperatura en la cría de animales, que le permitan obtener un producto con bajo costo de producción y excelente calidad. Así mismo competir en el actual mercado nacional e internacional cada vez más abierto, exigente y competitivo.

La tecnificación del sector pecuario nacional es muy relativa al productor y a los volúmenes de producción alcanzados. Grandes productores del sector avícola como Carioca, Pimpollo y Macpollo, están en capacidad de introducir en sus procesos de producción la tecnología foránea necesaria que les permite garantizar mejores condiciones de crianza. Pero cuando el productor nacional busca como realizar este proceso de tecnificación se choca con dos grandes obstáculos: primero los altos costos de los equipos de instrumentación extranjeros aunados a los gravámenes de nacionalización de la tecnología y segundo la falta de personal nacional capacitado que realice el proceso de instalación de los equipos, lo cual conlleva a contratar estos servicios con empresas del extranjero y finalmente conduce a elevar los costos de esta tecnología haciendo que sea inviable para el pequeño y mediano productor nacional.

La implementación de tecnología nacional para el sector agropecuario, que se adecue a las condiciones de nuestro país, es una necesidad latente, en el proceso de mejoramiento de las cadenas productivas del sector primario, que permitirán afrontar con mejores condiciones tratados internacionales como el ALCA (Acuerdo de Libre Comercio de la Americas) y el TLC (Tratado de Libre Comercio). Estos tratados apuntan a una liberalización del comercio agropecuario donde prima los bajos costos de producción de países como Estados Unidos, debido a dos factores por un lado el alto grado de tecnificación que poseen y, el más importante, los subsidios que reciben del estado. De no contar con herramientas para afrontar esta situación esto afectaría gravemente a los pequeños y grandes productores nacionales, que son minúsculos en sus volúmenes de producción en comparación con los grandes productores internacionales. Esto sucedería en países donde se carece de tecnología, no hay subsidios para este sector y donde el estado no se prepara adecuadamente y anticipadamente con los productores nacionales para fijar reglas y condiciones en las diferentes mesas de negociación y así evitar las improvisaciones del cuarto de al lado.

1. IMPORTANCIA DEL SECTOR PECUARIO

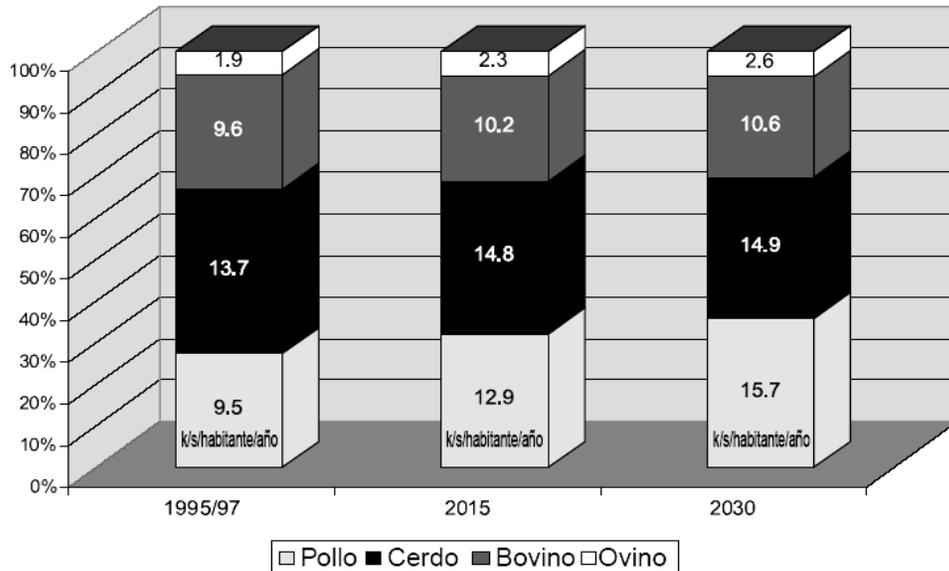
El sector pecuario comprende la ganadería, la avicultura, la piscicultura, la porcicultura y en general la cría de todo animal doméstico con fines de explotación comercial. En este sector, la producción de carnes ha tenido un aumento mundial del 2.8% promedio anual en los últimos veinticinco años. Según la FAO (**Food Americana Organization**) el consumo per capita de carnes aumentará de 34.7 kilos anuales en el trienio 1995/97 a 40 en el 2015 y a 44 en el 2030, la de pollo se volverá la más consumida al pasar de 9.5 a 12.9 y a 15.7, seguida de la de cerdo de 13.7 a 14.9 y por la bovina, de 9.6 a 10.2 y a 10.6 (Figura 1). Este aumento en el consumo, representa un incremento de 200 millones de toneladas anuales de carne en 1995/1997 a 355 en el 2030, es decir el consumo mundial de carnes casi se va a duplicar en menos de 35 años. El comercio de productos cárnicos también crecerá significativamente: el IFPRI (**International Food Policy Research Institute**) estima que aumentará de 8 millones de toneladas en 1993 a 21 millones de el 2020, o sea se incrementara en mas de una vez y media en 27 años, lo que equivale aun crecimiento del 3.64% promedio anual¹.

En Colombia la composición del consumo de carnes difiere sustancialmente de la internacional. La carne bovina es la más producida y consumida, pero la avícola es la que ha registrado los mayores incrementos en la oferta y en la demanda, como sucede en el ámbito mundial. El sector avícola tuvo un crecimiento consolidado para el año 2004 de 2.67% frente al 2003. En el 2005, la recuperación será sustancial, con un crecimiento por encima del 15%².

¹ HOLGUÍN ZAMORANO, Germán *et al.* Desarrollo agropecuario y rural: la estrategia. Cali: Universidad ICESI, 2001. p. 137-138.

² Informe del programa de estudios económicos de fenavi - fonav. En : Industria Avícola. No. 5 (feb 2003)

Figura 1. Consumo mundial per cápita de carnes.



Fuente: Holguín Zamorano *et al.*, 2001.

Sin embargo para que en nuestro país estas actividades pecuarias ofrezcan alternativas productivas y rentables para los productores, deben ser competitivas en el mercado internacional actual. En la actualidad el mercado mundial apunta al libre comercio y nuestro país no es ajeno a esa directriz, en la actualidad se negocian tratados como el ALCA y el TLC. Tratados donde se abren las puertas para la importación y exportación de productos agropecuarios, entre otras cosas, entre Colombia y nuestros países vecinos. En consecuencia nuestro país se debe preparar de dos formas. La primera que en las mesas de negociación, de cada sector, sean cuidadosas en los acuerdos y prebendas que de cada lado se exijan, para evitar quedar en desiguales condiciones competitivas. Esto es particularmente importante en el sector del agro, debido a que los productores de los Estados Unidos reciben importantes subsidios del estado para financiar su producción, lo que hace que los precios de nuestros productos no sean competitivos en comparación con los foráneos, lo que acarrearía que a la vuelta de pocos meses la industria nacional de la leche, la avícola y la del maíz, por no citar otras igualmente importantes, desaparezcan, lo que conllevaría aumentar el desempleo y un agravamiento de los problemas sociales del sector rural. La segunda, que nuestros productores con el apoyo de las organizaciones que los agrupan, y sobre todo del apoyo del estado con políticas claras de tecnificación y reactivación masiva del campo, a través del Ministerio de Agricultura, mejoren los procesos productivos introduciendo tecnología de punta nacional al campo.

Para que Colombia sea competitivo necesita reducir los costos de producción, para esto se hace necesario implementar tecnología agropecuaria nacional dado que la tecnología extranjera es costosa y la mayoría de veces no se adecua a las condiciones ambientales de nuestro país. Para el sector pecuario las características de los suelos, temperatura, humedad, luminosidad, fauna y flora circundantes afectan considerablemente el crecimiento de los animales, lo que exige tratamientos técnicos y prácticas productivas diferentes en condiciones distintas. Lo que implica que la tecnología y sobre todo los procesos productivos foráneos no sean los más adecuados para nuestras condiciones tropicales y tipos de suelos.

2. IMPORTANCIA DE LA TEMPERATURA EN EL SECTOR PECUARIO

El proceso de crianza de los animales dedicados a la explotación comercial se realiza en un galpón donde sus dimensiones dependen exclusivamente de las condiciones ambientales, que a su vez dan la pauta para determinar la cantidad de animales por mts². Su estructura puede ser metálica o en guadua con un techo de teja o zinc, las paredes son en malla para aves o muros en cemento para porcinos, internamente este se divide en zonas para los diferentes lotes o grupos de animales que tienen la misma edad. En cada zona el lote permanecerá desde los primeros días de vida hasta su edad adulta, por lo tanto cada zona debe garantizar las condiciones adecuadas que se requieran durante todo el proceso de cría. Estas condiciones consisten en tres factores a saber: una perfecta nutrición, controlar las condiciones ambientales y prevenir los agentes patógenos.

La nutrición de los animales explotados comercialmente depende del tipo de concentrado empleado. Existen concentrados de acuerdo a las necesidades nutricionales de cada tipo de animal y de su edad. Por ejemplo, en la avicultura se emplea un concentrado diferente para la iniciación, el engorde y la finalización de los pollos. Los fabricantes de estos alimentos, basados principalmente en soya y maíz, son Purina, Contengral, Soya, Cipa, Itacol entre otras. El estricto cuidado de las condiciones ambientales previene las enfermedades y ayuda a un rápido desarrollo físico de los animales. Las condiciones ambientales que deben ser controladas son la ventilación, la iluminación y la temperatura.

La ventilación dentro del galpón puede ser manual o automática, cuando la ventilación es manual o natural, en el caso de aves se controla por el manejo de cortinas que sube o baja un operario dependiendo de los niveles de humedad medidos dentro del galpón. Para el control automático de ventilación se emplean ventiladores al interior del galpón para forzar al aire a circular dentro de él (presión positiva) de manera que la humedad disminuya al ser renovado el aire o con la utilización de caballetes que permitan un adecuado recambio de gases. Cuando el galpón es cerrado, es decir, que las paredes son metálicas o de cualquier otro material se emplean extractores para crear un vacío dentro del galpón y así forzar a que el aire entre por medio de unos orificios ubicados en la parte superior de las paredes (presión negativa).

El control de la iluminación es dependiente de las necesidades de rápido engorde de los animales que requiera el productor y también de la zona climática en la cual

se realiza la explotación. Principalmente para que en periodos nocturnos, el animal consuma alimento extra o en las zonas costeras, cuando la temperatura es más fresca, se realice la alimentación de los animales y se obtenga una mejor conversión alimenticia. Esta se realiza especialmente con luz fluorescente y durante periodos diversos en la noche.

Sin embargo, el factor que más afecta el crecimiento y producción en la cría de animales es la temperatura, ya que esta es la que principalmente determina los mejores márgenes de conversión alimenticia de los animales en crecimiento. Por esto conviene conocer las condiciones óptimas de temperatura en cada etapa del crecimiento de los animales que garantizan los mejores márgenes de producción.

En la avicultura, la porcicultura y la cría de avestruces, las condiciones óptimas de temperatura para obtener un desarrollo normal y sano de los animales están dentro de un rango de 34°C para recién nacidos, disminuyendo en 2°C cada semana hasta llegar a la temperatura ambiente en la etapa adulta.

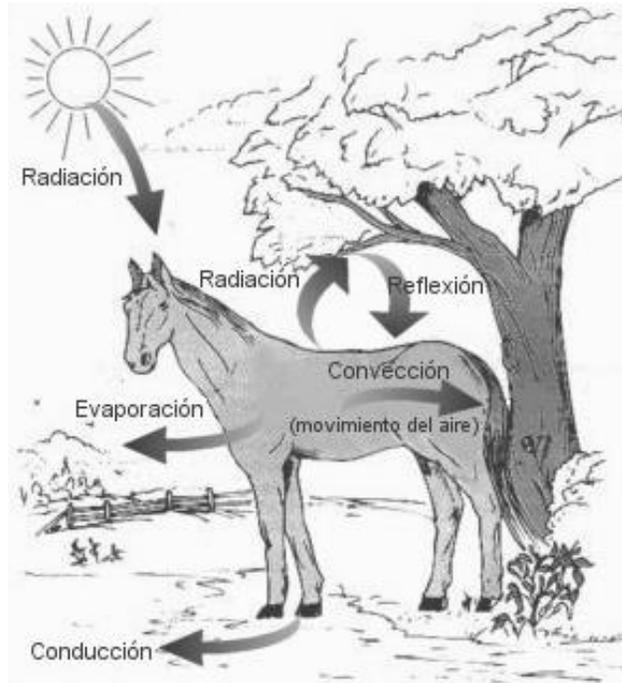
El efecto de la temperatura sobre el porcentaje de mortalidad varía de acuerdo a la edad del animal. Por ejemplo, los animales criados a una temperatura alta (32°C) durante la primera semana presentan una menor mortalidad que aquellos criados a una baja temperatura (20°C). En contraste, los animales mantenidos a una baja temperatura durante su etapa de producción presentan una menor mortalidad que aquellos criados a una temperatura mayor (28°C). Por otra parte animales cuya temperatura permanece constante las en las dos primeras semanas, su comportamiento productivo hasta el final del ciclo de producción va a ser el óptimo.

2.1 TRANSFERENCIA DE CALOR

Es el proceso por el que se intercambia energía en forma de calor entre distintos cuerpos, o entre distintas partes de un mismo cuerpo que están a diferente temperatura. Por ejemplo, por transferencia de calor, en un ambiente frío un animal experimenta un descenso de su temperatura corporal y se ve forzado a producir calor extra para mantener su temperatura a un nivel constante, por esta razón el animal ingiere mayor alimento, pero al necesitar más calorías que se usan en producir calor y no para ser convertidas en carne conllevará un retraso en su crecimiento³. La pérdida de calor hacia el ambiente externo se realiza mediante dos rutas o formas principales: transferencia de calor *evaporativo*, asociado con la pérdida de vapor de agua desde la superficie corporal y el sistema respiratorio y,

transferencia *no evaporativa* mediante convección, conducción, e intercambio termal por radiación (Figura 2).

Figura 2. Vías o formas por las que un animal puede ganar o perder calor.



Fuente: Echavarría y Miazzo, 2002

2.1.1 Convección. Esta dada por el flujo o la transferencia de calor mediante el movimiento del aire o de agua debido a la redistribución de moléculas dentro de un fluido. En los animales la transferencia de calor por convección ocurre entre la superficie externa del cuerpo y el aire que lo rodea. Su magnitud depende de dos factores: la diferencia de temperaturas entre la superficie del animal y el aire, y el aislamiento térmico provisto por la capa límite de aire alrededor del cuerpo⁴. Esta capa límite es alterada por las corrientes de aire, siendo afectada también por la naturaleza de la superficie (pelos, plumas, etc.). Bajo condiciones de viento el calor es removido por convección forzada en una magnitud que depende de la velocidad y dirección del viento. Sin viento o aire en calma, el movimiento del aire alrededor del cuerpo animal es consecuencia del movimiento ascendente natural del aire (el aire caliente asciende) y el calor se remueve, en una pequeña cantidad, por convección libre.

^{3,4} ECHEVARRÍA, Alberto I. y MIAZZO, Raúl. El ambiente en la producción animal [online]. Argentina: Facultad de Agronomía y Veterinaria, Universidad Nacional de Río Cuarto, 2002. Disponible en Internet: www.produccionbovina.com/informacion_tecnica/clima_y_ambientacion/01-el_ambiente_en_la_produccion_animal.htm.

Por otra parte, este incremento de las pérdidas de calor por convección, como consecuencia de las corrientes de aire, es uno de los medios eficaces para luchar contra las temperaturas muy elevadas. Los cambios en las corrientes o velocidad del aire son proporcionalmente más efectivos a bajas velocidades que cambios similares a velocidades altas, probablemente como resultado de la ruptura de la capa límite de aire que ocurre a bajas velocidades. Por esta razón las corrientes de aire frío a bajas velocidades son perjudiciales en condiciones de confinamiento, especialmente para las categorías de animales pequeños o recién nacidos (lechones, pollitos, etc.) porque aumentan mucho las pérdidas de calor, lo que puede tener consecuencias en el crecimiento y el estado de salud de estos animales. En cerdos en crecimiento bajo confinamiento, las corrientes de aire en invierno pueden afectar la eficiencia de conversión del alimento al incrementar las pérdidas de calor en los alojamientos. En la práctica estas corrientes de aire tienen a menudo una temperatura más baja que el aire de los corrales, aumentando por esta causa adicionalmente la pérdida de calor⁵.

2.1.2 Conducción. Es el flujo o transferencia de calor entre un animal y cualquier superficie, particularmente el piso, con la que esté en contacto. Las moléculas más calientes imparten energía cinética a las moléculas más frías mediante contacto directo. Los animales que permanecen de pie pierden pequeñas cantidades de calor por conducción debido a que el área de contacto con el piso es muy pequeña. Sin embargo la pérdida de calor conductivo puede ser significativa para un animal echado, cuando el piso está constituido por materiales que sean relativamente buenos conductores (concreto, latas de hierro perforadas, alambre tejido) que son usadas, por ejemplo, en los sistemas de confinamiento en cerdos y jaulas para aves. Un cerdo echado sobre un piso frío de listones de concreto pierde calor por conducción hacia los listones. Por lo contrario un animal echado sobre un piso calentado por tuberías de agua caliente o losa radiante ganará calor por conducción. Este último es el caso del uso de las alfombras eléctricas que se usan frecuentemente para los lechones, en las maternidades porcinas bajo confinamiento. El efecto positivo de la cama de paja o viruta de madera que se utiliza en diferentes especies y circunstancias, se debe en gran parte al efecto aislante que disminuye la pérdida de calor por conducción, creando una especie de microclima, que disminuye también la pérdida de calor por convección. Para el caso de un piso frío, el flujo de calor desde el animal es una función del área de contacto, del gradiente de temperatura, de la conductividad térmica y de la capacidad calorífica del material del piso⁶.

^{5,6}Ibid., disponible en Internet: www.produccionbovina.com/informacion_tecnica/clima_y_ambientacion/01-el_ambiente_en_la_produccion_animal.htm

2.1.3 Radiación. Es el intercambio de calor entre dos objetos que no están en contacto. El calor fluye desde el objeto mas caliente al mas frío⁷. Por ejemplo un ternero parado al sol, en un día claro de invierno, recibe calor solar mediante radiación.

La energía radiante se mueve en el espacio por medio de ondas electromagnéticas que se propagan en línea recta. Se transforma en energía térmica al entrar en contacto con el animal. De esta forma un animal puede percibir calor en un día luminoso de invierno, especialmente si se encuentra en un lugar protegido del viento. Bajo confinamiento un animal puede perder calor por radiación, cuando las temperaturas de las paredes y del techo sean mas bajas que la temperatura del animal. Sin embargo, un techo con pobre aislamiento térmico, en verano, puede resultar en una ganancia significativa de calor radiante sobre el lomo de los animales⁸.

A bajas velocidades del aire, típico del ambiente de los edificios de confinamiento (y de nuestras viviendas), la tasa de pérdida de calor por intercambio de radiación es tan importante como la convección, especialmente para grandes animales. El aislamiento, provisto por la capa limite de aire alrededor del cuerpo, decrece con el incremento de la velocidad del aire, como también lo hace el aislamiento de la capa externa, incrementando la proporción de la perdida de calor no-evaporativo debida a la convección. Consecuentemente la convección es dominante a altas velocidades del viento y a eso se debe la ventaja ambiental que proporcionan las barreras para viento. Por el contrario las velocidades del aire deben ser bajas, para que el calentamiento infrarrojo sea efectivo. Este es el caso del uso de lámparas infrarrojas en animales recién nacidos en confinamiento, donde debe cuidarse especialmente la ausencia de corrientes de aire por convección⁹.

Cualquier cuerpo que esté a una temperatura superior al cero absoluto (- 273° C ó 0° K) emite energía en forma de radiación. La mayoría de las superficies naturales, incluyendo la “capa” externa de los animales, se comportan como “cuerpos negros”, siendo emisores de radiación¹⁰.

^{7,8,9,10}Ibid., disponible en Internet: www.produccionbovina.com/informacion_tecnica/clima_y_ambien_tacion/01-el_ambiente_en_la_produccion_animal.htm

El intercambio de calor por radiación entre un animal y su ambiente se realiza de acuerdo a la ley de Stefan - Boltzmann, que establece que la radiación de un cuerpo negro es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta superficial (T^4 , en grados Kelvin). Por lo tanto, el intercambio radiante neto entre dos cuerpos negros es proporcional a la diferencia entre las cuartas potencias de sus temperaturas superficiales (en °K).

$$W = e\sigma AT^4$$

Donde W : radiación del cuerpo negro.

e : emisividad del cuerpo entre $0 \leq e \leq 1$. Es igual a 1 en el caso del cuerpo negro.

σ : $5.67 * 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$, constante de Stefan – Boltzmann.

A : Área de la superficie.

T : Temperatura.

Las superficies de los animales tiene una emisividad igual o mayor a 0,95, lo que implica que ellos son “negros” en un 95 % o más, independientemente de su aparente color visible. Esto no se aplica en las partes del espectro de onda corta y visible, donde por ejemplo un cerdo blanco refleja más energía incidente que un cerdo de color negro. En condiciones de confinamiento, sin embargo, es la parte infrarroja del espectro la que realmente importa. Por ejemplo en una mañana de invierno, la perdida de calor por radiación es muy grande en lechones pequeños, en un confinamiento con techo de lata sin aislamiento térmico. La diferencia de temperatura entre la superficie corporal de los lechones y el techo será elevada y de acuerdo a lo explicado anteriormente el intercambio (perdida en este caso) de calor radiante entre los lechones y la superficie interna del techo será proporcional a sus diferencias de temperaturas a la cuarta potencia. Si se duplica la diferencia de temperatura (Por ejemplo al bajar la temperatura del techo de 19 °C a 0 °C, en ambos casos con una temperatura superficial aproximada de los lechones de 38 °C), la pérdida de calor por radiación aumentará aproximadamente 16 veces.

2.1.4 Pérdidas de calor por evaporación. El calor latente de vaporización del agua es alto, alrededor de 2400 J / g o 0.58 Kcal. / g de agua evaporada. El pasaje de agua del estado líquido a vapor, por ejemplo en la superficie del animal por transpiración implica un intercambio de calor. Por cada gramo de agua evaporada se transfieren 0.58 Kcal, que quedan en el aire que rodea al animal como calor latente de vaporización. El calor es tomado de la superficie del animal, resultando en un enfriamiento de su masa corporal. Es el mismo principio físico

por el que se enfría el líquido, por ejemplo agua, contenido en un recipiente envuelto con una bolsa de estopa (hilaza) saturada de agua expuesto al viento¹¹.

A medida que la temperatura ambiental se aproxima a la temperatura corporal del animal las pérdidas de calor *no evaporativo* (Radiación, conducción y convección) se vuelven muy pequeñas, debiendo el animal disipar calor por medio de la evaporación. La cantidad de calor perdido depende de la magnitud de la evaporación, que a su vez es influenciada por la temperatura de la piel y por la velocidad, temperatura y humedad relativa del aire. Cuando la humedad relativa es muy alta, cercana por ejemplo al 100%, la pérdida de calor evaporativo se compromete severamente. La humedad relativa se define como la proporción o cantidad de vapor de agua que contiene el aire, a esa temperatura, respecto al máximo (saturación) que podría contener a esa misma temperatura. Mientras mayor sea la temperatura del aire, mayor será su capacidad para contener vapor de agua¹².

Cuando las temperaturas ambientales son mayores que la temperatura corporal de los animales, la evaporación es la única forma de pérdida de calor, constituyéndose en un mecanismo esencial para el mantenimiento de la homeotermia. La habilidad para transpirar y perder calor por evaporación varía con las diferentes especies animales. También se pierde calor por evaporación de humedad desde los pulmones y el tracto respiratorio. El aumento de la frecuencia respiratoria como respuesta a las elevadas temperaturas, propia de algunas especies, tiene por finalidad aumentar la pérdida de calor evaporativo. Algunas especies responden al calor por jadeo, incrementando así la pérdida de vapor de agua desde el sistema respiratorio, mientras que otras tienen las capacidades variables para transpirar, como respuesta al calor, de forma que la consecuente evaporación toma calor desde la superficie de la piel. También hay especies que jadean y transpiran¹³.

Un aspecto importante a considerar es que, en condiciones de confinamiento, el calor perdido por los animales por evaporación no contribuye al calentamiento del alojamiento. El calor disipado queda en el ambiente como calor latente de vaporización. Incluso en condiciones de confinamiento, en climas con humedad relativa de media a baja, se utilizan paneles de enfriamiento evaporativo (como

^{11,12,13} Ibid., disponible en Internet: www.produccionbovina.com/informacion_tecnica/clima_y_ambien_tacion/01-el_ambiente_en_la_produccion_animal.htm

una ventana, pero cubierta con una especie de filtro de papel de celulosa), por donde circula agua y por donde entra al alojamiento, en forma forzada, parte del aire de ventilación. De esta forma el aire externo caliente y con baja cantidad de vapor de agua, al pasar por el panel, provoca la evaporación del agua, perdiendo calor (enfriándose), a la vez que aumenta su contenido de vapor de agua¹⁴.

En cambio el calor no evaporativo (radiación, conducción y convección) disipado hacia el ambiente, contribuye positivamente para elevar la temperatura del alojamiento. Por este motivo las pérdidas de calor no evaporativas se denominan también calor sensible o calor perceptible. El acondicionamiento ambiental de los sistemas de confinamiento, en los climas templados a templado – fríos, trata en realidad de hacer uso de este calor no evaporativo, para regular la temperatura interna de los alojamientos mediante el control de la ventilación, evitando en lo posible el uso de calor o energía de una fuente externa¹⁵.

^{14,15}Ibid., disponible en Internet: www.produccionbovina.com/informacion_tecnica/clima_y_ambientacion/01-el_ambiente_en_la_produccion_animal.htm

3. AUTOMATIZACIÓN PECUARIA

Los procesos de automatización en el sector pecuario, aumentan significativamente la eficiencia y la productividad al reducir costos en la mano de obra requerida para trabajar en las labores cotidianas y repetitivas de la granja, mejora la eficiencia y la precisión de la recolección de información acerca de los procesos que involucra la cría y desarrollo de los animales hasta su etapa final. Al contar con toda esta información se hace mas rápido y eficiente la toma de decisiones de una manera mas acertada respecto a los inconvenientes que se presenten.

En la actualidad son muchas las empresas a nivel internacional dedicadas a la fabricación de maquinaria y equipo, para la automatización del sector pecuario en todas las fases de producción, desde el nacimiento hasta el procesamiento. La gran mayoría de esta tecnología no es generada en el país, se debe importar de otros países a un alto costo, la mayoría de las veces sin un buen soporte técnico por no tener distribuidores oficiales dentro del país. Adicionalmente, en la gran mayoría de los casos, se deben adaptar los equipos a las condiciones ambientales de cada región porque difieren de las condiciones particulares de las regiones donde fueron construidos. A continuación se realizara una descripción de algunos equipos e instrumentos disponibles en el mercado para la automatización del sector pecuario.

3.1 EQUIPOS DISPONIBLES EN EL MERCADO

Algunos de los equipos que se encuentran en el mercado de los Estados Unidos para la avicultura y la porcicultura, y por lo tanto son distribuidos en Latinoamérica, son fabricados por Hired-Hand empresa norteamericana y poseen las siguientes características.

3.1.1 Controlador **FARM HAND VENT MASTER** de 24 etapas (zonas dentro de un galpón). El **Vent Master** 24 es el primero de un grupo nuevo de sistemas de control de Hired-Hand. La característica común entre estos sistemas de control será que a éstos se le podrán agregar otros sistemas. Esto permite al usuario comprar las piezas del sistema de control que una determinada área necesita y agregar otras en el futuro¹⁶.

¹⁶ Hired Hand. Disponible en Internet: www.hired-hand.com.

El beneficio de tal sistema de control es la posibilidad de expansión que le permite al usuario tener la seguridad de que siempre podrá actualizar su sistema a medida que la tecnología avanza, de esta manera, el productor no necesitará comprar un sistema de control nuevo¹⁷.

Las características generales son: controla calefacción, refrigeración y ventilación. Lectura en grados Fahrenheit o Celsius. Temperatura ajustable. Tiene 3 sensores para la calefacción y refrigeración de zona compatible con computadora. Permite al usuario comprar las piezas del sistema de control que una determinada área necesita y agregar otras en el futuro. Interfaz fácil de usar (Figura 3)¹⁸.

Figura 3. **FARM HAND VENT MASTER.**



Fuente: Hired Hand.

3.1.2 Controlador ambiental **FARM HAND MASTER** de 8 y 12 etapas. Fueron diseñados teniendo en cuenta tres cosas: simpleza, flexibilidad y fiabilidad. El rendimiento y fiabilidad superiores del **Stage Master** ha hecho que este conjunto de controladores se convierta en la norma de automatización de galpones de confinamiento. El **Stage Master** funciona de la misma manera que un controlador más complejo, pero su regulación es tan sencilla como la de un termostato. El controlador tiene una flexibilidad intrínseca con todas sus características totalmente programables. Los menús confusos son reemplazados por un despliegue de indicador de etapas del **Stage Master**. Cada etapa tiene su propio indicador de manera que todas las posiciones están visibles¹⁹.

^{17,18,19} Ibid., disponible en Internet: www.hired-hand.com.

Las características generales de este sistema son: controla calefacción, refrigeración y ventilación. Lectura en grados Fahrenheit o Celsius. Compatible con una computadora personal. Totalmente programable. Tres sensores. Maneja cargas de 12 Amp en etapas. Marcador de tiempo frío (Figura 4)²⁰.

Figura 4. **FARM HAND MASTER**



Fuente: Hired Hand.

3.1.3 Controlador **FARM HAND POWER VENT**. Es un control de presión estática electrónico diseñado con fiabilidad inigualable. El Farm **Hand Power Vent** puede hacer funcionar uno o dos **PowerTraks**. Los **PowerTraks** cierra o abre las cortinas de entrada o los conductos permitiendo que el productor mantenga presiones estáticas exactas. Esto crea un ambiente más sano para mayor producción. El **ramping** de presión le permite a los productores elegir la presión estática óptima a ciertos puntos de temperatura externa. El **Farm Hand Power Vent** automáticamente regula la presión estática. Esto permite al usuario fijar el controlador una sola vez y estar preparado para todas las estaciones, especialmente para las temperaturas extremas del día y la noche²¹.

Las características generales de este sistema son: control de presión estática electrónico, compatible con una computadora personal y lectura en grados Fahrenheit o Celsius (Figura 5)²².

^{20, 21, 22} Ibid., disponible en Internet: www.hired-hand.com.

Figura 5. FARM HAND POWER VENT



Fuente: Hired Hand.

3.1.4. Conmutador de luces manual. El Conmutador de Luces Manual 5K **Farm Hand** le permite el control para todo el galpón. Con sus dos circuitos totalmente aislados, es como tener hasta dos conmutadores de luz de 2500 watts en una sola caja. El dial graduado hace que las posiciones de los niveles de luces sean consistentes. Su tamaño compacto permite que la instalación pueda realizarse en casi cualquier ubicación²².

Las características generales de este sistema son: capacidad de 5000 watts 2 circuitos de 2500 watts con entradas y salidas aisladas. Una llave de control por separado de encendido/ apagado para cada circuito (Figura 6)²³.

Figura 6. Conmutador de luces manual.



Fuente: Hired Hand.

^{22,22} Ibid., disponible en Internet: www.hired-hand.com.

3.1.5 Controlador de cortina **powertack**. Fue diseñado hace muchos años para automatizar el proceso de ventilación natural en los galpones avícolas o de cerdos. Es totalmente electro-mecánico lo cual lo hace fácil de usar y de mantener. El circuito básico está aún intacto y consiste de un marcador de tiempo de cinco minutos, relés de salida y llaves manuales de anulación. El marcador de tiempo de cinco minutos le permite al usuario fijar los tiempos de funcionamiento del **PowerTrak** para los ciclos de abertura y cierre. Los relés de salida hacen interfaz con dos **PowerTraks** para que puedan controlar su movimiento²⁴.

Las características generales de estos sistemas son: automatiza el proceso de ventilación natural en los galpones avícolas o de cerdos. Puede usarse con termostatos simples. Tiene llaves de anulación. Tiene un tiempo de 5 minutos con tiempos de funcionamiento ajustables para los ciclos de abertura y cerrado (Figura 7)²⁵.

Figura 7. Controlador de cortina **powertack**.



Fuente: Hired Hand.

3.1.6 Refrigeración Evaporativa Polar-Cool. Es una unidad de refrigeración evaporativa portable que otorga una refrigeración en el lugar con usos múltiples que normalmente resultarían costosos o ineficientes para enfriar con aire refrigerante. Todas las unidades se caracterizan por tener estructuras de acero inoxidable, bombas de uso industrial y paneles duraderos (Figura 8)²⁶.

^{24, 25, 26} Ibid., disponible en Internet: www.hired-hand.com.

El funcionamiento es simple: conectar a un suministro de agua, enchufar a un tomacorriente, dirigir el ventilador al área deseada y encender la unidad. En sólo unos minutos el aire frío producido ayudará a elevar el nivel de confort de las estructuras avícolas o de ganado ²⁷.

Figura 8. Refrigeración Evaporativa Polar-Cool.



Fuente: Hired Hand.

3.1.7 Calefactor de montaje externo. Este sistema brinda soluciones eficientes y confiables a las necesidades ambientales de los galpones agrícolas de confinamiento en todo el mundo. Así mismo, son construidos para alcanzar los requisitos rígidos de las necesidades específicas de la industria avícola y ganadera²⁸.

Las características generales de este sistema son: arnés de cableado de rápida desconexión para un servicio fácil; contactos bañados en oro previenen la corrosión. Luz diagnóstica para la fácil detección de problemas. Ignición instantánea de superficie caliente electrónica. 120.000-225.000 BTU, LP o gas natural. Recinto de aluminio de alta temperatura y recinto de calefactor. Llave de seguridad de refuerzo (Figura 9)²⁹.

^{27, 28, 29} Ibid., disponible en Internet: www.hired-hand.com.

Figura 9. Calefactor de montaje externo.



Fuente: Hired Hand.

3.1.8 Criadora infrarroja **super glo**. Este sistema brinda una consistente ignición inmediata sin necesitar tiempo de precalentamiento. Este quemador de hierro fundido de alta resistencia es el quemador de puerto abierto más confiable³⁰.

Las características generales son: piloto fácil de limpiar o ignición de superficie caliente 42.000 BTUs. Consistencia en el rendimiento. Economía en el consumo de combustible. Fácil de montar, instalar y mantener. Distribución perfeccionada de temperatura a nivel del ave. Control individual o por zona (Figura 10)³¹.

Figura 10. Criadora infrarroja super glo.



Fuente: Hired Hand.

^{30,31} Ibid., disponible en Internet: www.hired-hand.com.

3.1.9 Criadora **bunsen jet**. La criadora electrónicamente encendible es pionera en el mercado avícola y líder por su alta eficiencia³².

Las características generales de este sistema son: el encendido HSI hace que esta criadora sea conveniente y confiable. Diseño de suspensión de soporte único para fácil montaje. Componentes electrónicos previamente montados y totalmente cerrados. Control de zona compatible. Aprobado para la limpieza. Tubos rígidos de gas previamente doblados. Disponible en 32,000 y 42,000 BTUs. 120/240 VAC 50/60 Hz. Disponible para instalaciones de alta altitud (Figura 11)³³.

Figura 11. Criadora BUNSEN JET.



Fuente: Hired Hand.

Otras empresas dedicadas a la fabricación de equipos para el sector pecuario son: Lubing, Valco, Avitech, Chore – Time, Alke, Breuil, Store Gamco Inc, Halperin, Cansen, Indiv, Coolair, Ziggity Systems Inc, entre otras. La gran mayoría de estas empresas son norteamericanas, otras europeas y la argentina Halperin que se especializa en el montaje de galpones.

Estos solo son algunos productos de toda una variedad de equipos que nos ofrece el mercado extranjero para la crianza de aves y porcinos, conducentes en lograr incrementar sustancialmente la producción a nivel de carnes. Tecnología de la cual carecemos en nuestro país y que sólo se emplea por parte algunos grandes productores del sector pecuario, tales como Macpollo, pero que aun así no tienen todos sus galpones automatizados, debido al alto costo de los equipos y de la instalación.

^{32,33} Ibid., disponible en Internet: www.hired-hand.com.

4. SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA POR BUS DE CAMPO

En el capítulo precedente se proporcionó un panorama general de los diversos equipos empleados en la automatización del sector pecuario. Los instrumentos se especializan desde la medición de variables como presión, humedad, luminosidad y temperatura, hasta equipos especializados en el control de la ventilación y temperatura, sin embargo de acuerdo al análisis realizado en el capítulo 2 la variable de control determinante en un sistema de control automatizado para el sector pecuario es la temperatura.

La necesidad de un control automático de temperatura para mejorar las condiciones ambientales de cría de los animales y aligerar la carga en las operaciones manuales, es una necesidad latente de los productores del sector pecuario, que conllevaría mejorar y aumentar los niveles de producción, reducir costos y poder ser competitivos en el mercado actual.

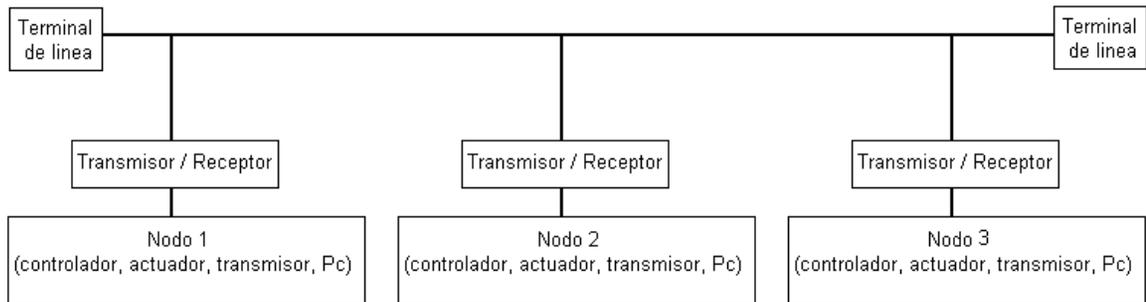
El control de la temperatura, dependiendo de las dimensiones físicas del galpón, involucra distribuir por todo el edificio instrumentos tales como transmisores de temperatura, actuadores como criadoras a gas conectados a controladores de temperatura. Estos a su vez deben estar comunicados con un sistema supervisorio y toda esta comunicación debe realizarse en línea y en forma eficiente, por lo que se hace necesario incluir alta tecnología en los equipos e instrumentos de control. Para resolver el problema de la comunicación entre estos dispositivos, nace la necesidad de implementar una red de bus de campo.

A nivel industrial encontramos equipos con conexión en una red de bus de campo como los fabricados por la compañía Hired Hand, que poseen una red propietaria HH.Net (**Hired Hand Network**) donde se conectan los diferentes dispositivos (actuadores y transmisores) a su respectivo controlador para el control de las diferentes variables involucradas en el proceso de cría como temperatura, humedad, luminosidad, sistemas de bebedero y comederos automáticos y en algunos casos el manejo de cortina dentro del galpón.

El esquema de una red de bus de campo se muestra en la figura 12. Los nodos de la red son dispositivos como transmisores, actuadores, controladores y computadores, que acceden al medio de transmisión a través de un módulo de funcionamiento dual, denominado **driver** cuando transmite información desde el

dispositivo a la red o llamado **receptor** cuando se realiza la recepción de la información de la red hacia el dispositivo.

Figura 12. Esquema de una red de bus de campo.

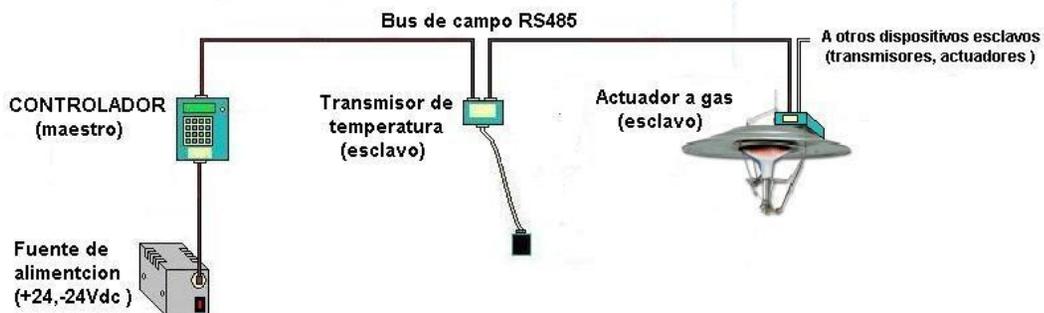


Un sistema de control de temperatura por red de bus de campo brinda la capacidad de agregar tantos dispositivos como se requieran en el galpón. Esto permite al usuario adicionar las piezas del sistema de control que una determinada área necesita y añadir otras en el futuro manejadas por un mismo controlador, así mismo el sistema ofrece al productor la seguridad de actualizarlo a medida que la tecnología avanza al poder reemplazar las piezas o módulos que lo componen, de manera que el productor no necesitara adquirir un sistema de control nuevo.

Los principales elementos que componen el sistema de control (figura 13) son:

- Bus de campo
- Controlador de temperatura
- Trasmisor de temperatura
- Criadoras a gas(Actuadores)

Figura 13. Descripción del sistema de control por bus de campo.



4.1 BUS DE CAMPO

En general, una red de bus de campo es un sistema de dispositivos de campo (transmisores y actuadores) y dispositivos de control que comparten un mismo medio de transmisión, para intercambiar información entre ellos. Reemplaza la comunicación analógica clásica de 4- 20 ma por la digital, permitiendo desarrollar un protocolo inteligente que permita implementar sofisticadas funciones distribuidas dentro de los mismos transmisores y actuadores.

El bus de campo tiene como ventajas la economía del cableado, programación de los dispositivos en línea conectados al bus, transmisión y recepción de información sobre diagnósticos, optimización del tiempo en los procesos de control (al distribuir procesamiento a otros dispositivos, si un dispositivo falla no compromete al resto del sistema), lo cual permite implementar sistemas de control mas eficientes y de menor costo, en comparación con los tradicionales dispositivos de control centralizados (PCs o PLCs), ya que los dispositivos de la red no precisan tanta capacidad de procesamiento y de memoria, lo cual permite dedicar los PCs a otras tareas como supervisión, gerenciamiento del sistema y generación de reportes, informes, etc.

La red de bus de campo que se implemento en el presente trabajo se concentra principalmente en los dos primeros niveles de la ISO/OSI (**Internacional Standards Organization / Open System Interconnet**). El primer nivel define la interconexión física de los dispositivos, en este nivel se eligió una red RS 485 debido al uso de un simple cable de par trenzado, el bajo costo y la fácil adquisición, que puede ser mallado o no según el entorno de operación y el uso de conectores industriales estándar (RJ45). El segundo nivel del modelo de referencia OSI define el control de acceso al bus de los diferentes dispositivos y como debe ser pasados y ejecutados los mensajes entre los mismos. En este nivel se implemento la técnica de maestro – esclavo en la cual sólo el maestro puede iniciar las transacciones hacia los esclavos para el acceso al bus, para la comunicación entre los dispositivos se utilizo el protocolo MODBUS por su simplicidad y especificación abierta.

4.2 NIVEL FÍSICO

El estándar RS-485 (EIA/TIA 485) fue desarrollado en conjunto por dos grandes asociaciones de compañías de los estados unidos: la EIA (Electronic Industries Association) y la TIA (Telecommunications Industry Association). El prefijo del estándar, las letras RS, significan por sus palabras en ingles “estándar recomendado”. Sin embargo, hoy en día varias extensiones del RS-485 se

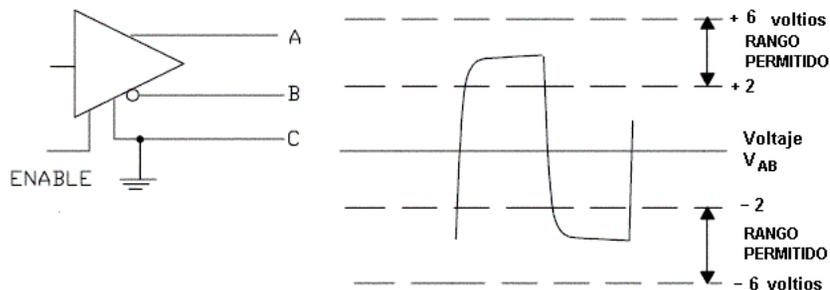
acomodan a una gran variedad de aplicaciones. El RS-485 especifica una transmisión de datos half duplex bidireccional, y constituye el estándar de la EIA/TIA que permite configuraciones de múltiples receptores y transmisores, hasta un máximo de 32 a una distancia de 1200 mts, en un mismo bus.

4.2.1 Características Eléctricas

En el EIA/TIA 485 se determina la transmisión de datos por balanceo de líneas o modo diferencial. En este sistema un modulo denominado **driver** o generador trasmite una señal de voltaje por medio de dos conductores sobre los cuales se establecen dos niveles de voltaje, la señal del primero es el complemento del segundo. El voltaje generado va de 2 a 6 voltios entre los terminales de salida A y B (Figura 14), además estos deben compartir una misma conexión a tierra (C), con el fin de proveer de un retorno para el ruido inducido en modo común en los cables de transmisión. La conexión de tierra (C) no es utilizada para determinar el estado lógico de la línea, pero la ausencia de ella tiene como consecuencia la radiación de altos niveles de EMI (interferencia electromagnética), porque las corrientes de retorno en modo común tendrán un camino de regreso a la fuente de donde fueron generadas. Al proporcionar una tierra se provee de un camino de baja impedancia para la reducción de estas emisiones.

El estándar RS 485 determina que el modulo **driver** debe tener una señal de entrada llamada **Enable**, cuyo propósito es conectar el **driver** a los terminales de salida A y B. Si esta señal esta deshabilitada, se considera que el **driver** esta desconectado de la línea de transmisión entrando en alta impedancia.

Figura 14. Balanceo diferencial de líneas.



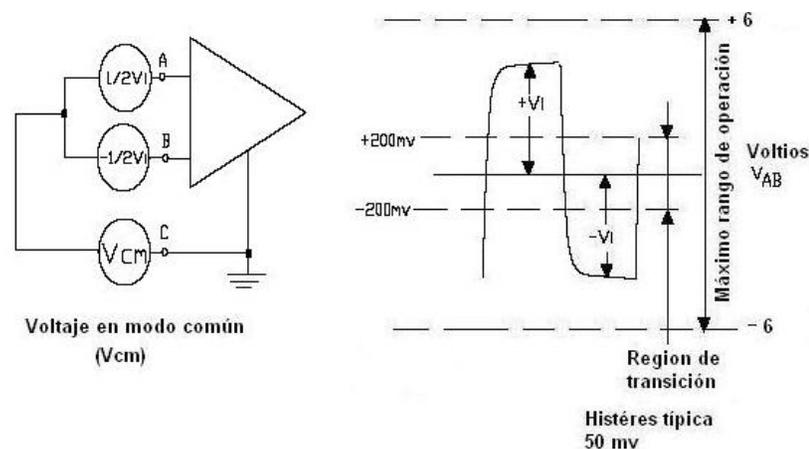
Fuente: B&B Electronics, 1997.

En el EIA/TIA 485 también se determina que la recepción de datos se realiza por balanceo de líneas o modo diferencial. En esta un modulo denominado receptor sensa el voltaje de las líneas de transmisión a través de los terminales A y B. Al igual que el driver debe tener una conexión a tierra (C) necesaria para una apropiada conexión (figura 15). Si la entrada de voltaje diferencial V_{AB} es mayor que +200mV el receptor tiene un estado lógico específico en su terminal de salida, si el voltaje al contrario es menor que -200mV el receptor tiene un estado lógico contrario al anterior en su terminal de salida. Estos estados se definen de la siguiente manera: cuando el Terminal A es negativo con respecto al Terminal B, la línea esta en el estado binario "1", cuando el Terminal A es positivo con respecto al Terminal B, la línea esta en el estado binario "0". El rango de 200mV a 6V es requerido para tener en cuenta la atenuación presente en las líneas de transmisión hasta una distancia máxima de 1200 mts.

El estándar RS 485 determina la manipulación de voltajes en modo común (V_{cm}) en un rango de + 12 a - 7 voltios. El voltaje en modo común se define como el voltaje promedio entre terminales A y B con respecto a tierra (figura 15).

$$\left(\frac{V_A + V_B}{2} \right)$$

Figura 15. Balanceo diferencial de línea a la entrada del receptor.

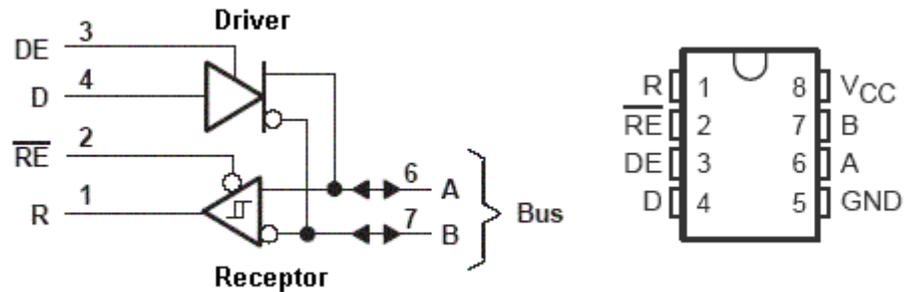


Fuente: B&B Electronics, 1997.

Los módulos, citados en párrafos anteriores, **driver** y receptor vienen encapsulados en un circuito integrado llamado **Transceiver** (transmisor - receptor). Este se encarga de la comunicación bidireccional de datos en las líneas de transmisión del bus. El dispositivo transceiver utilizado en el presente trabajo es

el SN75176B de la Texas Instruments, su configuración interna se muestra en la figura 16.

Figura 16. Transceiver SN75176B



Fuente: Texas Instruments.

El transceiver tiene dos entradas de habilitación en los pines 2 y 3 las cuales permiten activar su operación como driver o receptor. La entrada DE (**Enable Driver**), cuando esta en alto, conecta el **Driver** a los terminales A y B, si esta entrada se encuentra en bajo los terminales de A y B se encuentran en alta impedancia (ver figura 17). La entrada RE (**Enable Receptor**), cuando se encuentra en bajo, conecta el receptor a los terminales A y B, si esta entrada se encuentra en alto la salida del receptor R estará en alta impedancia (ver figura 16).

Figura 17. Tablas de función.

DRIVER			
INPUT D	ENABLE DE	OUTPUTS	
		A	B
H	H	H	L
L	H	L	H
X	L	Z	Z

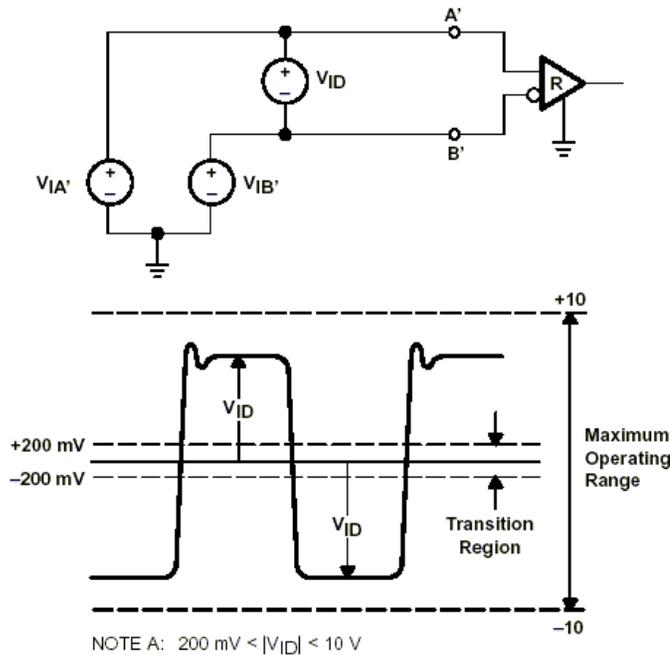
RECEIVER		
DIFFERENTIAL INPUTS A-B	ENABLE \overline{RE}	OUTPUT R
$V_{ID} \geq 0.2V$	L	H
$-0.2V < V_{ID} < 0.2V$	L	?
$V_{ID} \leq -0.2V$	L	L
X	H	Z
Open	L	?

H = high level, L = low level, ? = indeterminate,
X = irrelevant, Z = high impedance (off)

Fuente: Texas Instruments.

Para probar la sensibilidad de entrada al receptor se utiliza el circuito de prueba de la figura 18. Este circuito permite fácilmente medir todos los voltajes referidos a tierra ($V_{IA'}$ y $V_{IB'}$), diferencial (V_{ID}) y en modo común (V_{CM}). El resultado de esta prueba esta dado en la figura 18.

Figura 18., Circuito de prueba para la sensibilidad de entrada y forma de onda resultante.



Fuente: Soltero, Zhang, and Cockrill, 2002.

Para un voltaje en modo común variando entre + 12 y -7, el voltaje de entrada diferencial, V_{ID} , no debe estar dentro del rango de $\pm 200\text{mV}$ para asumir correctamente un estado lógico (figura 19). Como es especificado en el estándar, la magnitud del voltaje diferencial de entrada (V_{ID}) debe estar entre 200 mV y 10 V, para una correcta operación.

Cuando se diseña una red RS 485 (Figura 20) se presentan casos donde es esencial utilizar terminaciones en el cable. Esta terminación es utilizada para acoplar la impedancia de un nodo con la impedancia de la línea de transmisión. Cuando las impedancias son diferentes, la señal transmitida no es completamente absorbida por la carga y una porción es reflejada hacia atrás. Si las impedancias tanto de la fuente (transmisor) como de la línea de transmisión y de la carga son iguales la reflexión es eliminada.

Figura 19. Sensibilidad de entrada y voltaje resultante de dispositivos 485.

APPLIED VOLTAGE		RESULTING V_{ID}	RESULTING V_{CM}	RECEIVER OUTPUT STATE	PURPOSE OF MEASUREMENT
$V_{IA'}$	$V_{IB'}$				
-7 V	-6.8 V	-200 mV	-6.9 V	Q	Minimum V_I at extreme $-V_{CM}$
+12 V	+11.8 V	+200 mV	+11.9 V	Q	Minimum V_I at extreme $+V_{CM}$
-7 V	-2 V	-5 V	-4.5 V	\overline{Q}	Maximum V_I at extreme $-V_{CM}$
+12 V	+7 V	+5 V	+9.5 V	Q	Maximum V_I at extreme $+V_{CM}$

NOTES: 1. $|V_{IA'}| < 10$ V, $|V_{IB'}| < 10$ V (maximum input voltages to ensure correct operation)
 2. $|V_{ID}| < 12$ V (maximum input differential voltage without damaging device)
 3. V_{CM} is measured as the arithmetic average of $V_{IA'}$ and $V_{IB'}$, or $(V_{IA'} + V_{IB'})/2$.

Fuente: Soltero, Zhang, and Cockrill, 2002.

La utilización o no de estos terminales esta basado por la longitud del cable y la velocidad de transmisión de los datos. Una regla de diseño es tener en cuenta que si el retardo de propagación de la línea de datos es menor que el ancho de un bit, la terminación no es necesaria. Cuando se utiliza el modulo UART de un microcontrolador, este realiza un muestreo de los datos en la mitad del ancho de un bit, por esto es importante que el nivel de la señal sea fuerte en ese punto. Para calcular el retardo de propagación de la señal se debe multiplicar la longitud del cable por su velocidad de propagación, este valor es típicamente del 66 al 75% de la velocidad de la luz (especificado por el fabricante del cable).

Por ejemplo para un cubrimiento de la señal en una longitud de 1,2 kilómetros de cable, utilizando una velocidad del propagación de 0.66 (características del cable) x C (velocidad de la luz) un viaje es completado en aproximadamente:

$$t = \frac{\text{longitud}}{\text{velocidad}} = \frac{1.2\text{km}}{300000\text{km/s}} = 6.2\mu\text{s}$$

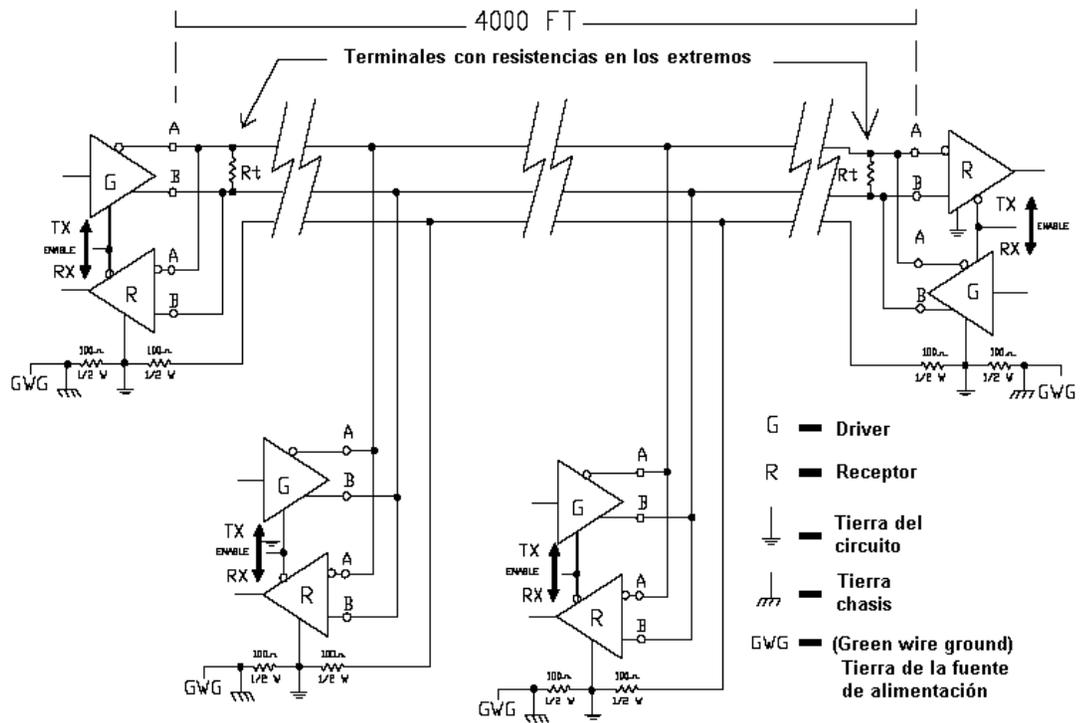
Si se asume que las reflexiones se amortiguan alrededor de tres viajes a lo largo de la longitud del cable, la señal se estabilizará en:

$$t_{\text{estabilización}} = 3 \times t = 3 \times 6.2\mu\text{s} = 18.6\mu\text{s}, \text{ después del primer flanco del bit.}$$

A 9600 baudios el ancho de un bit es:

$$\frac{1s}{9600 \text{ bits/s}} = 104 \mu s$$

Figura 20. Red típica RS485 comunicación por dos cables.

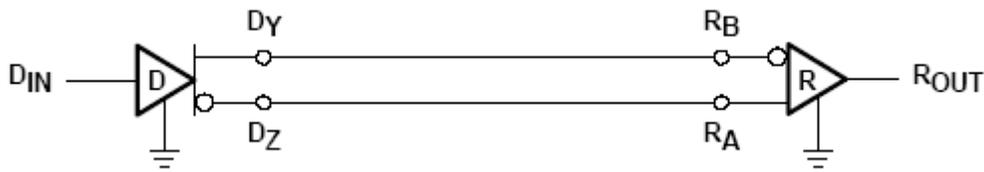


Fuente: B&B Electronics, 1997.

Las reflexiones son amortiguadas en un tiempo menor al tiempo de muestreo, por lo tanto un terminal no es necesario. La figura 21 muestra una configuración sin terminación en la línea de datos.

4.2.2 Terminaciones de línea. Para aplicaciones donde se requiere alta confiabilidad del sistema es esencial el uso de los terminales en el cable. Existen diferentes métodos para la terminación de la línea de datos, entre ellos tenemos: paralelo y AC.

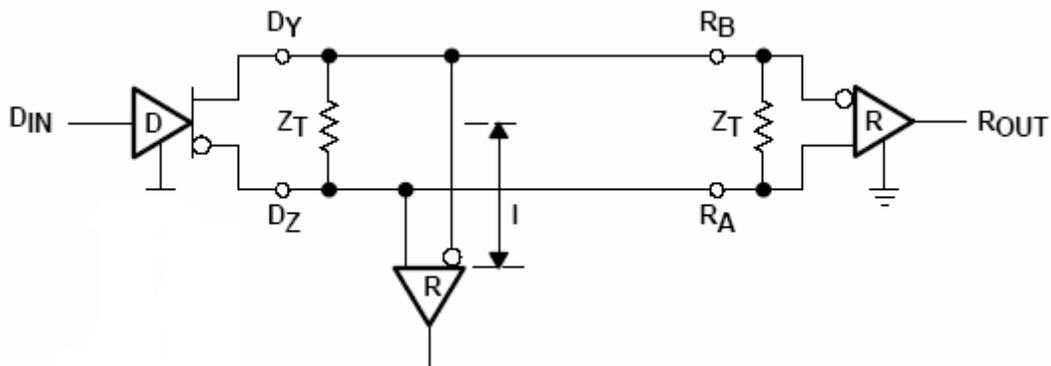
Figura 21. Configuración diferencial sin terminación.



Fuente: Soltero, Zhang, and Cockrill, 2002.

- Terminaciones en paralelo. Esta configuración típica utiliza una impedancia de terminación a través de las entradas al final del receptor (R). La terminación en paralelo asegura que no haya impedancias diferentes y elimina la reflexión. La resistencia de terminación debe ser igual a la impedancia del cable, por lo general de 100 a 120 Ω (Figura 22).

Figura 22. Configuración diferencial con terminación en paralelo.



Las desventajas de esta terminación

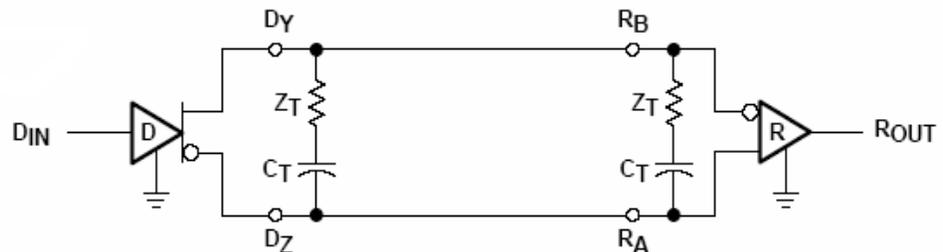
son: el incremento de la potencia de disipación de los **drivers** y la situación anómala con respecto a que la salida de los receptores no tienen un estado definido cuando el **driver** esta deshabilitado o en alta impedancia.

- Terminación AC. Como las salidas diferenciales son complementarias, cuando el **driver** esta activo: una se encuentra en estado alto mientras la otra se encuentra en estado bajo, y la corriente fluye del estado alto al estado bajo a través de la resistencia terminal como en la configuración en paralelo. Un capacitor y una resistencia se usan para una terminación en ac y eliminar la corriente de dc de una salida diferencial a la otra como se muestra en la figura 23. Sin embargo, esto adiciona un retardo por la constante de tiempo RC reduciendo significativamente la velocidad de transmisión. Un ejemplo de esta configuración

es usar una terminación de $Z_T = 100\Omega$ y un capacitor de 1000pF, a una velocidad de transferencia de datos de 200Kbps.

Esta terminación tiene como ventajas: baja disipación de potencia de los **drivers** comparada con el terminal en paralelo, reduce las reflexiones en las líneas de transmisión. Como desventajas presenta una limitación en la velocidad de transmisión de datos y en la longitud del cable debido a la constante de tiempo RC (se aplica en líneas de control de baja velocidad).

Figura 23. Configuración diferencial con terminación AC.

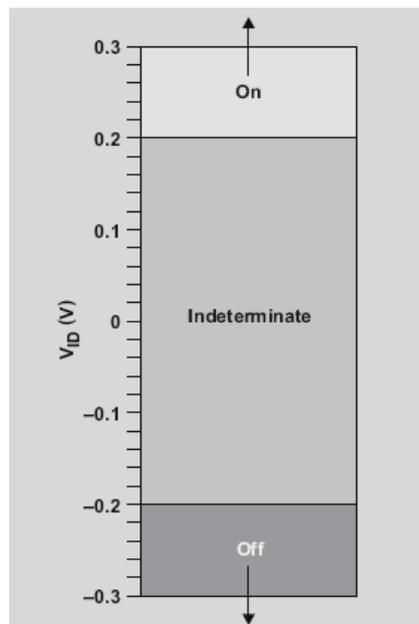


- NOTES: A. $Z_T = Z_0$
 B. Choose C_T so that the resultant RC time constant is small compared to the unit interval.

En aplicaciones asíncronas y basadas en el estándar UART como el modulo serial de los microcontroladores, se presenta un fenómeno llamado **fail – safe** que consiste en un estado desconocido a la salida de los receptores producto de un estado indeterminado en el bus. En la transmisión asíncrona se presenta una conmutación de estados lógicos, y entre carácter y carácter la línea permanece en alto, esta condición es necesaria para poder detectar el bit de inicio (línea en bajo) y dar comienzo a una transmisión o recepción de datos. Pero esta condición en una red RS 485 es un problema debido a la forma de comunicación entre los dispositivos empleando las mismas líneas de transmisión A y B. En el modo de transmisión las líneas A y B por parte de un dispositivo I, que le envía un comando a un dispositivo J y del cual debe esperar una respuesta, se colocan con un determinado voltaje diferencial indicando el uso del bus, pero cuando se finaliza la transmisión el dispositivo I pasa a modo de recepción colocando sus terminales en alta impedancia, esto implica perder el voltaje diferencial que indicaba que el bus estaba en alto y durante el tiempo que el dispositivo receptor J pase a modo de transmisión, colocando de nuevo un voltaje diferencial en las líneas A y B, se puede presentar cualquier perturbación en el bus que engañe a los dispositivos, haciéndoles detectar un bit de inicio y entrar en modo de recepción, y al no existir una verdadera transmisión de datos y posteriormente entrar el dispositivo J en transmisión, se presentará un sobre flujo en los registros de recepción y se perderá la comunicación en el bus. Una reinicialización del sistema no garantiza

que la comunicación no se pierda de nuevo. Existe una situación de anomalía adicional, sucede en el caso que el nivel de voltaje presente en las entradas A y B de los receptores llegue, por alguna eventualidad anómala, a estar dentro del rango no permitido de $\pm 200\text{mV}$ (rango de indeterminación lógica), por lo que el nivel lógico que entregaría el receptor, a su salida hacia el módulo de procesamiento de la trama, será el valor del último bit recibido en la transmisión, esto de nuevo genera un error si el nivel lógico del bit anterior no es un estado alto, que posteriormente permita la detección de un bit de inicio. En la figura 24 se muestra los voltajes diferenciales permitidos en el bus.

Figura 24. Estados del voltaje diferencial.



Fuente: Gingerich, 2004.

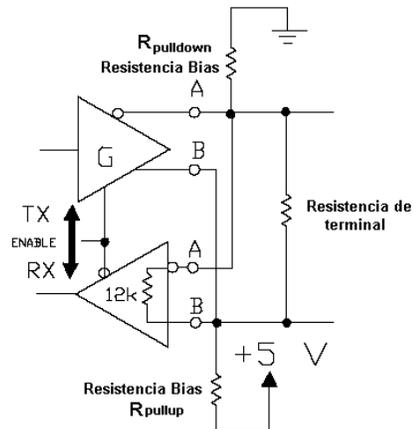
Para mantener el bus en alto y prevenir fenómenos como el Fail Safe, es necesaria la utilización de unas resistencias de pullup y pulldown (resistencias bias) en las líneas de datos A y B para forzar a un estado alto el en bus cuando los **drivers** estén inactivos como se muestra en la figura 25.

Para calcular el valor de estas resistencias se debe tener en cuenta los parámetros de los cables en la especificación RS 485:

- Máximo voltaje en modo común: - 7 V a + 12 V.

- Resistencia de entrada del receptor: 12 KΩ mínimo.
- Sensibilidad del receptor: ±200mV.
- Carga **driver**: 62Ω.

Figura 25. Resistencias de pullup



Por ejemplo, se tiene una red de 10 nodos con dos resistencias de 120Ω. Cada nodo tiene una impedancia de 12KΩ en paralelo la carga total es:

$$R_{TOTAL} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_{10}}} = \frac{1}{\frac{1}{12K\Omega} + \frac{1}{12K\Omega} + \dots + \frac{1}{12K\Omega}} = 1200\Omega$$

Con las dos resistencias de terminal la nueva carga total es:

$$R_{TOTAL} = \frac{1}{\frac{1}{1200\Omega} + \frac{1}{120\Omega} + \frac{1}{120\Omega}} = 57\Omega$$

Se puede apreciar claramente como las resistencias de terminal son las responsables de la mayor carga. Para mantener un voltaje de 200mV entre las líneas A y B se necesita una corriente de bias de 3.5mA a través de la carga total:

$$I_{BIAS} = \frac{\text{Voltaje}}{\text{Resistencia}} = \frac{200mV}{57\Omega} = 3.5mA$$

Para una fuente de 5V la resistencia total en serie debe ser:

$$R_{SERIE} = \frac{\text{Voltaje}}{\text{Corriente}} = \frac{5V}{3.5mA} = 1428\Omega$$

O menor, al restar la resistencia total en paralelo de la resistencia total en serie obtenemos el valor total de las resistencias de pullup y pulldown:

$$R_{PULLUP-DOWN} = R_{SERIE} - R_{TOTAL} = 1428\Omega - 57\Omega = 1371\Omega$$

Por tanto el valor de cada una de ellas es la mitad del valor total:

$$R_{PULLUP} = R_{PULLDOWN} = 685\Omega$$

La figura 26 muestra los circuitos equivalentes para cada cálculo.

Existen circuitos integrados transceivers que simplifican el diseño del hardware al eliminar el problema del **fail – safe**, en ellos el receptor detecta un estado alto del bus aunque no haya drivers activos ($V_{ID} = 0$), esto garantiza al modulo UART un estado alto entre caracteres y solamente bits de inicio validos. Alguno de estos integrados son: DS36276 y DS36277 del fabricante Nacional Semiconductor y los SN65HVD3082E, SN75HVD3082E, SN65HVD3085E y SN65HVD3088E del fabricante Texas Instruments entre otros.

4.2.3 Interconexión física: para la interconexión física del bus se puede realizar utilizando cable de par trenzado, cable plano o ribbon, entre otros; el cable de par trenzado calibre 24 AWG es el más utilizado por los diseñadores. Las características de impedancia del cable deben ser de 100Ω a 120Ω . El par trenzado ofrece beneficios en cuanto al ruido en comparación con el cable plano o ribbon. En el cable plano una fuente de ruido (usualmente un conductor transportando un señal cualquiera) puede estar cerca de uno de los pares, lo que ocasiona un acople capacitivo del ruido produciendo una señal diferencial bastante grande que puede alterar los datos. Cuando se usa cable de par trenzado, se incrementa la inmunidad frente a interferencias electromagnéticas. Al cruzar los cables se consigue reducir el crosstalk (interferencias de acople electromagnético causadas por cables adyacentes sin apantallamiento) existente entre ellos, al igual que el campo creado alrededor de los mismos, así las corrientes inducidas por los campos sobre cada uno de los cables se cancela prácticamente por la corriente que circula por el otro cable (retorno) del par.

Existen dos tipos de cable trenzado, el STP (par trenzado blindado) y el UTP (par trenzado no blindado). El STP esta formado por una capa exterior plástica y una

capa interior de papel metálico, dentro de la cual se encuentra cuatro pares de cable trenzados; el blindaje del cable debe estar conectado a tierra en ambos extremos, si esta conexión no esta bien hecha, el blindaje se puede convertir en una antena, absorbiendo señales selectivas de los demás hilos del cable y fuentes de ruido eléctrico externo. Sus ventajas son: reduce el ruido generado dentro (crosstalk) y fuera del cable (EMI) y sus desventajas son: el costo y lo difícil de instalar, es más rígido y de mayor sección (Figura 27).

El UTP esta formado por cuatro pares de hilos trenzados, revestido de un aislante plástico de colores para la identificación de los colores, presenta un diámetro externo de aproximado de 0.43 cm. Cada par de hilos se encuentra aislado de los demás. Para tener una mejor reducción del crosstalk la cantidad de pares trenzado en el hilo varía. Al igual que el STP el UTP sigue especificaciones precisas con respecto a cuanto trenzado se le permite por unidad de longitud. Sus ventajas son: fácil instalación y es el medio más económico, no llena los conductos fácilmente, algo importante en instalaciones antiguas, es considerado como el transporte mas rápido dentro de la tecnología de cobre. Sus desventajas son: es más propenso al ruido y las interferencias que otros tipos de cables, la distancia final sin repetidores es más corta (Figura 28).

Figura 26. Circuito equivalente para la impedancia de los receptores.

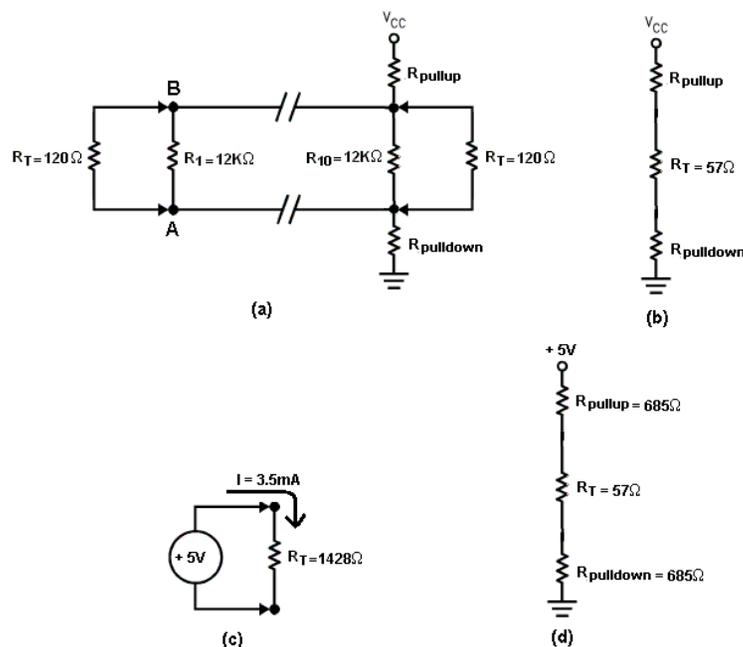
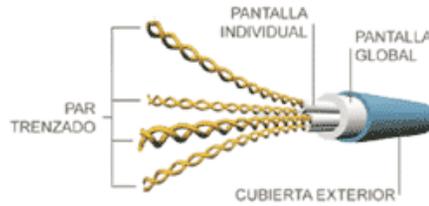


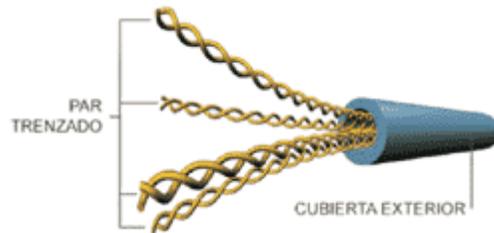
Figura 27. Cable STP.



Fuente: New phone.

Cuando se transmiten datos en el bus de campo, se debe tener en cuenta la relación entre la longitud del cable y la velocidad (rata) de los datos. Los valores máximos de longitud y velocidad son: 1200m (4000 feet) y 10 Mbps (Mega bits por segundo) (Figura 29).

Figura 28. Cable UTP.



Fuente: New phone.

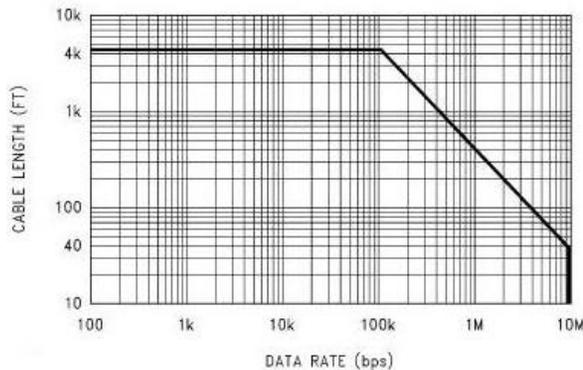
A mayor velocidad de transmisión, menor debe ser la longitud del cable para una transferencia de datos sin problemas y viceversa. También se debe tener en cuenta la cantidad máxima de dispositivos que podemos conectar al bus en una distancia aproximada de 1200m (4000 feet), en este caso el RS 485 permite una conexión de 32 pares de **driver** / receptor, para alcanzar mayores distancias y aumentar la cantidad de dispositivos se hace uso de repetidores que se encargan de elevar el voltaje atenuado (debida a la longitud del cable) de nuevo a su valor original.

4.3 NIVEL DE ENLACE

El estándar RS 485 no define el protocolo para la comunicación de los dispositivos conectados al bus, la escogencia es libre según la aplicación. El protocolo utilizado para la aplicación fue el modbus. Este protocolo define la forma del mensaje que utilizaran los dispositivos para su respectiva comunicación,

independiente del tipo de red sobre la que se comuniquen. Establece la forma de pedir acceso a otros dispositivos, la respuesta y como se detectaran los errores en la comunicación.

Figura 29. Velocidad de transmisión vs. Longitud del cable.



Fuente: Goldie, 1996.

La técnica de comunicación que se utiliza entre dispositivos es una configuración maestro – esclavo. El maestro, en este caso el controlador de temperatura, puede direccionar individualmente a los esclavos (transmisores de temperatura, actuadores, entre otros) o generar un mensaje a todos ellos. Una vez direccionado el esclavo el maestro hace un llamado o petición, el esclavo responde enviando al maestro los datos requeridos o ejecutando la acción solicitada.

El protocolo Modbus establece el formato para la petición del maestro, colocando en él la dirección del dispositivo esclavo (0 en caso de 'difusión'), un código de función que define la acción solicitada, cualquier dato que haya de enviarse y un campo de comprobación de error (figura 30). El mensaje de respuesta del esclavo está también definido por el protocolo Modbus, contiene campos confirmando la acción tomada, cualquier dato que haya de devolverse y un campo de comprobación de error. Si el mensaje recibido por el esclavo es defectuoso o el esclavo es incapaz de realizar la acción solicitada, construirá un mensaje de error y lo enviará como respuesta³⁵.

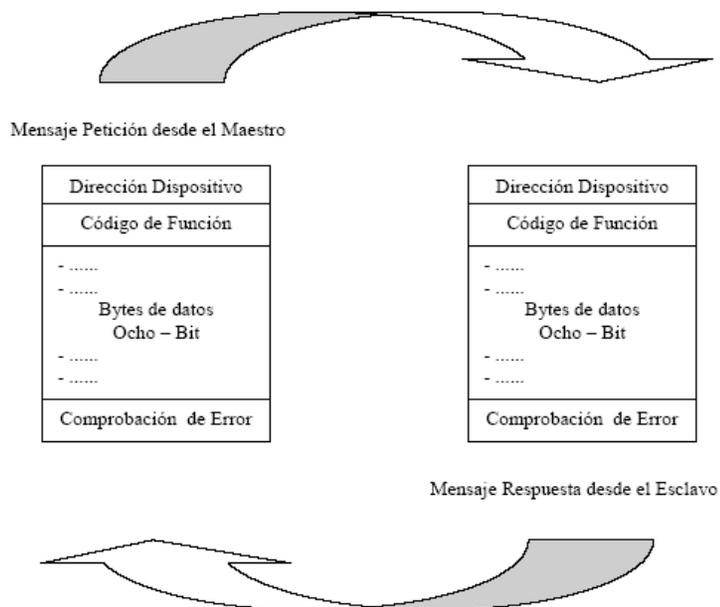
Figura 30. Trama del mensaje.

Dirección	Código de función	Datos	Campo de comprobación de errores
1 byte	1 byte	0 a 252 byte(s)	2 bytes

Existen otros tipos de redes donde no existe un único maestro sino múltiples maestros que se comunican ‘todos con todos’ (peer to peer). En ellas cualquier maestro puede direccionar otro maestro para iniciar una transferencia de datos de modo que puede operar como maestro o esclavo en diferentes ocasiones.

La figura 31 muestra el ciclo de petición del maestro y la respuesta del esclavo, en una configuración maestro-esclavo.

Figura 31. Ciclo de petición.



Fuente: Urda Carrasco, 2003.

En la petición, el código de función del mensaje indica al esclavo la operación a realizar. En los bytes de datos va información que a veces el esclavo necesita para realizar la acción requerida por la función. El campo de comprobación de errores se utiliza por el esclavo para verificar que todo el mensaje esta libre de errores.

³⁵ URDA CARRASCO, Diego. Protocolo modbus [online]. [Marzo 2003]. Disponible en Internet: www.step.es/personales/durda/Download_zone/Own/PI_MBUS_300-RevJ-sp0.pdf

En la respuesta, el código de función del mensaje es el mismo código enviado en la petición cuando no hay errores, cuando se presenta un error el código es diferente. En el campo de datos va la información solicitada por el maestro al esclavo, en caso de error se envía la información correspondiente a la descripción del error. El campo de comprobación de errores se utiliza por el maestro para verificar que todo el mensaje esta libre de errores.

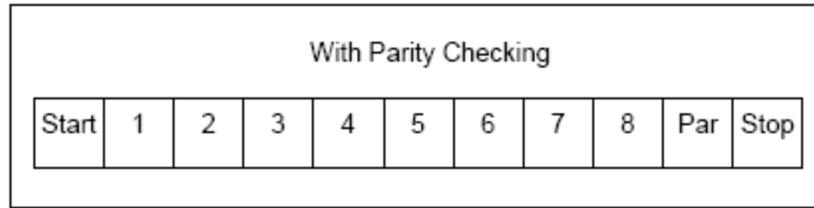
En el protocolo estándar Modbus se utilizan dos modos de transmisión serial: ASCII y RTU. El modo RTU es el modo que se utiliza en el presente trabajo para la transmisión de datos por la red de bus de campo. En el modo RTU (**Remote Terminal Unit**) la transmisión de los bytes del mensaje debe ser continua. El formato de cada byte es el siguiente:

Sistema de codificación:	Binario 8-bits, hexadecimal 0-9, A-F. Dos dígitos hexadecimales contenidos en cada campo de 8 bits del mensaje.
Bits por byte	1 bit de arranque. 8 bit de datos, el menos significativo se envía primero. 1 bit para paridad: Par o Impar; ningún bit para No paridad. 1 bit de parada si se usa paridad; 2 bits si no se usa paridad.
Campo de Comprobación de error:	Comprobación Cíclica Redundante (CRC) ³⁶ .

Para la transmisión serial de los caracteres o bytes se envían de derecha a izquierda (del menos significativo al mas significativo), cuando se utiliza el bit de paridad el formato es el mostrado en la figura 32

³⁶Ibid., disponible en Internet: www.step.es/personales/durda/Download_zone/Own/PI_MBUS_300-RevJ-sp0.pdf

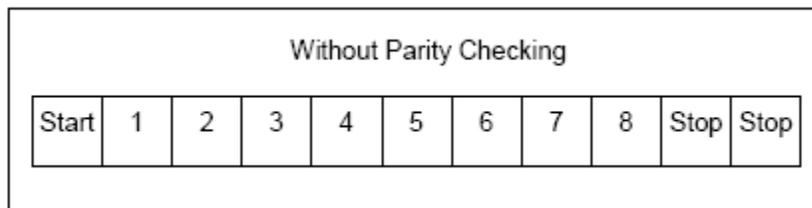
Figura 32. Secuencia de bits en modo RTU con bit de paridad



Fuente: MODBUS organization.

Cuando no se utiliza el bit de paridad se debe finalizar la transmisión serial con dos bits de parada como se muestra en la figura 33

Figuran 33. Secuencia de bits en modo RTU con dos bits de parada.



Fuente: MODBUS organization.

Para el envío del mensaje es necesario situarlo dentro de una trama con un inicio y un final conocido, para permitir a los receptores detectar cuando inicia y cuando termina un mensaje, así los mensajes que se trasmitan de forma parcial pueden ser detectados y establecer errores.

Para iniciar la trama se comienza con un intervalo silencioso de 3.5 tiempos de carácter (Figura 34), para hallar el tiempo de un carácter se calcular el tiempo de transmisión de un byte a la velocidad de transmisión de la red. Por ejemplo, si la velocidad de la red es 19200 bps, calculamos el tiempo de transmisión de un bit:

$$\frac{1s}{19200bps} = 52\mu s$$

Calculamos el tiempo de un byte:

$$52\mu s \times 8bits = 416.6\mu s, \text{ tiempo de un byte.}$$

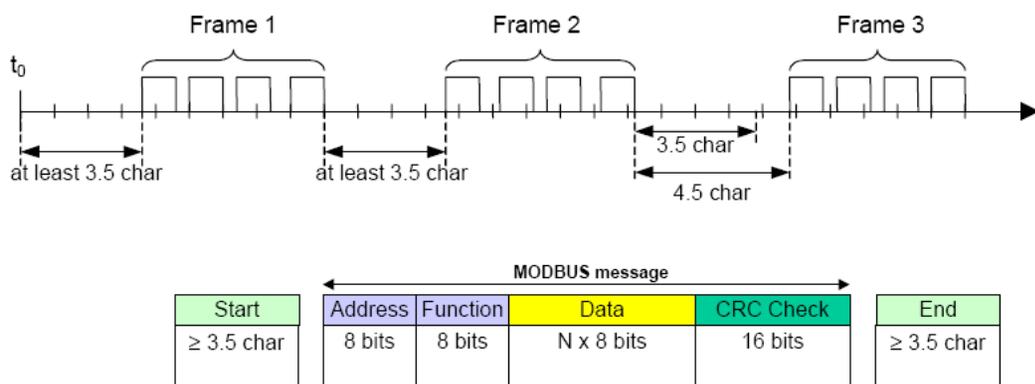
Así la duración del intervalo silencioso debe ser:

$$416.6\mu s \times 3.5 = 1.25ms$$

Durante este intervalo silencioso no debe haber ninguna transmisión de datos sobre la red. Los dispositivos conectados a esta red están monitoreando continuamente incluso durante los intervalos silenciosos. Cuando el primer campo (dirección), es recibido cada dispositivo verifica para saber si es direccionado.

Para terminar la trama, después del último carácter transmitido se debe hacer de nuevo un intervalo silencioso de al menos 3.5 tiempo de carácter indicando el fin del mensaje (figura 34).

Figura 34. Trama del mensaje RTU.



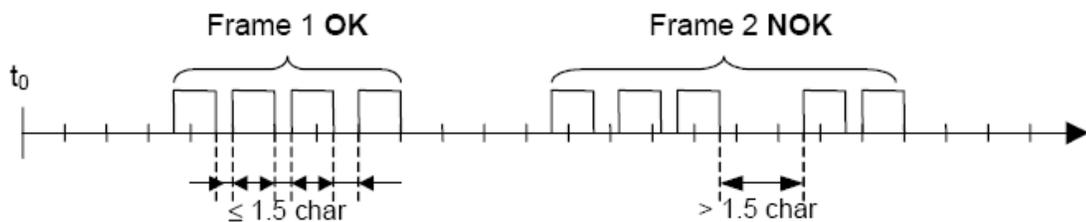
Fuente: MODBUS organization.

La trama completa del mensaje debe ser transmitida como un flujo continuo. Si un intervalo silencioso de más de 1.5 tiempos de carácter tiene lugar antes de completar la trama, el dispositivo receptor desecha el mensaje incompleto y asume que el próximo byte será el campo de dirección de un nuevo mensaje (figura 35).

De forma similar, si un nuevo mensaje comienza antes de que transcurran 3.5 tiempos de carácter después de un mensaje previo, el dispositivo receptor lo

considerará una continuación del mensaje previo. Esto dará lugar a un error, ya que el valor en el campo final CRC no será válido para el mensaje combinado³⁷.

Figura 35. Intervalo silencioso entre caracteres.



Fuente: MODBUS organization.

4.3.1 Descripción de la trama.

4.3.1.1 Campo de dirección: contiene 8 bits, las direcciones validas para los esclavos se encuentran entre 0 -247 decimal. Los dispositivos esclavos individuales tienen direcciones asignadas en el rango de 1-247. Un maestro direcciona un esclavo colocando su dirección en el campo de dirección, el esclavo al responder envía su dirección en este mismo campo para indicar al maestro que esclavo esta respondiendo.

La dirección "0", es utilizada como una dirección de difusión, la cual todos los esclavos reconocen.

4.3.1.2 Campo de función: contiene 8 bits, sus posibles valores se encuentran en el rango de 1 a 255.

³⁷Ibid., disponible en Internet: www.step.es/personales/durda/Download_zone/Own/PI_MBUS_300-RevJ-sp0.pdf

Cuando un mensaje es enviado desde un maestro a un dispositivo esclavo, el campo del código de función indica al esclavo qué tipo de acción ha de ejecutar. Por ejemplo: leer los estados ON/OFF de un grupo bobinas o entradas discretas; leer el contenido de datos de un grupo de registros; leer el status de diagnóstico de un esclavo; escribir en determinadas bobinas o registros; o permitir cargar, salvar o verificar el programa dentro del esclavo³⁸.

Cuando el esclavo responde al maestro utiliza el campo de función, para indicar una respuesta sin inconvenientes (libre de errores) o si ha ocurrido algún tipo de error (denominado respuesta de excepción). Cuando no hay errores el esclavo envía el mismo código recibido en el campo de función. Si se presento un error el esclavo envía el mismo código pero con el bit mas significativo en "1".

Por ejemplo si el maestro envía un mensaje a un esclavo para leer un grupo de registros, el campo de función tendría el siguiente código:

0000 0011

Si el esclavo ejecuta la acción sin errores, se envía el mismo código en el campo de función, en caso de error se envía:

1000 0011

Además en el campo de datos, se incluye un código correspondiente a la excepción. Para indicar al maestro el tipo de error ocurrido.

Un procedimiento típico para responder a una excepción es enviar de nuevo el mensaje, intentar mensajes de diagnostico y notificar operadores.

4.3.1.3 Campo de datos: cuando el maestro envía un mensaje al esclavo, el campo de datos contiene información adicional para que el esclavo pueda ejecutar la acción definida por el código de función. Esto puede incluir partes como direcciones discretas y de registros, la cantidad de partes que han de ser manipuladas y el cómputo de bytes de datos contenidos en el campo.

³⁸Ibid., disponible en Internet: www.step.es/personales/durda/Download_zone/Own/PI_MBUS_300-RevJ-sp0.pdf

Por ejemplo, si el maestro solicita a un esclavo leer un grupo de registros mantenidos (código de función 03), el campo de datos especifica el registro de comienzo y cuántos registros han de ser leídos. Si el maestro escribe sobre un grupo de registros en el esclavo (código de función 10 hexadecimal), el campo datos especifica el registro de comienzo, cuántos registros escribir, el cómputo de bytes de datos que siguen en el campo datos y los datos que se deben escribir en los registros³⁹.

Si no hay error, el esclavo envía la información solicitada por el maestro, si por el contrario ha ocurrido un error, el campo contiene información del código de excepción para que el maestro pueda determinar la acción a tomar.

Cuando el esclavo no requiere información adicional para ejecutar el código de función, la longitud del campo puede ser "0" (inexistente).

4.3.1.4 Campo de comprobación de error. Existen dos tipos de comprobación de errores para el estándar modbus. Para el modo ASCII se utiliza el LRC (comprobación longitudinal redundante) y para el RTU el CRC (comprobación cíclica redundante). Ambas se realizan sobre toda la trama del mensaje; también se puede utilizar la paridad (par o impar) para aplicarla en cada carácter de la trama, pero su uso es opcional.

Tanto el maestro como el esclavo realizan estas comprobaciones, el maestro antes de la transmisión y el esclavo durante la recepción.

4.3.1.5 Comprobación CRC. El campo para el CRC es dos bytes, el emisor calcula este valor utilizando los campos de: dirección, función y datos, y lo añade a su respectivo campo de comprobación CRC. El receptor calcula de nuevo este valor teniendo en cuenta los mismos campos que el emisor y compara el resultado con el valor del campo CRC, si no son iguales resulta un error.

Para calcular el valor CRC Modbus se precarga un registro de 16 bits, todos ellos a 1. Luego comienza un proceso que toma los sucesivos bytes del mensaje y los opera con el contenido del registro y actualiza éste con el resultado obtenido. Sólo los 8 bits de dato de cada carácter son utilizados para generar el CRC. Los bits de

³⁹Ibid., disponible en Internet: www.step.es/personales/durda/Download_zone/Own/PI_MBUS_300-RevJ-sp0.pdf

arranque y paro y el bit de paridad, no se tienen en cuenta para el CRC. Durante la generación del CRC, se efectúa una operación booleana OR exclusivo (XOR) a cada carácter de 8 bits con el contenido del registro. Entonces al resultado se le aplica un desplazamiento de bit en la dirección de bit menos significativo (LSB), rellenando la posición del bit más significativo (MSB) con un cero. El LSB es extraído y examinado. Si el LSB extraído fuese un 1, se realiza un XOR entre el registro y un valor fijo preestablecido (valor preestablecido de A001 hexadecimal, correspondiente al polinomio generador CRC16 'Inverso', que es el que se aplica al CRC Modbus). Si el LSB fuese un 0, no se efectúa un el XOR. Este proceso es repetido hasta haber cumplido 8 desplazamientos. Después del último desplazamiento (el octavo), el próximo byte es operado XOR con el valor actual del registro y el proceso se repite con ocho desplazamientos más, como se ha descrito mas arriba y así con todos los bytes del mensaje. El contenido final del registro, después de que todos los bytes del mensaje han sido procesados, es el valor del CRC⁴⁰.

Cuando el CRC es añadido al mensaje, primero se añade el byte de orden bajo seguido del byte de orden alto.

A continuación se da el código en C, para implementar la función de comprobación de errores CRC.

```
Unsigned char* data      // Un puntero al buffer de mensaje
Unsigned char length    // La cantidad de bytes en el buffer de mensaje
```

//La función retorna el valor de CRC como un tipo entero sin signo.

```
Unsigned Int crc_chk(unsigned char* data, unsigned char length)
{
    int j;
    unsigned int reg_crc=0xFFFF;
    while(length--)
    {
        reg_crc ^= *data++;
        for (j=0;j<8;j++)
        {
            if(reg_crc & 0x01)
            { /* LSB(b0)=1 */
                reg_crc=(reg_crc>>1) ^ 0xA001;
            }
        }
        else
```

```
        {  
            reg_crc=reg_crc >>1;  
        }  
    }  
}  
return reg_crc;  
} 41
```

^{40,41} Ibid., disponible en Internet: www.step.es/personales/durda/Download_zone/Own/PI_MBUS_300-RevJ-sp0.pdf

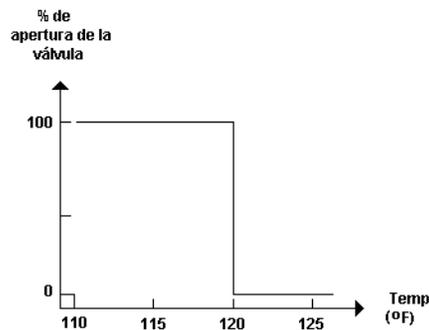
5 CONTROLADOR DE TEMPERATURA

La función de un controlador es comparar el valor real de la salida de una planta con la entrada de referencia (el valor deseado), determinar la desviación y producir una señal de control que reducirá la desviación a cero o a un valor pequeño. La manera en la cual el controlador automático produce la señal de control se denomina acción de control⁴¹.

5.1 CONTROL DE ENCENDIDO – APAGADO (ON - OFF)

En el modo de control de encendido - apagado, el actuador solo tiene dos posiciones, estados de operación. Cuando la señal de error se encuentra por encima del umbral establecido (set point), el controlador envía al actuador a una de sus dos posiciones. Si la señal de error se encuentra por debajo del umbral establecido, el controlador envía al actuador a la otra posición. Para entender mejor el control encendido – apagado, considérese como dispositivo actuador una válvula operada por un solenoide, al ser accionada por un solenoide solo tiene dos posiciones posibles: abierto o cerrado, no hay posiciones intermedias. En la figura 36 se muestra la posición del actuador para un control encendido – apagado.

Figura 36. Posición de la válvula contra temperatura medida.



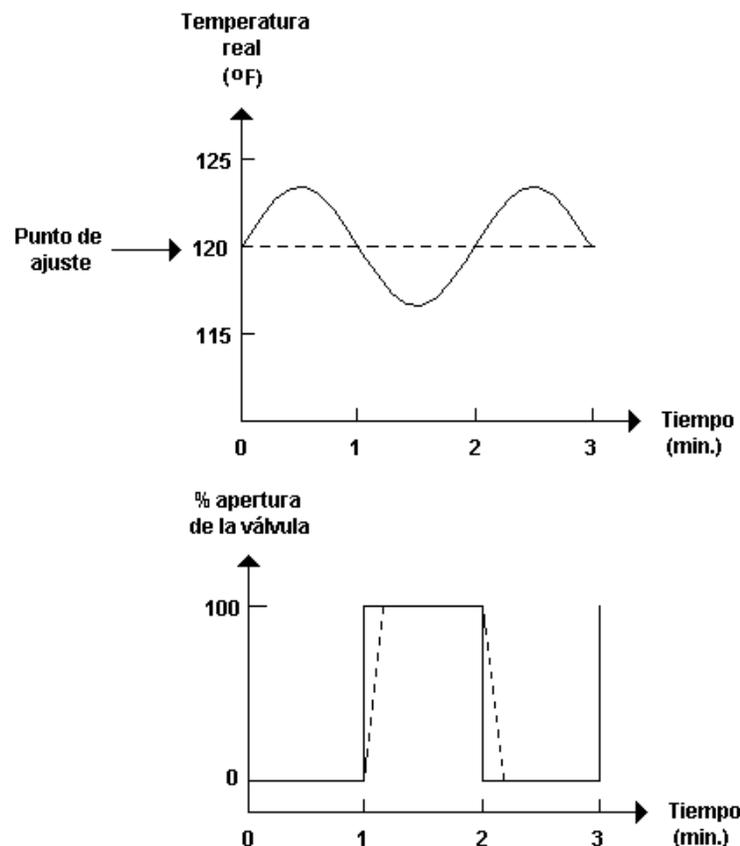
Fuente: Maloney, 1997.

⁴¹ OGATA, Katsuhiko. Ingeniería de control moderna. México: prentice hall, 1998. p. 211

En la figura anterior se considera como variable controlada la temperatura, con un set point de 120° F. Si el valor de la temperatura es menor que 120° F, la válvula es posicionada a la máxima abertura (100%). Si el valor de la temperatura es mayor que 120° F, la válvula es posicionada a la mínima abertura (0%).

La figura 37 muestra una grafica del valor de la temperatura contra tiempo, con la posición de la válvula graficada en el mismo eje de tiempo. Se puede observar como la temperatura oscila alrededor del punto de ajuste, esta es una característica del control encendido - apagado.

Figura 37. Temperatura medida real contra tiempo y apertura de la válvula contra tiempo.



Fuente: Maloney, 1997.

La oscilación ocurre porque la planta no puede responder instantáneamente a los cambios de posición de la válvula. “Cuando la temperatura se incrementa, es porque la razón de entrada de calor es mayor que la razón de pérdida de calor en el proceso (planta). El cierre rápido de la válvula de control no puede revertir

instantáneamente esa tendencia, porque habrá una energía calorífica residual acumulada en y alrededor del dispositivo de calentamiento que debe difundirse a través de la cámara de proceso. A medida que este calor residual es distribuido, temporalmente continúa aumentando la temperatura.

De la misma manera, una tendencia a la baja de temperatura no puede revertirse instantáneamente, pues lleva un rato distribuir la nueva energía calorífica a través del proceso. Hasta que pueda ocurrir la distribución, la tendencia a la baja continuará, causando una oscilación⁴⁵.

Se puede diseñar un sistema para disminuir estas oscilaciones pero se necesitan ciclos mas frecuentes de control. Esto tiene como desventaja el desgaste del actuador por su operación frecuente.

5.1.1 Brecha diferencial. La brecha diferencial esta definida como un rango de valores que debe pasar la variable medida, para que el actuador cambie de posición. En pocas palabras la brecha diferencial nos dice cuanto debe pasar el valor medido por encima del set point para cerrar la válvula y cuanto por debajo del **set point** debe caer la variable medida para abrir la válvula.

Por ejemplo, la figura 38 muestra como la temperatura real debe subir 3° F por encima del set point para cerrar la válvula, y debe bajar 3° F para abrir la válvula. El menor cambio de temperatura posible en el cual puede operar la válvula de abierto a cerrado es 6° F. La brecha diferencial es entonces de 6° F.

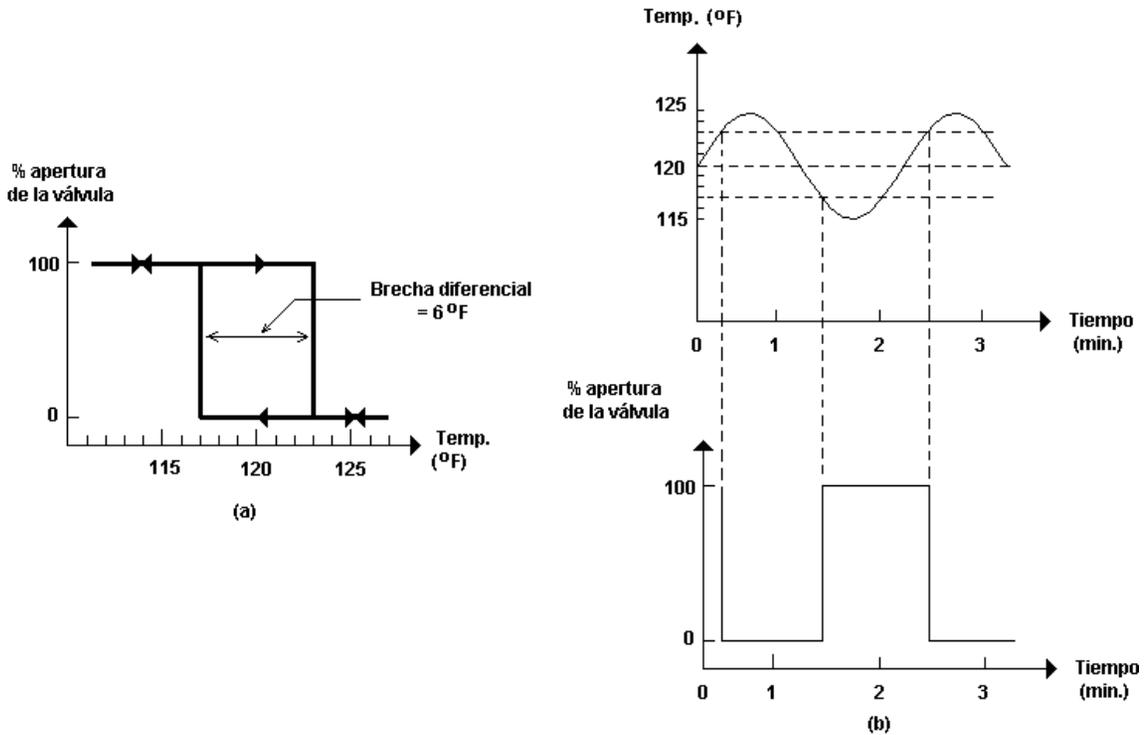
La brecha diferencial también puede expresarse como un porcentaje del rango completo del controlador. Si el controlador tiene un rango de, por ejemplo, 60° F a 300° F, entonces el tamaño de su rango es de 240° F (300° F – 60° F). Una temperatura de 6° F representa el 2.5% del rango completo de control,

$$\frac{6^{\circ}F}{240^{\circ}F} = 0.025 = 2.5\%$$

Por tanto, en este caso la brecha diferencial puede expresarse como 2.5% en lugar de 6° F.

⁴⁵ MALONEY, Timothy J. Electrónica Industrial moderna. México: prentice hall. p.295.

Figura 38. Brecha diferencial en el control de encendido – apagado.



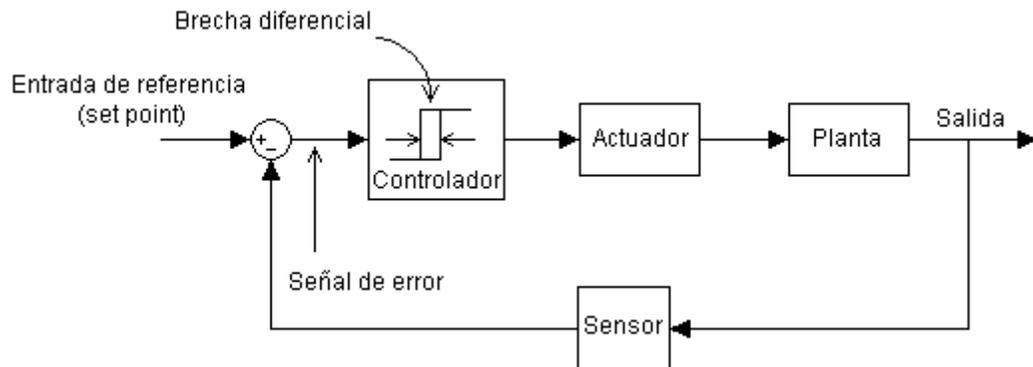
Fuente: Maloney, 1997.

El efecto práctico de la brecha diferencial se muestra en la gráfica de tiempo (Figura 38b). Como puede verse, la magnitud de oscilación es mayor pero la frecuencia de oscilación es menor. Por tanto la brecha diferencial tiene sus pros y contras. Es negativa porque el valor instantáneo medido puede desviarse aún más del punto de ajuste, pero es positiva porque el desgaste del dispositivo corrector o actuador se reduce, aumentando su vida útil⁴⁶.

El diagrama de bloques completo del sistema de control de temperatura se muestra en la figura 39.

⁴⁶Ibid., p. 296.

Figura 39. Diagrama de bloque de un controlador de encendido - apagado.



5.2 IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR

Para llevar a cabo el control de temperatura durante toda la fase de crianza el controlador utiliza un control de encendido – apagado. Ya que la temperatura varía dependiendo de la edad del lote (tabla 1) se hace necesario la implementación de un sistema de reglas que entregue la temperatura de referencia o **set point** según el día en que se encuentre el lote de los animales a medida que transcurra el tiempo, este sistema de reglas se soporta en un sistema de inferencia difuso denominado programador **fuzzy**.

El programador **fuzzy** implementado es de tipo Takagi – Sugeno de orden 0, dado que la base de conocimiento en el consecuente (salida) no se encuentra dentro de un rango establecido, sino como un valor fijo para la temperatura de cada semana (Tabla1).

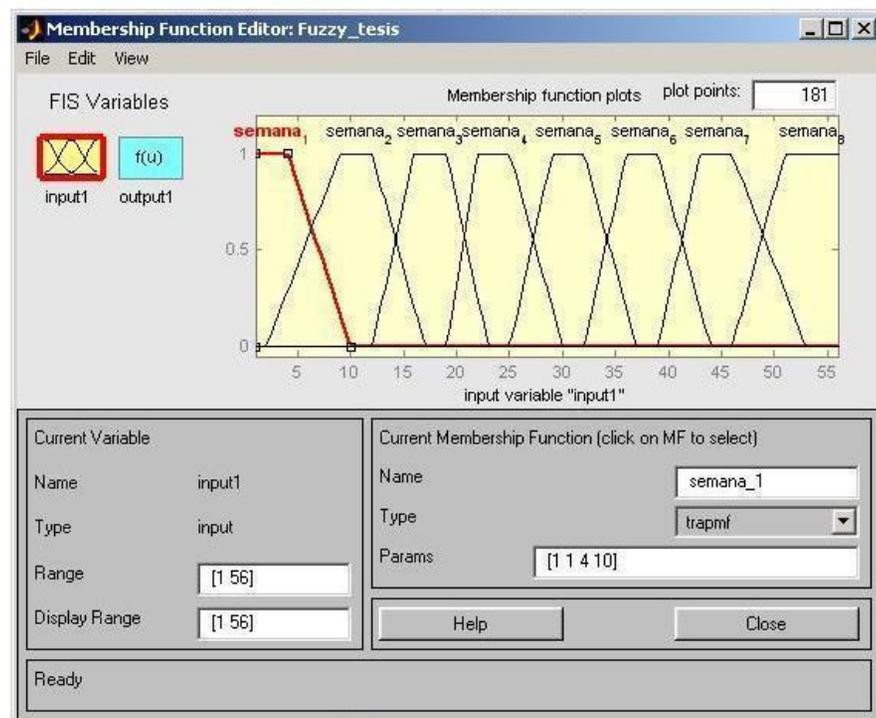
Tabla 1. Rango de la temperatura de cría.

Semana	Temperatura (°C)
1	34
2	32
3	30
4	28
5	26
6	24
7	22
8	20

Para el diseño y simulación del programador FUZZY se utilizó el **toolbox** de lógica difusa de matlab versión 6.5.

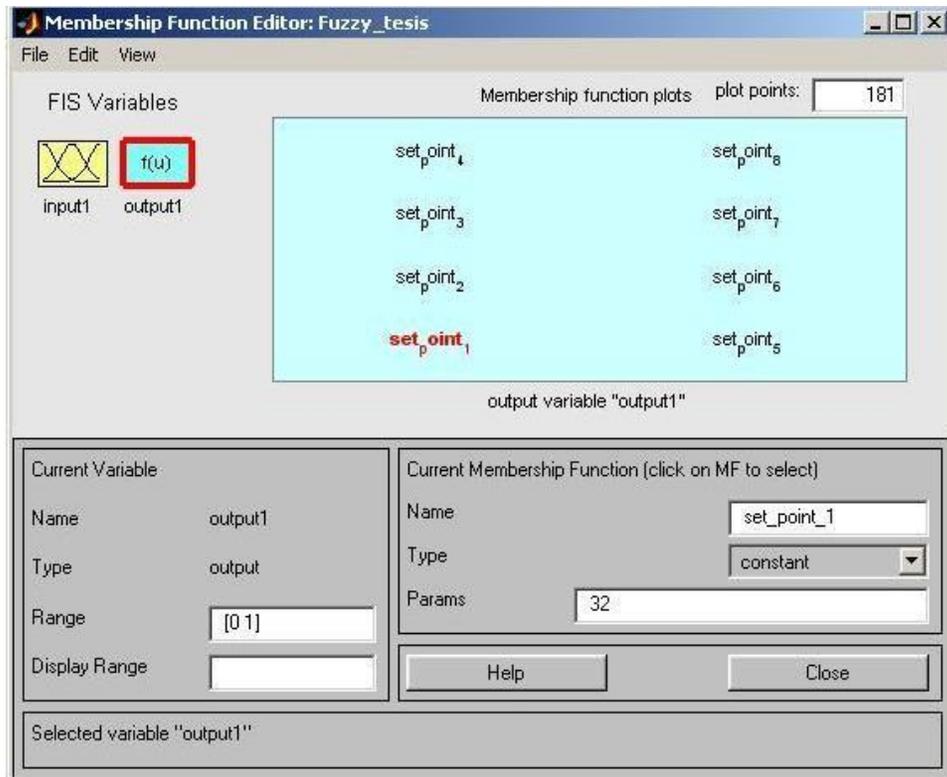
Se escogieron ocho conjuntos difusos de entrada al sistema FUZZY correspondiente a las ocho primeras semanas de cría de los animales donde se necesita un estricto control de la temperatura (figura 40).

Figura 40. Conjuntos difusos de entrada al sistema fuzzy.



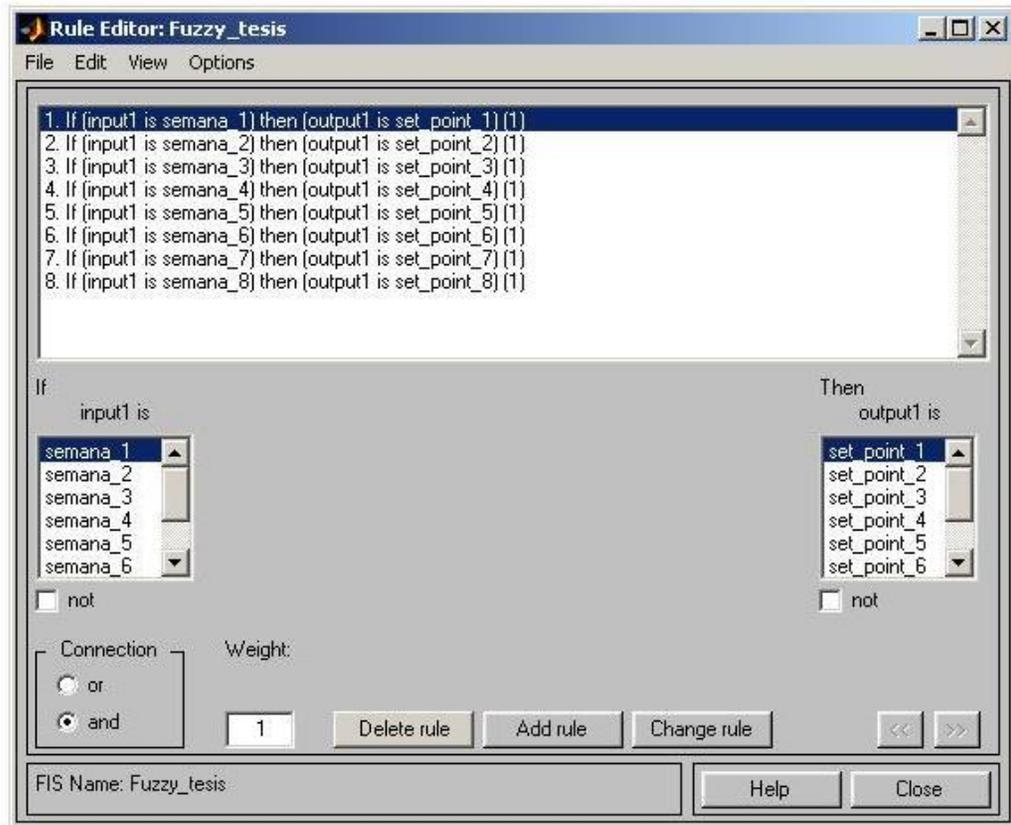
Los ocho conjuntos difusos de salida tipo singleton del sistema fuzzy, corresponden a la temperatura de cada una de las ocho primeras semanas de cría como se muestra en la figura 41. Los valores de temperatura están dados según la tabla 1.

Figura 41. Conjuntos de salida del sistema fuzzy.



Las reglas de relación entre los conjuntos de entrada y los conjuntos de salida del sistema fuzzy se hicieron de la siguiente manera, a cada semana se le asigno su temperatura correspondiente según la tabla 1 el formato es el siguiente: si (semana x) entonces (**set point x**), donde x es la semana en que se encuentra el lote, esto se ilustra en la figura 42.

Figura 42. Reglas de relación entre conjuntos de entrada y salida del sistema fuzzy.



Una vez establecida la relación entre la entrada y la salida, se genera desde Matlab un vector con los valores del set point correspondiente a cada uno de los 56 días de las ocho semanas.

Los valores del vector de set point son:

```

Columns 1 through 13
 32 32 32 32 31 31 31 31 30 30 30 30 30
Columns 14 through 26
 29 29 28 28 28 28 27 27 26 26 26 26 26
Columns 27 through 39
 25 25 24 24 24 24 24 23 23 22 22 22 22
Columns 40 through 52
 22 21 21 20 20 20 20 19 19 19 18 18
Columns 53 through 56
 18 18 18 18
    
```

Los valores de temperatura para cada día de las ocho semanas que entrega el sistema fuzzy no presentan cambios bruscos, la temperatura desciende de manera gradual a medida que transcurre el tiempo hasta llegar a la temperatura ambiente. En términos prácticos el sistema de control de temperatura garantiza un comportamiento productivo óptimo.

El vector posteriormente es guardado en un arreglo dentro del programa del controlador.

Para la implementación de los algoritmos de control y manejo de periféricos del controlador se utilizó la herramienta de desarrollo PICC18 de la empresa HI-TECH basado en ANSI C y el microcontrolador PIC18F452 como núcleo principal del controlador de temperatura.

Para que el controlador pueda calcular los días que transcurren a partir de la llegada del lote se utiliza un reloj – calendario externo, el circuito integrado de referencia DS1302 que permite llevar la cuenta de los días transcurridos desde la llegada del lote de los animales, información que es empleada por el programador FUZZY para el cambio del set point. En caso de presentarse una falla en la alimentación el DS1302 se vale de una batería de respaldo para continuar su funcionamiento. Las fechas de llegada de los lotes son almacenados en la memoria EEPROM del microcontrolador PIC18F452, de esta manera ante cualquier fallo de alimentación el sistema es capaz de volver a inicializarse de nuevo sin necesidad de entrar de nuevo la información sobre el lote.

El controlador tiene la capacidad para manejar simultáneamente tres criadoras a gas con su respectivo transmisor de temperatura conectado al bus de campo. Cada dispositivo (sea controlador de temperatura, criadora a gas o transmisor de temperatura) tiene una dirección que va desde la “1” para el controlador, “2” para el transmisor, “3” para la criadora a gas y así sucesivamente para los transmisores y criadoras restantes. En el caso de necesitar manejar mas de 3 criadoras a gas, basta con una sencilla reprogramación del controlador y la asignación de nuevas direcciones para los nuevos dispositivos; esta es la ventaja de la implementación de una red de bus de campo para la comunicación entre el controlador (Maestro) y los actuadores con sus respectivos transmisores de temperatura (esclavos).

En caso de presentarse un error en la comunicación, ya sea por la no conexión de un dispositivo configurado al bus o por un error en la trama de datos del protocolo MODBUS RTU, el controlador cuenta con un señalizador luminoso(led) de alarma, donde se le indica al usuario el origen del error. Por protección, al presentarse un error en la comunicación con el actuador (criadora a gas) o su correspondiente

transmisor de temperatura, el modulo que controla la criadora a gas detiene la acción de control apagando la criadora, hasta una nueva inicialización del sistema. Para la entrada y visualización de datos el controlador tiene conectado un teclado matricial plano de 16 caracteres y pantalla LCD (Figura 43).

Para la comunicación a través del bus de campo cuenta con un transmisor – receptor SN75176B de Texas Instruments conectado a los pines de recepción y transmisión del microcontrolador RC7 y RC6. En el pin RC4 se encuentra conectado el habilitador de funciones del integrado para transmitir o recibir datos por los pines R y D del mismo. Como el controlador de temperatura es el primer dispositivo conectado a bus, una resistencia de terminación es conectada entre los pines B y A del integrado.

El montaje final del controlador se muestra en la figura 44.

Tabla 2. Teclado matricial del controlador de temperatura.

TECLA	FUNCIÓN
1 2 3 4 5 6 7 8 9 0	Teclado numérico que permite el ingreso de datos en forma de números al sistema, van desde el 0 hasta el 9.
ENTRAR	La tecla ENTRAR equivale a la tecla aceptar en otros dispositivos. Cumple dos funciones, entrar a menús y aceptar datos ingresados.
SALIR	Permite salir de menús o cancelar datos ingresados cuando estos no son los deseados.
SI/AM	La tecla SI/AM permite avalar una opción del menú o colocar el Alter-Meridian en la configuración de la hora local del sistema.
NO/PM	La tecla NO/PM permite cancelar una opción del menú o colocar el Past-Meridian en la configuración de la hora local del sistema.
	La tecla flecha equivale a subir. Es utilizada para desplazarse en el menú en dirección ascendente.
	La tecla flecha equivale a bajar. Es utilizada para desplazarse en el menú en dirección descendente.

5.2.1 Interfaz de usuario. Para el ingreso de datos por parte del usuario el controlador dispone de un teclado plano de 16 dígitos distribuidos como se muestra en la tabla 2.

5.2.2 Funciones del menú del controlador. El controlador contiene un menú de funciones que le permite al usuario la configuración del sistema, la entrada y el despliegue de datos e información adicional acerca de los lotes ingresados. A continuación se hace una descripción de cada función del menú.

5.2.2.1 Actualizar fecha hora. Contiene dos submenús donde se puede configurar la hora y la fecha actual por separado.

5.2.2.2 Ingresar lote. Se ingresa la edad del lote(s) con el número de días, el sistema captura automáticamente la fecha de ingreso y la guarda junto con la edad en la memoria EEPROM del microcontrolador.

5.2.2.3 Cancelar lote. Se detiene la acción de control sobre el lote(s) especificado. Borra la edad y la fecha del lote(s) del sistema y la memoria EEPROM.

5.2.2.4 Edad y fecha actual del lote. Muestra la edad actual del lote(s), desde la fecha de ingreso.

5.2.2.5 Temperatura de las criadoras. Muestra la temperatura actual correspondiente a la criadora seleccionada, con su respectivo set point (temperatura de referencia del día).

5.2.2.6 Reporte de alarmas. Muestra los conflictos o problemas con los transmisores de temperatura y actuadores de las criadoras.

5.2.2.7 Configuración del sistema. Permite al usuario activar la criadora(s) que desea utilizar para un determinado lote(s).

Figura 43. Circuito electrónico del controlador de temperatura.

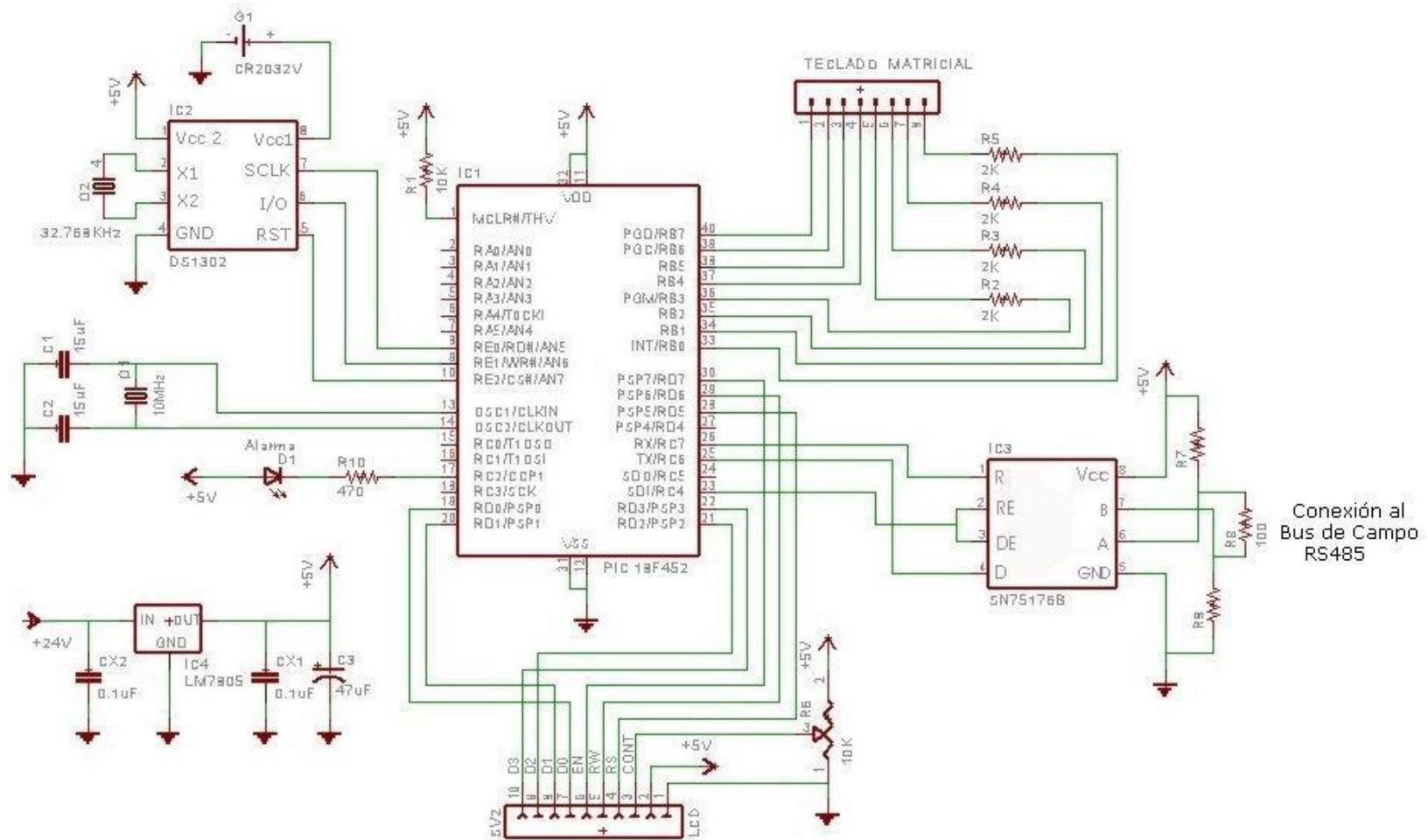


Figura 44. Controlador de temperatura embebido.

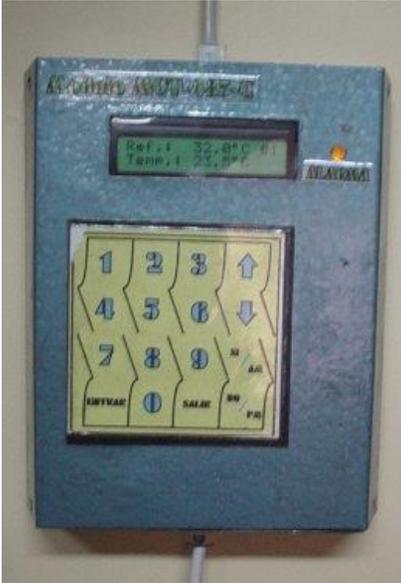
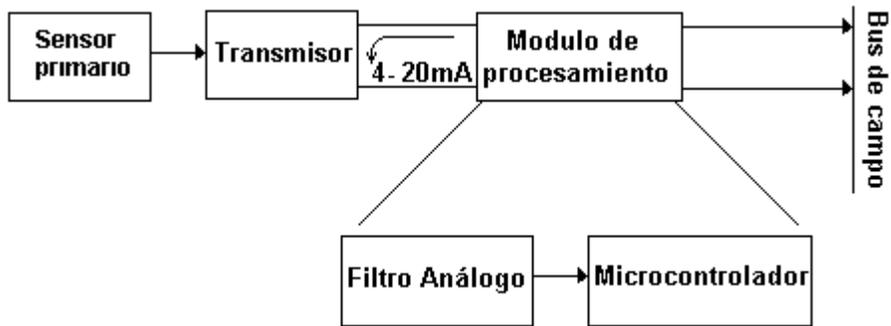


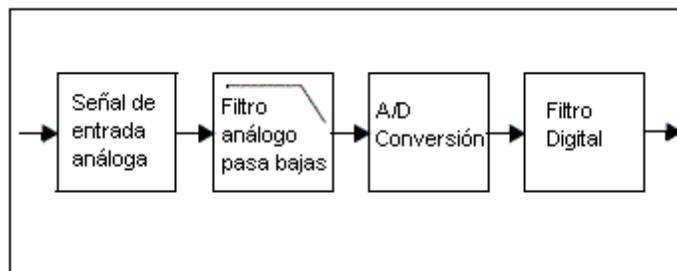
Figura 46. Diagrama de bloques del transmisor de temperatura



Para el sistema de adquisición de datos fue necesaria la implementación de un filtro análogo y un filtro digital, para eliminar cualquier componente de ruido de alta frecuencia sobre la señal análoga proveniente del transmisor de 4-20 ma.

Un esquema del sistema de adquisición montado se muestra en la figura 47.

Figura 47. Sistema de adquisición de datos.



Fuente: Baker, 1999.

Un filtro análogo puede eliminar ruido por picos extraños aplicados a la señal, antes de que llegue al conversor de análogo a digital del microcontrolador. Un filtro digital no puede eliminar picos de ruido en la señal análoga, pero esos picos pueden estar cerca del valor máximo de la escala de conversor análogo a digital saturando el modulo. Ya que un filtro digital se encuentra después del conversor A/D (análogo a digital) puede eliminar ruido inyectado durante el proceso de conversión, mientras que el análogo no.

Para el diseño del filtro antialiasing a la llegada de la señal del trasmisor de temperatura, se utilizó la herramienta FilterLab software (Figura 48 y 49), paquete computacional sin costo alguno que se puede encontrar en el sitio Web de la empresa MICROCHIP (Anexo A).

Los parámetros de diseño fueron:

- Frecuencia de corte: 5Hz
- Frecuencia de muestreo: 30Hz
- Resolución del convertor: 10 bits
- Proporción señal ruido (SNR): -61dB
- Tipo de filtro: Butterworth
- Orden del filtro: 7
- Atenuación en la banda de rechazo: 67.1dB

Figura 48. Respuesta en frecuencia del filtro antialiasing.

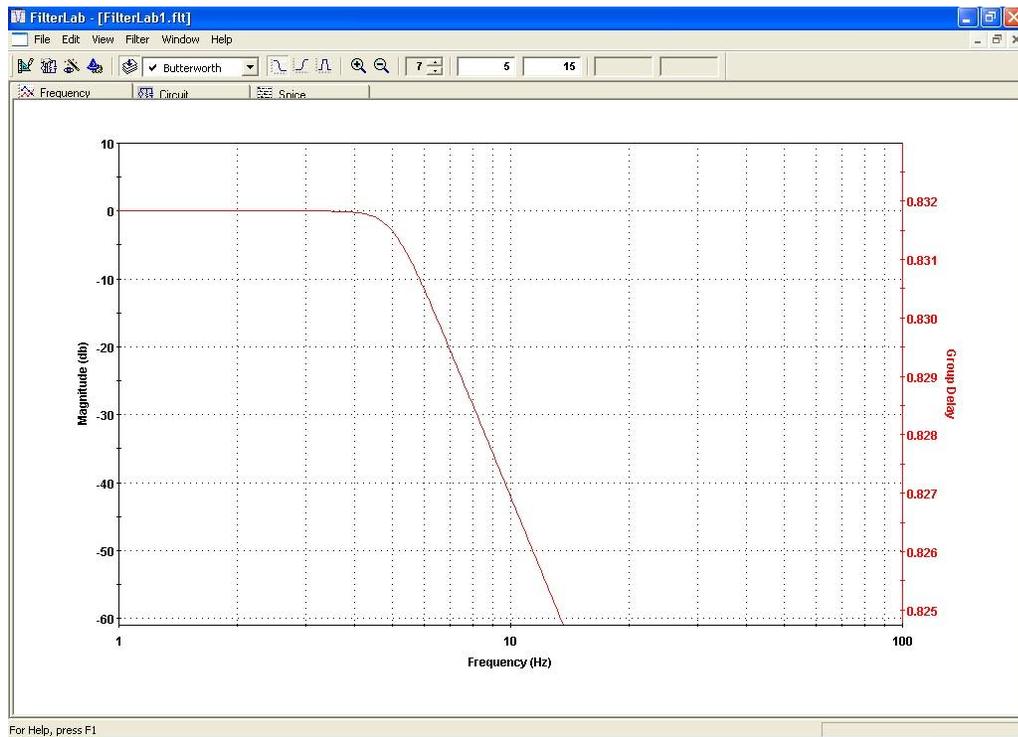
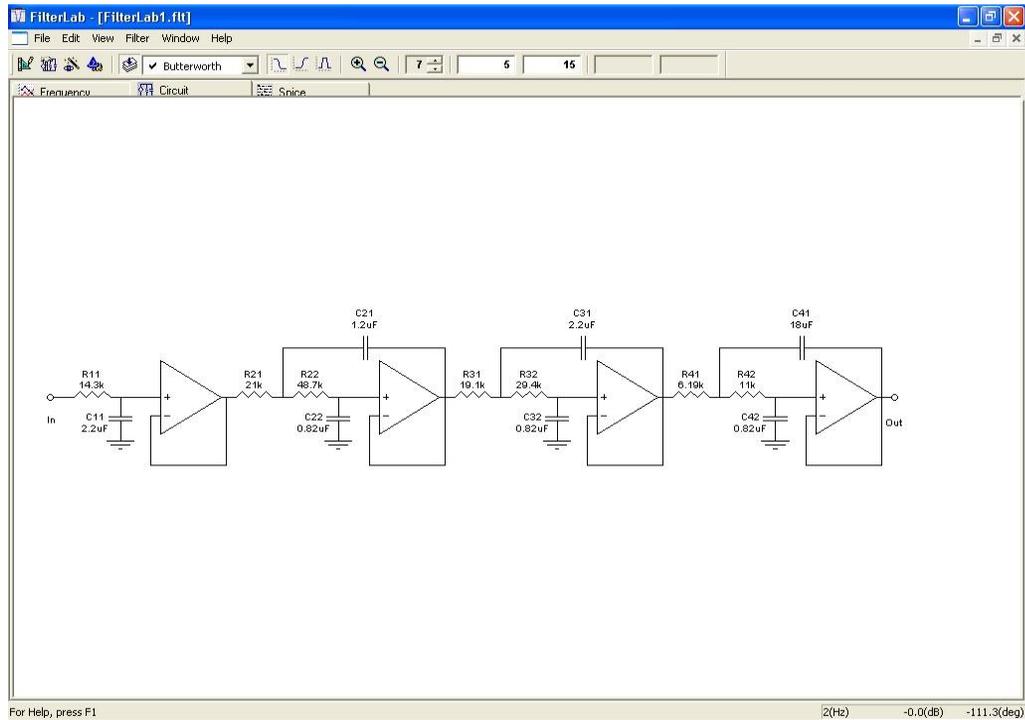


Figura 49. Circuito antialiasing



Para el diseño del filtro digital del transmisor de temperatura, se utilizó la herramienta dsPIC FD Lite software (Figura 50 y 51).., paquete computacional de la empresa MICROCHIP, que nos permite diseñar cualquiera de los dos tipos de filtro digital; el programa nos entrega: graficas para la respuesta del filtro, el código en C, y un archivo con extensión .dat donde nos entrega los valores de los coeficientes del filtro (Anexo B)

Los parámetros diseño fueron:

- Tipo de filtro: FIR
- Frecuencia de muestreo: 30Hz (es un proceso muy lento)
- Frecuencia pasa banda: 5Hz
- Frecuencia de rechazo de banda: 14Hz
- Rizo pasa banda (dB): 1
- Rizo rechazo de banda (dB): 3
- Longitud del filtro: 30 (coeficientes)

Figura 50. Respuesta en frecuencia del filtro FIR.

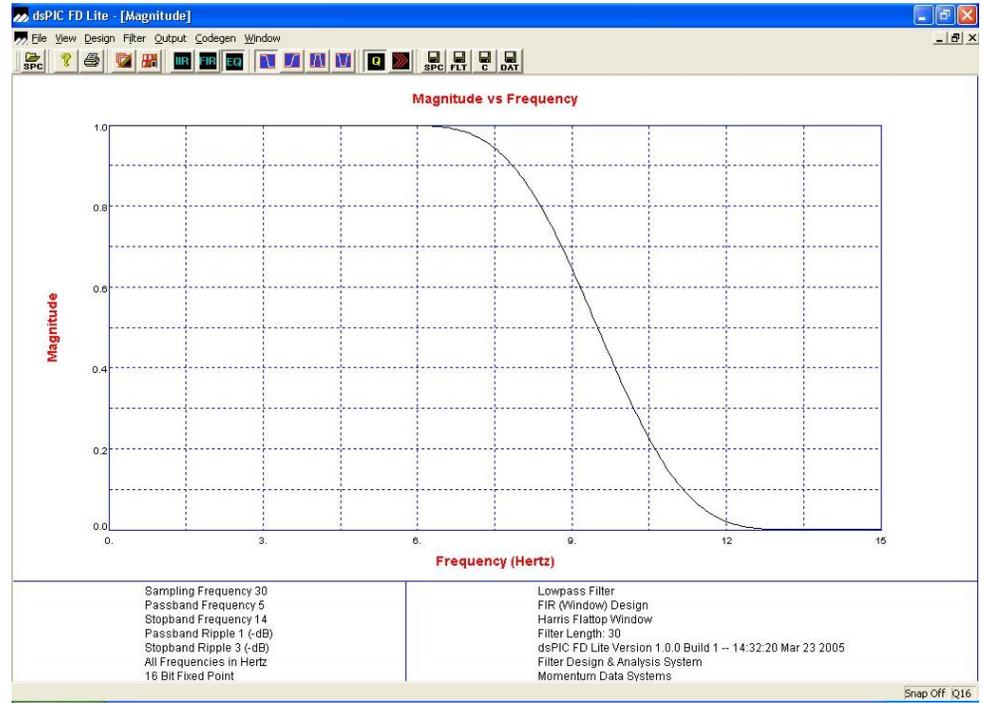
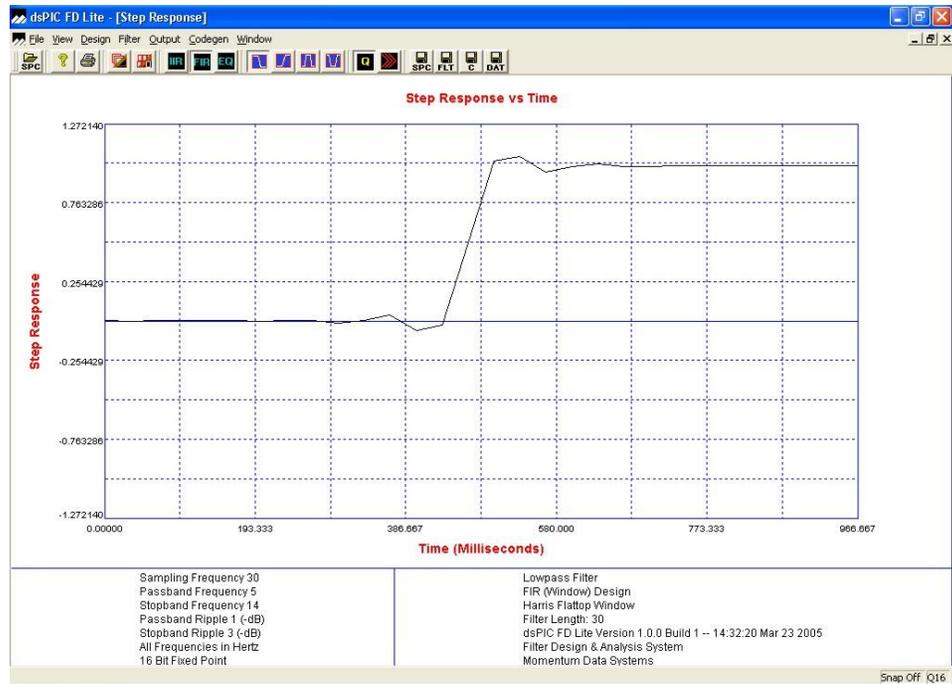


Figura 51. Respuesta al escalón del filtro FIR.



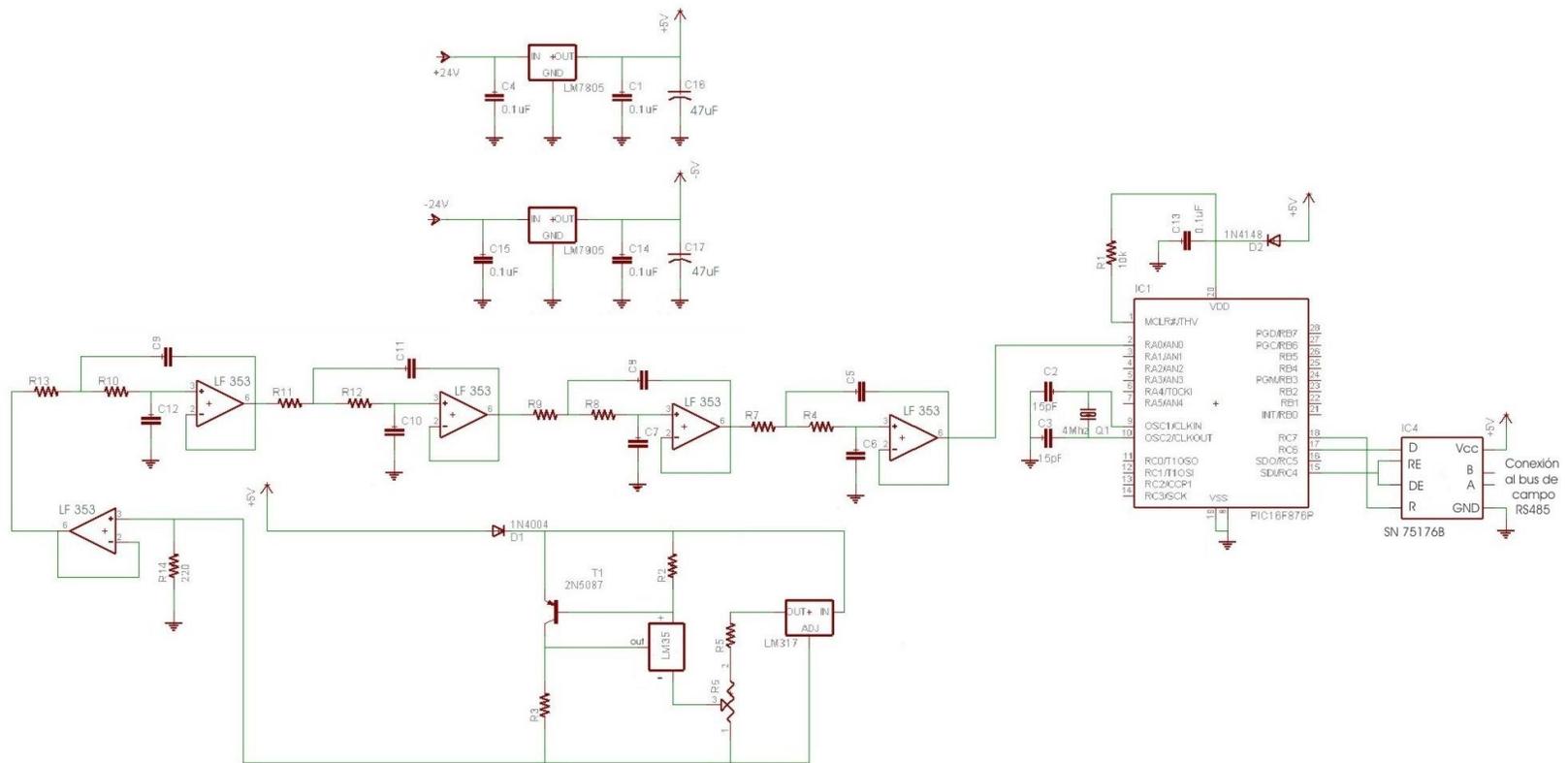
Para la comunicación a través del bus de campo cuenta con un transmisor – receptor SN75176B de Texas Instruments conectado a los pines de recepción y transmisión del microcontrolador RC7 y RC6. En el pin RC4 se encuentra conectado el habilitador de funciones del integrado para transmitir o recibir datos por los pines R y D del mismo (figura 53).

La figura 52. Muestra el montaje final del transmisor de temperatura

Figura 52. Transmisor de temperatura embebido.



Figura 53. Diagrama electrónico del transmisor de temperatura.



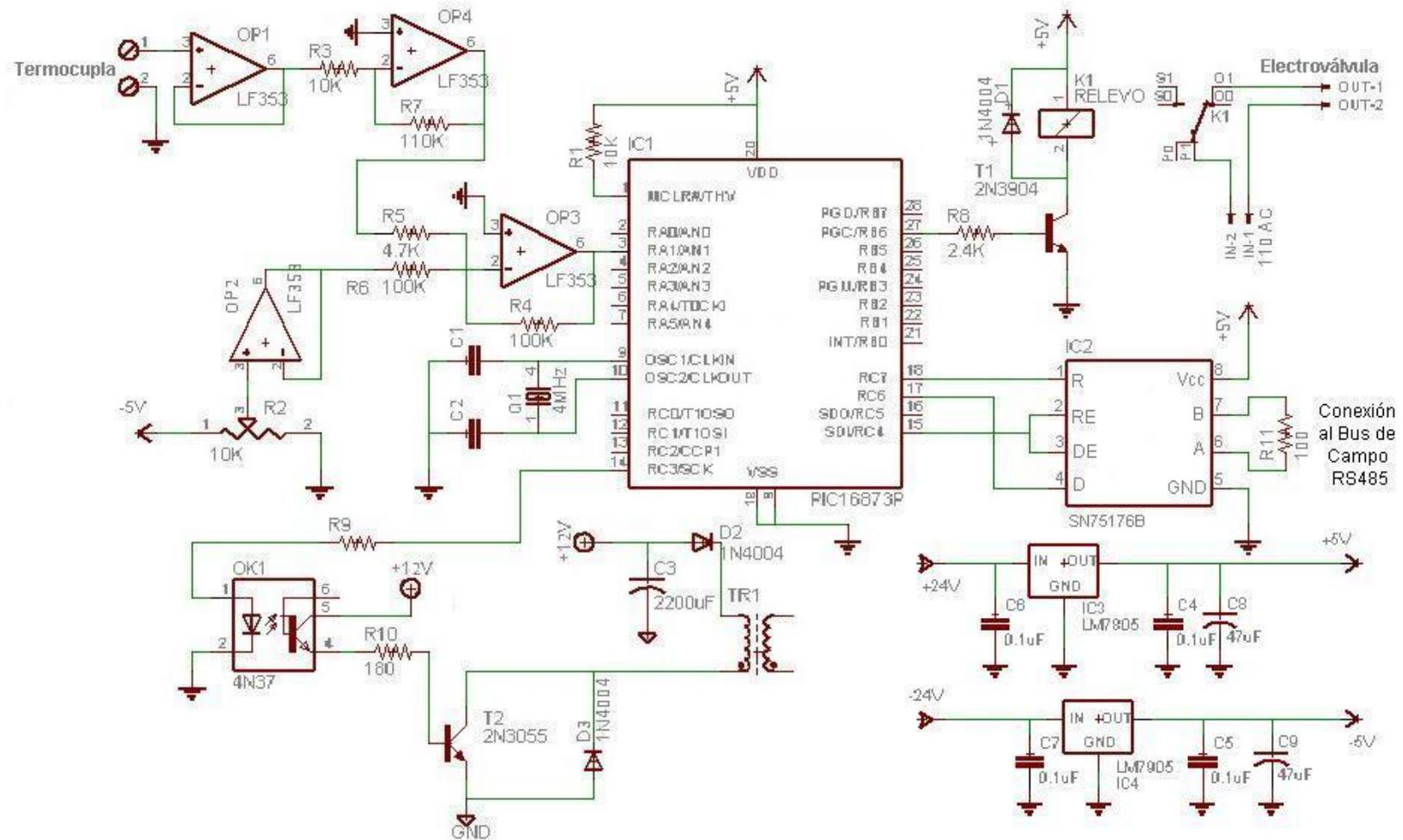
7. ACTUADOR A GAS

El actuador o elemento final de control manipula la variable de proceso de acuerdo a la acción calculada por el controlador.

El dispositivo actuador del sistema de control de temperatura se denomina “criadora a gas”, consiste de una electro válvula para el control de flujo de gas que se quemará en una campana que hace de cámara de radiación infrarroja. Esta es gobernada por un microcontrolador PIC16F873A, para su programación se utilizó la herramienta de desarrollo PICC de la empresa HI-TECH basada en ANSI C. Tiene como función recibir del bus de campo la acción de control del controlador para el encendido o apagado de la criadora a gas. Para el encendido de la criadora el microcontrolador cuenta con un circuito encargado de generar una chispa a una determinada frecuencia, por medio de una bobina de alta y una termocupla para detectar cuando la criadora esta encendida y así detener el generador de chispa. La termocupla esta directamente acoplada a la campana. Cuando se enciende la criadora la temperatura de la campana de metal aumenta, el microcontrolador tiene un umbral de temperatura preestablecido que al ser sobrepasado desactiva la generación de chispa. En caso de no ocurrir el encendido en la criadora el umbral no será sobrepasado; el microcontrolador da un tiempo suficiente para el encendido y una vez cumplido este tiempo detiene la generación de la chispa, cierra la electro válvula para detener el flujo de gas y envía un código de error al controlador para activar la alarma de fallo en la criadora para indicarle al usuario que debe realizar una revisión del sistema. El circuito electrónico del actuador se muestra en la figura 54.

Para la adquisición de la señal de la termocupla, se utilizo un amplificador operacional (OP1) en configuración de seguidor de voltaje para el acople de impedancia, luego la señal es amplificada en un factor de 12 (OP4). Para fijar el nivel de cero de señal, se utilizó un reóstato de $10K\Omega$ con su salida conectada a un seguidor de voltaje (OP2), luego la señal de la termocupla como la del reóstato son llevadas a un sumador (OP3) para su ajuste. La señal a la salida de OP3 es conectada al pin RA1 del microcontrolador para su posterior conversión de análogo a digital. Un filtro digital sencillo promedia 20 muestras de la señal cada 3 segundos para la eliminar ruido inducido en la señal y así sucesivamente hasta que la criadora enciende.

Figura 54. Circuito electrónico del actuador a gas.



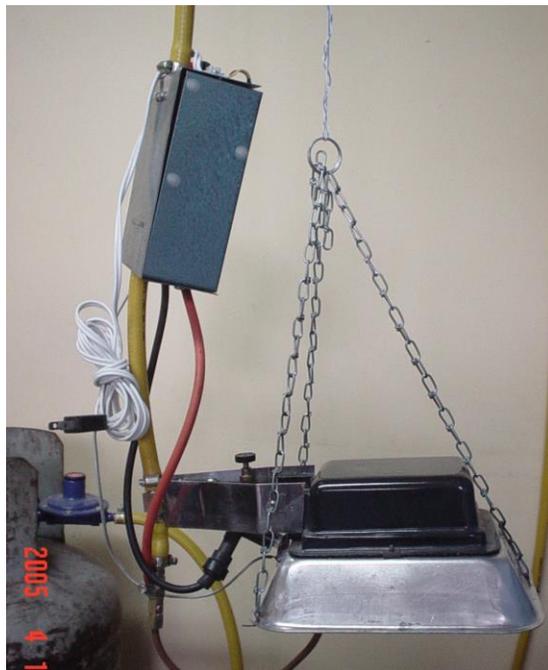
La señal encargada de generar la chispa proviene del pin RC3 que va conectada a un opto acoplador para separar la fuente de alimentación del microcontrolador de la fuente del circuito generador de chispa.

Para manejar la electro válvula el microcontrolador tiene conectado al pin RB6 un transistor en configuración corte y saturación para activar un relevo de 5 voltios encargado de conmutar la alimentación de corriente alterna de la electro válvula y así poder ejercer una acción de encendido y apagado de la criadora.

Para la comunicación a través del bus de campo cuenta con un trasmisor – receptor SN75176B de Texas Instruments conectado a los pines de recepción y transmisión del microcontrolador RC7 y RC6. En el pin RC4 se encuentra conectado el habilitador de funciones del integrado para transmitir o recibir datos por los pines R y D del mismo. Como el actuador a gas es el ultimo dispositivo conectado a bus, una resistencia de terminación es conectada entre los pines B y A del integrado.

La figura 55. Muestra el montaje final actuador a gas.

Figura 55. Actuador a gas



En la figura 56, se muestra el montaje total del sistema de control de temperatura por red de bus de campo.

Figura 56. Sistema de control de temperatura por red de bus de campo embebido.



8 PRUEBAS DE CAMPO

Las pruebas del sistema de control de temperatura se realizaron en un galpón ubicado en la zona rural de Tuluá durante un periodo de un mes. Esta prueba se realizó sin animales debido a la depuración de cada uno de los equipos que componen el sistema de control.

El funcionamiento del equipo se evaluó en diferentes etapas. Primero se calibró la medición del transmisor de temperatura en el galpón con referencia a un termómetro digital comercial. Así mismo se revisó que el valor medido se enviara correctamente del transmisor de temperatura hacia el controlador por el bus de campo. Luego se actualizó la fecha y la hora del controlador, se configuró la criadora de gas a utilizar y se ingresó una edad supuesta (1 día) de un lote de animales. Posteriormente se verificó que la temperatura de referencia (**set point**) del controlador coincidiera con la temperatura correspondiente a la edad del lote según la tabla 1. A continuación se revisó que la criadora a gas encendiera cuando la temperatura del galpón se encontrara por debajo de la temperatura de referencia, y se apagara cuando la temperatura se encontrara por encima de la temperatura de referencia. Estas pruebas se realizaron durante las 24 horas del día durante todo el mes; en el transcurso de los días se verificó que la temperatura de referencia correspondiera a la temperatura dada en la tabla 1 según la edad del lote de animales.

Durante el transcurso de las pruebas se corrigieron errores como: calibración en la medición del transmisor de temperatura, problemas en el encendido de la criadora a gas (mejoramiento de la chispa de encendido), ajustes en la red de bus de campo (conexiones), corrección de los algoritmos de control y funciones del menú del controlador.

9 CONCLUSIONES

La temperatura es la variable mas critica en la conversión alimenticia del animal dedicado a la explotación comercial, por esto es necesario un estricto control de la misma para asegurar los mejores índices de conversión alimenticia para aumentar la producción de carne. El presente trabajo provee una solución adecuada a esta necesidad.

El sistema de control de temperatura por bus de campo diseñado e implementado en el presente trabajo, proporciona los rangos adecuados de temperatura para cada una de las semanas durante toda la etapa de cría de los animales, aplicable a tres subsectores el avícola, el porcícola y el de avestruces.

El uso de dispositivos programables como los microcontroladores permite la reducción de hardware y la implementación de algoritmos de control con gran facilidad y confiabilidad. El bajo costo de estos dispositivos lo hace ideal para contar con un sistema de control económico para el productor pecuario nacional.

La utilización de un lenguaje estructurado como el PICC 18 y el PICC basado en ANSI C para la programación de microcontroladores, permite la modularización del programa, ahorro de la memoria de datos y tiempo de desarrollo, facilita implementación de funciones matemáticas y el uso de punto flotante.

La implementación de una red de bus de campo permitió el envío de la señal de temperatura desde un sitio remoto hasta el controlador y a su vez el envío de la señal de control al actuador. Además permite expandir el sistema de control agregando nuevos dispositivos a la red, para cubrir nuevas zonas de calefacción dentro del sitio de cría de los animales siendo controladas desde un mismo controlador.

La implementación de tecnología nacional especifica para las condiciones de nuestro país es esencial para que el sector pecuario sea pujante y competitivo frente los mercados internacionales.

Se diseño y se construyo un controlador de temperatura de tipo encendido – apagado, por el bajo costo del actuador a gas al utilizar una electrovalvula **on - off** siendo esta la encargada de controlar el paso del flujo de gas. Por otro lado la implementación de un controlador PID necesitaría una electrovalvula proporcional que aumentaría considerablemente el costo del actuador a gas.

BIBLIOGRAFÍA

ANANTHA RAMU, B. K. Implementing FIR and IIR Digital Filters Using PIC18 Microcontrollers [online]. [India]: Microchip Technology Designs. [2002]. Disponible en internet: www.microchip.com.

AVIAN faros. Últimos conocimientos de cómo regular la temperatura en pollos de engorde. [online]. [Venezuela]. [2001]. Disponible en Internet: www.ppca.com.ve

AVILÁN Héctor. Principios básicos en la cría del Cerdo. [online]. [Venezuela]. [2001]. Disponible en Internet: www.ppca.com.ve

B&B Electronics. RS-422 and RS-485 Application Note [online]. Disponible en Internet: www.bb-elec.com.

CRIGASTUY Inversiones. Criadoras a gas. [online]. [Venezuela]. [2001]. Disponible en Internet: www.ppca.com.ve

DIAZ TAPIA Nelson. Transferencia de calor [online]. Disponible en Internet: www.monografias.com/trabajos15/transf-calor/transf-calor.shtml

ECHEVARRÍA, Alberto I. y MIAZZO, Raúl. El ambiente en la producción animal [online]. Argentina: Facultad de Agronomía y Veterinaria, Universidad Nacional de Río Cuarto, 2002. Disponible en Internet: www.produccionbovina.com/informacion_tecnica/clima_y_ambientacion/01-el_ambiente_en_la_produccion_animal.htm

EUREPGAP. Puntos de control y criterios de cumplimiento aseguramiento integrado de fincas. [online]. [Alemania]. Disponible en Internet: www.oia.com.ar/normas_ifa/EUREPGAP_CPCC_IFA_V1-1Jan04_PigAnnex-SP.pdf

FARM SAFETY Asociation. Guía general para avicultura. [online]. [Venezuela]. [2001]. Disponible en Internet: www.ppca.com.ve

FLOREZ MARULANDA, Juan Fernando. Especialización en informática industrial control inteligente. Colombia, 2002.

GINGERICH, Kevin. Failsafe in RS-485 Data Buses. [online]. [Texas]: Texas Instruments Incorporated. [2004]. Disponible en internet: www.ti.com.

GOLDIE, John. Ten Ways to Bulletproof RS-485 Interfaces [online]. National Semiconductor. [October 1996]. Disponible en internet: www.national.com.

Hired Hand. Disponible en Internet: www.hired-hand.com.

HOLGUÍN ZAMORANO, Germán *et al.* Desarrollo agropecuario y rural: la estrategia. Cali: Universidad ICESI, 2001. p. 137-140.

KEPHART Kenneth. Manejo de los lechones. [online]. Estados Unidos: Universidad Estatal de Pennsylvania, 2001. Disponible en Internet: www.pcca.com.ve

MALONEY, Timothy J. Electrónica Industrial moderna. México: prentice hall. p. 295-296.

MODBUS organization. MODBUS over serial line specification and implementation guide V1.0 [online]. [February 2002]. Disponible en internet: www.modbus.org. OGATA, Katsuhiko. Ingeniería de control moderna. México: prentice hall, 1998. p 211

OROZCO V Rafael I. Aislantes térmicos por reflectividad y barrera de vapor. [online]. [Venezuela]. [2001]. Disponible en Internet: www.pcca.com.ve

_____. Ambiente controlado en galpones avícolas. [online]. [Venezuela]. [2001]. Disponible en Internet: www.pcca.com.ve

P. LACY Michael, LARRY R. Vest. Mejorando la conservación alimenticia en pollos de engorde una guía para los productores [online]. [Venezuela]. [2001]. Disponible en Internet: www.pcca.com.ve

PACINO antonio. Transformando el galpón tradicional en ambiente controlado. [online]. [Venezuela]. [2001]. Disponible en Internet: www.ppca.com.ve

SOLTERO, Manny, ZHANG, Jing and COCKRILL, Chris. 422 and 485 Standards Overview and System Configurations [online]. [Texas]: Texas Instruments Incorporated. [june 2002]. Disponible en internet: www.ti.com.

UGARTE JUJOR Ator. La producción de avestruz ¿Es avicultura o ganadería? [online]. [Venezuela]. [2001]. Disponible en Internet: www.ppca.com.ve

URDA CARRASCO, Diego. Protocolo modbus [online]. [Marzo 2003]. Disponible en Internet: www.step.es/personales/durda/Download_zone/Own/PI_MBUS_300-RevJ-sp0.pdf

VENEZUELA Avícola. Avestruces Magdaleno C.A. [online]. [Venezuela]. [2001]. Disponible en Internet: www.ppca.com.ve

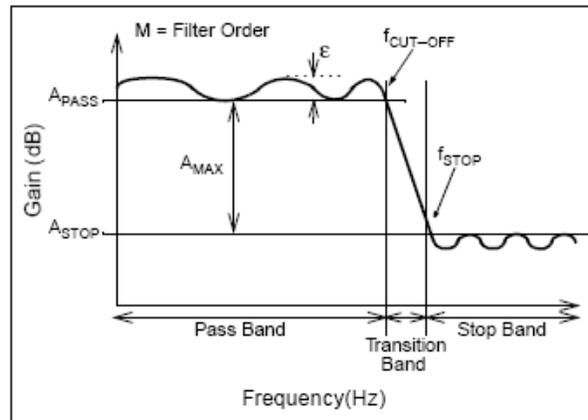
VENEZUELA Avícola. Convirtiendo lo tradicional a lo moderno. [online]. [Venezuela]. [2005]. Disponible en Internet: www.ppca.com.ve

VENEZUELA Avícola. Manejo de la incubación de huevos de avestruz. [online]. [Venezuela]. [2005]. Disponible en Internet: www.ppca.com.ve

Anexo A. Filtro análogo.

Para el diseño de un filtro pasa bajas análogo se deben tener en cuenta cuatro parámetros: frecuencia de corte ($f_{\text{cut-off}}$), frecuencia de parada (f_{stop}), amplitud máxima (A_{max}) y orden del filtro (M) como se muestra en la figura 57.

Figura 57. Parámetros claves para el diseño de un filtro análogo.



Fuente: Baker, 1999.

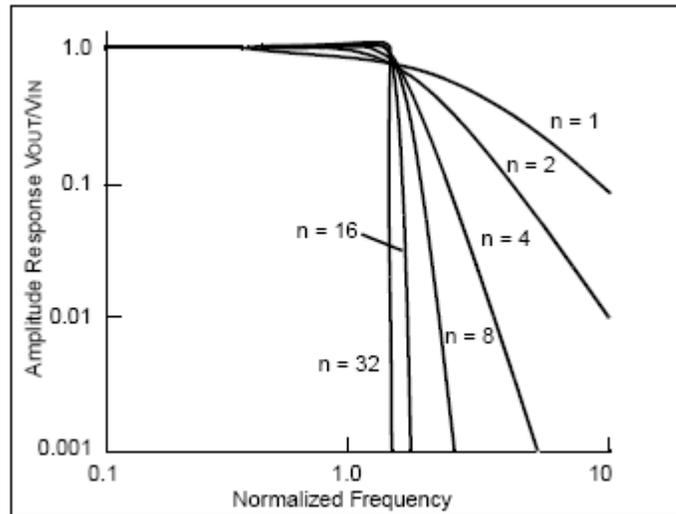
Por definición un filtro pasa bajas deja pasar frecuencias por debajo de la frecuencia de corte ($f_{\text{cut-off}}$) y atenúa las altas frecuencias que están por encima de la frecuencia de corte. Un parámetro importante es la ganancia máxima del filtro (A_{max}), esta es definida como la diferencia entre la ganancia en la región de paso (A_{pass}) y la ganancia que es alcanzada en la región de parada (A_{stop}) o $A_{\text{max}} = A_{\text{pass}} - A_{\text{stop}}$.

En el caso donde un filtro tenga un rizo en la banda de paso, la ganancia (A_{pass}) esta definida por el valor mínimo del rizo. La frecuencia de la banda de parada (f_{stop}) es la frecuencia en la cual se alcanza una atenuación mínima. Aunque es posible que la banda de parada tenga un rizo, la mínima ganancia (A_{stop}) de este rizo esta definida por el pico mas alto.

La respuesta del filtro va mas halla de la frecuencia de corte, esta cae a través de la banda de transición de la región de parada. El ancho de la banda de transición esta determinado por el diseño del filtro (**Butterworth, Bessel, Chebyshev**, etc.) y el orden del filtro (M). Generalmente la banda de transición será mas pequeña

entre más polos sean usados al implementar el filtro. Esto se puede observar en la figura 58, con filtro tipo **Butterworth**, donde n es el número de polos.

Figura 58. Respuesta de un filtro Butterworth para diferente número de polos.



Fuente: Baker, 1999.

Los filtros análogos más populares son: Butterworth, Bessel y Chebyshev, para su diseño bastan los cuatro parámetros mencionados anteriormente.

Para el transmisor de temperatura se utilizó un filtro antialiasing, basado en un filtro Butterworth, este filtro tiene la siguiente función de transferencia:

$$V_{\text{salida}} / V_{\text{entrada}} = G / (a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + a_2 s^{n-2} \dots a_{n-1} s + a_n + 1)$$

donde G es igual a la ganancia del sistema.

La siguiente tabla muestra los coeficientes del denominador para el diseño del filtro. Teóricamente el orden del filtro puede ser infinito, la tabla solo lista los coeficientes a hasta un filtro de 5to orden.

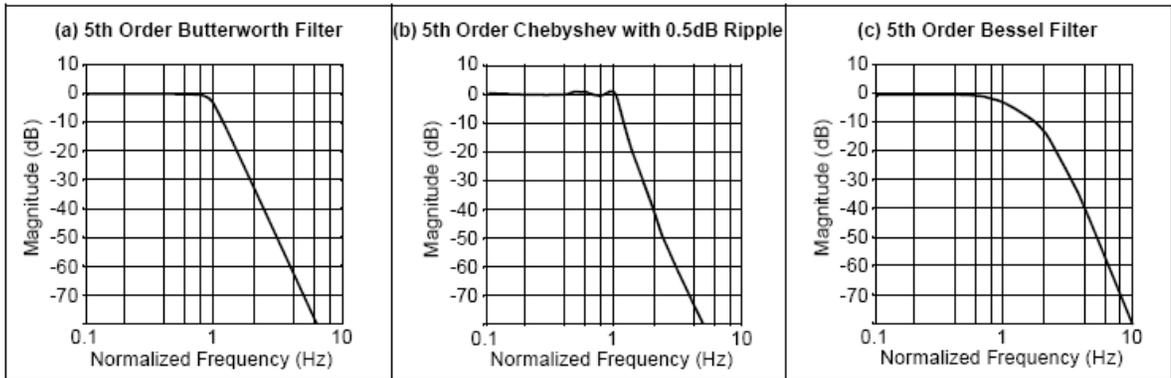
Tabla 3. Coeficientes vs. Orden del filtro.

M	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
2	1.0	1.4142136			
3	1.0	2.0	2.0		
4	1.0	2.6131259	3.4142136	2.6131259	
5	1.0	3.2360680	5.2360680	5.2360680	3.2360680

Fuente: Baker, 1999.

La diferencia entre las respuestas de los filtros de 5to orden Butterworth, Bessel y Chebyshev se puede apreciar en la figura 59.

Figura 59. Respuesta a la frecuencia de los filtros más populares.



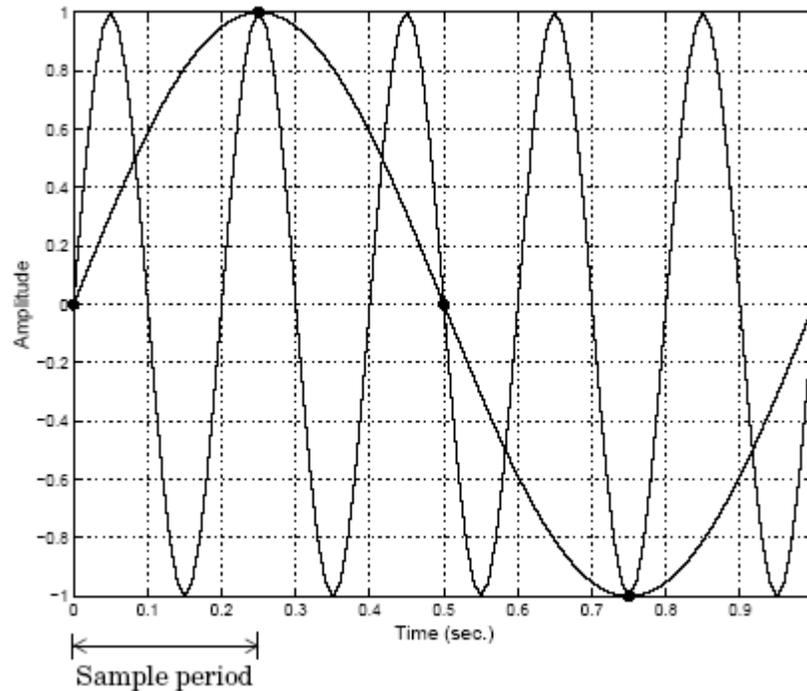
Fuente: Baker, año.

Cuando vamos a utilizar un convertor A/D del microcontrolador o cualquier otro convertor, para realizar un muestreo de una señal análoga, se debe tener en cuenta la frecuencia de muestreo (f_s) para el diseño del filtro análogo, y así evitar el fenómeno de aliasing. El aliasing ocurre cuando la señal muestreada contiene componentes de frecuencia mayores que la mitad de la frecuencia de muestreo. La regla usada para prevenir el aliasing está dada por el teorema de Nyquist, que nos dice que todas las señales continuas con una frecuencia menor que $f_s/2$, son digitalizadas confiablemente.

Por ejemplo, suponga que se configura el convertor A/D del microcontrolador para muestrear a una tasa de 4 muestras por segundo (4Hz) y la señal de interés es una onda seno de 1Hz. Dado que la frecuencia de la señal es un cuarto de la tasa de muestreo, entonces de acuerdo al teorema de Nyquist, esta onda será

completamente caracterizada. Sin embargo, si una onda seno de 5Hz esta presente también, entonces las dos señales no pueden ser distinguidas. En otras palabras la onda seno de 1Hz tendrá el mismo muestreo que la onda seno de 5Hz cuando son muestreadas a 4Hz, como se aprecia en la figura 60.

Figura 60. Efecto del **Aliasing**.



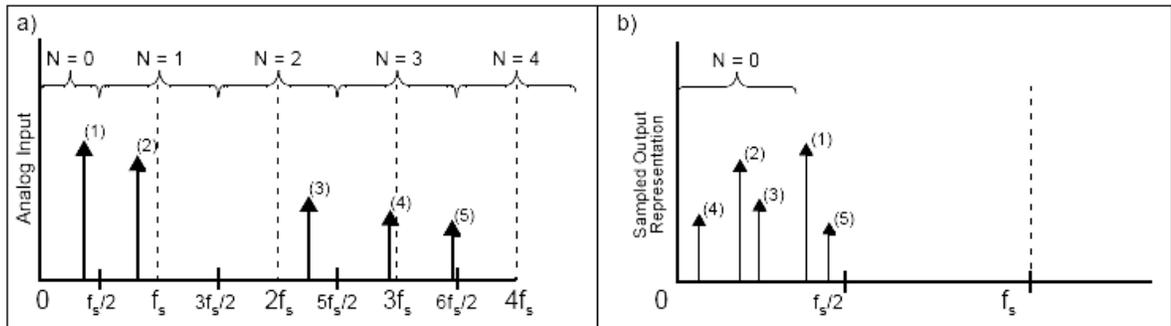
Fuente: MathWorks, 2002.

En el dominio de la frecuencia también podemos observar este fenómeno, como se muestra a continuación.

En ambas partes de la figura el eje x identifica la frecuencia de muestreo f_s del sistema. En la parte (a) de la figura 61, se identifican cinco segmentos de la banda de frecuencia. El segmento $N = 0$ va hasta la mitad de la rata de muestreo ($f_s/2$); en este ancho de banda, el sistema de muestreo registra confiablemente el contenido de la señal de entrada análoga. En los segmentos donde $N > 0$, el contenido de la frecuencia de la señal análoga será registrado en el ancho de banda del segmento $N = 0$ como se aprecia en la parte (b) de la figura 61. En pocas palabras las señales con frecuencias por debajo de $f_s/2$ serán digitalizadas confiablemente, mientras que las señales con frecuencias mayores de $f_s/2$

presentaran aliasing y aparecerán como señales de baja frecuencia en la salida digital.

Figura 61. Fenómeno del aliasing en el dominio de la frecuencia.



Fuente: Baker, 1999.

Matemáticamente estas altas frecuencias se representan de la siguiente manera:

$$f_{ALIASED} = |f_{IN} - Nf_s|$$

Por ejemplo, la rata de muestreo de un sistema es igual a 100KHz y las frecuencias de entrada son:

$$\begin{aligned} f_{IN}(1) &= 41\text{KHz} \\ f_{IN}(2) &= 82\text{KHz} \\ f_{IN}(3) &= 219\text{KHz} \\ f_{IN}(4) &= 294\text{KHz} \\ f_{IN}(5) &= 347\text{KHz} \end{aligned}$$

La salida muestreada contiene exactamente información de la amplitud de todas las señales de entrada, pero sin embargo cuatro de los términos presentan aliasing dentro del rango de frecuencias de DC a $f_s/2$ o de DC a 50KHz. Utilizando la ecuación anterior para la frecuencia de salida tenemos:

$$f_{OUT}(1) = |41\text{KHz} - 0 \times 100\text{KHz}| = 41\text{KHz}$$

$$f_{OUT}(2) = |82\text{KHz} - 1 \times 100\text{KHz}| = 18\text{KHz}$$

$$f_{OUT}(3) = |219\text{KHz} - 2 \times 100\text{KHz}| = 19\text{KHz}$$

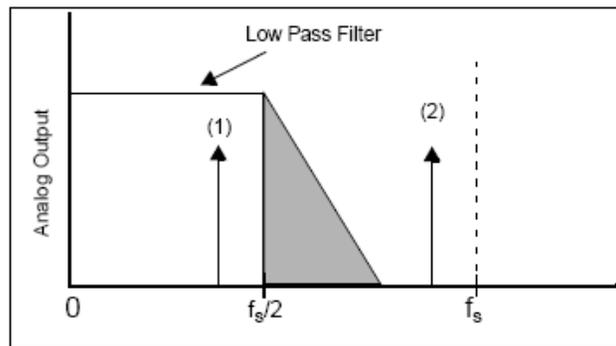
$$f_{OUT}(4) = |294\text{KHz} - 3 \times 100\text{KHz}| = 6\text{KHz}$$

$$f_{OUT}(5) = |347\text{KHz} - 4 \times 100\text{KHz}| = 53\text{KHz}$$

Se puede apreciar que todas las frecuencias de las señales se encuentran entre DC y $f_s/2$.

Este fenómeno puede ser eliminado o reducido al mínimo usando un filtro pasa bajas antes del convertor A/D, como lo muestra la figura 62.

Figura 62. Señal de salida de un filtro pasa bajas.



Fuente: Baker, 1999.

El filtro pasa bajas atenúa la segunda porción de la señal de entrada a la frecuencia (2). Como resultado esta señal no presentara aliasing en la salida del muestreo. En la figura se puede observar dos regiones del filtro pasa bajas, la región de la izquierda se encuentra dentro del ancho de banda de DC a $f_s/2$, la segunda región sombreada muestra la banda de transición del filtro. Ya que en esta banda se encuentran frecuencias mayores que $f_s/2$, las señales con este rango de frecuencias presentaran aliasing a la salida del muestreo. Para minimizar este efecto se puede escoger la frecuencia de corte menor que $f_s/2$ o incrementar el orden del filtro para tener una mayor atenuación de la señal. En ambos casos la ganancia mínima del filtro, A_{STOP} , en $f_s/2$ debe ser menor que la SNR (proporción - señal - ruido) del sistema de muestreo.

Anexo B. Filtro digital

Un filtro digital usa un procesador digital para realizar cálculos numéricos sobre la señal muestreada. Para que una señal de voltaje o corriente pueda ser filtrada, debe convertirse a números digitales para realizar los cálculos pertinentes. Así un conversor A/D es usado para transformar el voltaje o corriente a números. Este proceso de convertir la señal a números digitales involucra dos procesos conocidos como: muestreo y cuantización.

El muestreo es el proceso de sensado de la señal análoga en intervalos de tiempo discreto. La cuantización es el proceso de convertir el voltaje análogo sensado a valores discretos; note que con la cuantización, los valores de la señal son aproximados a valores finitos. Después del muestreo y la cuantización la señal se encuentra en una secuencia de números.

Examinemos ahora el efecto de la computación en una secuencia de números como ..., 1, 2, 1, 2, 1, 2, 1,..... Esta secuencia representa una señal análoga de una onda triangular, si cada valor muestreado es multiplicado por una constante k el resultado de la secuencia será ..., k , $2k$, k , $2k$, k ,..... Realizando este calculo, el modelo de la secuencia no se altera, sin embargo los valores de la escala pueden resultar en una amplificación ($k > 1$) o en una atenuación ($k < 1$).

La relación de muestreo entre la salida y la entrada en el ejemplo anterior se puede representar por la siguiente ecuación:

$$y[n] = k \times x[n]$$

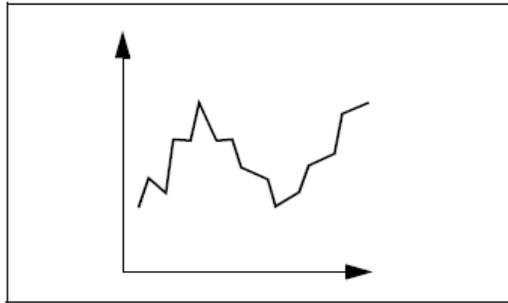
Donde $x[n]$ representa la "n" entrada muestreada y $y[n]$ representa la "n" salida muestreada. En esta ecuación se considero solamente una entrada muestreada para computar la salida. Este filtro tiene una longitud 1, hay solamente un coeficiente cuyo valor es k .

Ahora dos muestras anteriores son usadas con una muestra actual, como se muestra en esta ecuación:

$$y[n] = \frac{1}{3}x[n-2] + \frac{1}{3}x[n-1] + \frac{1}{3}x[n]$$

Tres valores de entrada son utilizados para el computo, este filtro es de longitud 3. El resultado de la ecuación anterior da una secuencia de números que van a fluctuar con el valor promedio de las dos muestras anteriores y una muestra actual. Cuando se presente ruido en la señal, como se aprecia en la figura 63.

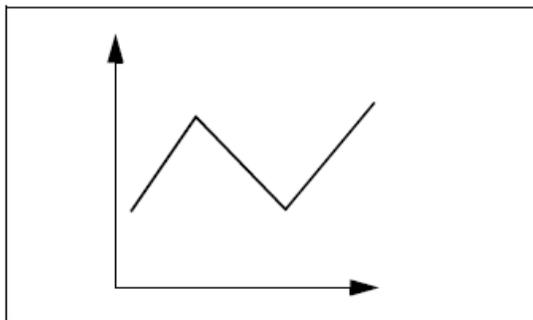
Figura 63. Señal cubierta de ruido.



Fuente: Anantha Ramu, 2002.

El calculo anterior puede remover el ruido montado en la señal al hacer uso del promedio, como se muestra en la figura 64.

Figura 64. Señal filtrada



Fuente: Anantha Ramu, 2002.

Si en lugar de dos muestreos, un número mayor de muestras anteriores son consideradas, entonces la secuencia de números de la salida permanece casi constante, lo cual representa la componente de DC de la señal de entrada. El resultado de este computo es un filtro pasa bajas.

En términos generales un filtro digital toma una secuencia de números $x[n]$, realiza cálculos sobre esos números y el resultado de la salida de esos cálculos es otra secuencia de números $y[n]$. En general la secuencia de salida se puede expresar como:

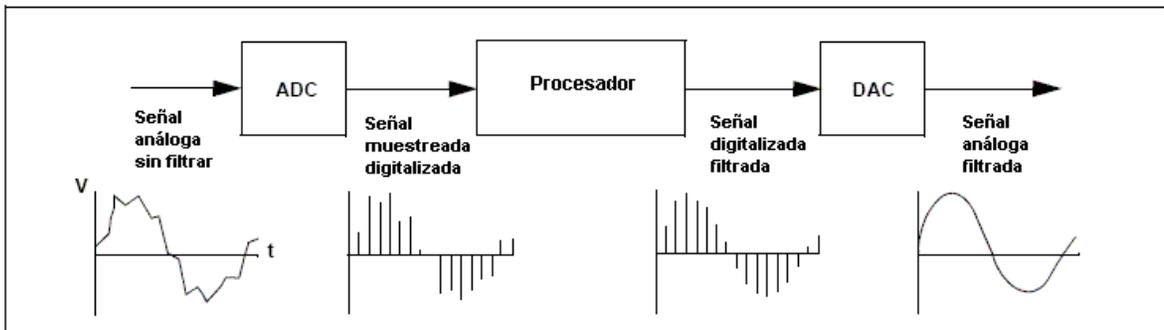
$$y[n] = a_0x[n] + a_1x[n-1] + \dots + a_Mx[n-M] + b_1y[n-1] + b_2y[n-2] + \dots + b_Ny[n-N] \quad (1)$$

donde, a_0, a_1, \dots, a_M y b_1, b_2, \dots, b_N , son constantes llamadas coeficientes del filtro; $M+1$ y N son el número de entradas y salidas muestreadas para el cálculo.

Note que con las muestras de entrada anteriores y la actual, se han incluido las muestras de salida anteriores ($\dots y[n-1], y[n-2], \dots$) para el cálculo de la salida actual.

En general la forma de procesar una señal usando un filtro digital se muestra en la figura 65.

Figura 65. Procesamiento de la señal usando un filtro digital.



Fuente: Anantha Ramu, 2002.

Para elegir el tipo de filtro a implementar nos basamos en la ecuación (3), si los coeficientes de b_1 a b_N son todos cero, la salida $y[n]$ no depende de las muestras de salida anteriores. En este caso, el tipo de filtro es un FIR (respuesta de impulso finito). Si uno de los coeficientes de b_1 a b_N no es cero, el tipo de filtro es IIR (respuesta de impulso infinito). Para el filtro FIR, la secuencia de coeficientes a_0, a_1, \dots, a_M , también representa la respuesta del filtro para un impulso unitario.

Las ventajas del filtro FIR son:

- Pueden ser diseñados para tener una respuesta de fase lineal con respecto a la frecuencia, mientras que los filtros IIR no tienen una respuesta de fase lineal.
- Siempre son estables, diferente de los filtros IIR.

Las desventajas de los filtros FIR sobre los IIR son:

- Los filtros FIR toman relativamente mayor memoria y tiempo de computación.
- Los filtros IIR requieren menos coeficientes para filtrar una señal con una frecuencia de corte específica que los FIR.