

Microcontrolador Freescale 68HC11

Convertidor Analógico - Digital

Iván Cabrera Altamirano
`ivan.cabrera@embedded.com.mx`

Diciembre 3, 2009

Índice

- 1 Introducción
- 2 Conceptos
- 3 Tipos de convertidores
- 4 Motorola 68HC11: convertidor analógico - digital
- 5 Ejemplo práctico
- 6 Consideraciones de diseño
- 7 Referencias

¿Qué es un convertidor analógico - digital?

¿Qué es un convertidor analógico - digital?

Definition

Un convertidor analógico - digital es un dispositivo electrónico que traduce una entrada análoga en un palabra digital equivalente. Esta representación digital de una señal del mundo real puede ser manipulada para propósitos de procesamiento, cómputo, transmisión de datos o implementación de un sistema de control.

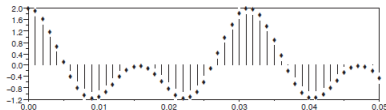
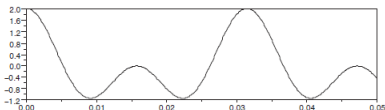


Figura: (a) Señal analógica. (b) Señal digital.

¿Para qué me sirve un convertidor analógico - digital?

¿Para qué me sirve un convertidor analógico - digital?

- Proveer información de entrada a sistemas de control a través de sensores con salida analógica.
(e.g. temperatura, luminosidad, humedad, presión, etc).

¿Para qué me sirve un convertidor analógico - digital?

- Proveer información de entrada a sistemas de control a través de sensores con salida analógica.
(e.g. temperatura, luminosidad, humedad, presión, etc).
- Medir voltaje/corriente en sistemas alimentados a baterías.

¿Para qué me sirve un convertidor analógico - digital?

- Proveer información de entrada a sistemas de control a través de sensores con salida analógica.
(e.g. temperatura, luminosidad, humedad, presión, etc).
- Medir voltaje/corriente en sistemas alimentados a baterías.
- Adquirir datos en sistemas de instrumentación.
(e.g. osciloscopios, analizadores lógicos, etc).

- Voltaje de entrada: es el voltaje a medir.

- Voltaje de entrada: es el voltaje a medir.
- Voltaje de referencia: es el voltaje utilizado en el proceso de conversión y que sirve como referencia máxima.

- Voltaje de entrada: es el voltaje a medir.
- Voltaje de referencia: es el voltaje utilizado en el proceso de conversión y que sirve como referencia máxima.
- Tamaño de palabra: Longitud de la palabra digital resultante.

- Rango: Son los límites dentro de los cuales el convertidor puede operar. Es la diferencia entre los voltajes de referencia alto y el voltaje de referencia bajo.

- Rango: Son los límites dentro de los cuales el convertidor puede operar. Es la diferencia entre los voltajes de referencia alto y el voltaje de referencia bajo.

$$\text{Rango} = \text{VoltajeReferenciaAlto} - \text{VoltajeReferenciaBajo} \quad (1)$$

- Rango: Son los límites dentro de los cuales el convertidor puede operar. Es la diferencia entre los voltajes de referencia alto y el voltaje de referencia bajo.

$$\text{Rango} = \text{VoltajeReferenciaAlto} - \text{VoltajeReferenciaBajo} \quad (1)$$

- Resolución: Es la cantidad de voltaje representada por un bit.

- Rango: Son los límites dentro de los cuales el convertidor puede operar. Es la diferencia entre los voltajes de referencia alto y el voltaje de referencia bajo.

$$Rango = VoltajeReferenciaAlto - VoltajeReferenciaBajo \quad (1)$$

- Resolución: Es la cantidad de voltaje representada por un bit.

$$Resolucion = \frac{Rango}{2^{TamanodePalabra}} \quad (2)$$

El primer paso de la digitalización de una señal es muestrearla. El muestreo consiste en recopilar los valores de la señal (ya sea audio, voz, música, etc.) en instantes concretos con el fin de transformarla en una señal discreta que sea manejable por un sistema digital.

Etapas de la teoría de muestreo:

- Muestreo
- Retención
- Cuantización
- Codificación

Ejemplo I

Dado un convertidor analógico - digital de 12 bits, diga cual es el voltaje de referencia alto y el voltaje de referencia bajo para obtener una resolución de 1 mV.

Ejemplo I

Dado un convertidor analógico - digital de 12 bits, diga cual es el voltaje de referencia alto y el voltaje de referencia bajo para obtener una resolución de 1 mV.

Sustitumos los datos conocidos:

$$0,001V = \frac{Rango}{2^{12}}. \quad (3)$$

Ejemplo I

Dado un convertidor analógico - digital de 12 bits, diga cual es el voltaje de referencia alto y el voltaje de referencia bajo para obtener una resolución de 1 mV.

Sustitumos los datos conocidos:

$$0,001V = \frac{Rango}{2^{12}}. \quad (3)$$

Realizamos la exponenciación:

$$0,001V = \frac{Rango}{4096}. \quad (4)$$

Ejemplo I

Dado un convertidor analógico - digital de 12 bits, diga cual es el voltaje de referencia alto y el voltaje de referencia bajo para obtener una resolución de 1 mV.

Sustitumos los datos conocidos:

$$0,001V = \frac{Rango}{2^{12}}. \quad (3)$$

Realizamos la exponenciación:

$$0,001V = \frac{Rango}{4096}. \quad (4)$$

Despejamos el rango:

$$Rango = 0,001V * 4096. \quad (5)$$

Ejemplo I - continuación

Realizamos la multiplicación:

$$Rango = 4,096V \quad (6)$$

Ejemplo I - continuación

Realizamos la multiplicación:

$$Rango = 4,096V \quad (6)$$

Sustituimos el rango por su definición (1):

$$VoltajeReferenciaAlto - VoltajeReferenciaBajo = 4,096V \quad (7)$$

Ejemplo I - continuación

Realizamos la multiplicación:

$$Rango = 4,096V \quad (6)$$

Sustituimos el rango por su definición (1):

$$VoltajeReferenciaAlto - VoltajeReferenciaBajo = 4,096V \quad (7)$$

Asumimos que VoltajeReferenciaBajo está conectado a GND(0V):

$$VoltajeReferenciaAlto - 0V = 4,096V \quad (8)$$

Ejemplo I - continuación

Realizamos la multiplicación:

$$Rango = 4,096V \quad (6)$$

Sustituimos el rango por su definición (1):

$$VoltajeReferenciaAlto - VoltajeReferenciaBajo = 4,096V \quad (7)$$

Asumimos que VoltajeReferenciaBajo está conectado a GND(0V):

$$VoltajeReferenciaAlto - 0V = 4,096V \quad (8)$$

Por lo tanto, los valores correspondientes son:

$$\mathbf{VoltajeReferenciaAlto = 4.096 V}$$

$$\mathbf{VoltajeReferenciaBajo = 0V}$$

Ejemplo II

Determine la cantidad de bits necesaria para que un convertidor tenga a lo más una resolución de 4mV con un rango de 5V.

Ejemplo II

Determine la cantidad de bits necesaria para que un convertidor tenga a lo más una resolución de 4mV con un rango de 5V.

Sustituimos los datos conocidos:

$$4mV = \frac{5V}{2^{TamanodePalabra}} \quad (9)$$

Ejemplo II

Determine la cantidad de bits necesaria para que un convertidor tenga a lo más una resolución de 4mV con un rango de 5V.

Sustituimos los datos conocidos:

$$4mV = \frac{5V}{2^{TamanodePalabra}} \quad (9)$$

Despejamos tamaño de palabra

$$2^{TamanodePalabra} = \frac{5V}{4mV} \quad (10)$$

Ejemplo II

Determine la cantidad de bits necesaria para que un convertidor tenga a lo más una resolución de 4mV con un rango de 5V.

Sustituimos los datos conocidos:

$$4mV = \frac{5V}{2^{TamanodePalabra}} \quad (9)$$

Despejamos tamaño de palabra

$$2^{TamanodePalabra} = \frac{5V}{4mV} \quad (10)$$

Aplicamos logaritmos en base 2:

$$TamanodePalabra = \frac{\ln(1250)}{\ln(2)} \quad (11)$$

Ejemplo II - continuación

Realizamos operaciones:

$$TamanodePalabra = 10,2898 \quad (12)$$

Ejemplo II - continuación

Realizamos operaciones:

$$TamanodePalabra = 10,2898 \quad (12)$$

Concluimos que necesitamos un convertidor analógico - digital de **por lo menos 11 bits** (resolución de 2.44mV), ya que con 10 bits tendríamos una resolución de 4.88 mV.

Clasificación

- Convertidor por aproximaciones sucesivas.

Clasificación

- Convertidor por aproximaciones sucesivas.
- Convertidor sigma-delta.
- Convertidor flash, half-flash.
- Convertidor por integración.
- Convertidor por seguimiento.

Principio de funcionamiento

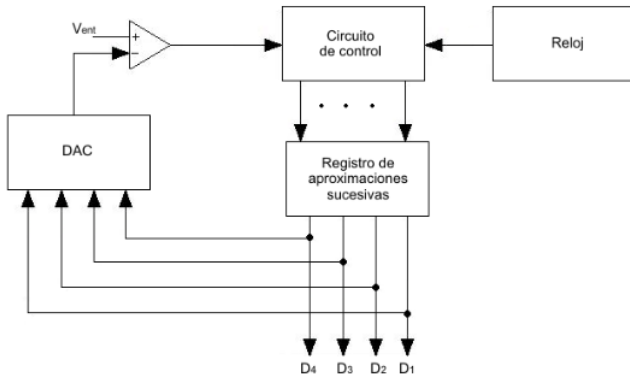


Figura: Método de aproximaciones sucesivas

Tabla. Conversión por aproximaciones sucesivas.

Paso	Palabra Digital	Conversión	Comparación

Tabla. Conversión por aproximaciones sucesivas.

Paso	Palabra Digital	Conversión	Comparación
0	0000 0000	$(000/255) * 5$	$0,0000 < 2,0000V$

Tabla. Conversión por aproximaciones sucesivas.

Paso	Palabra Digital	Conversión	Comparación
0	0000 0000	$(000/255) * 5$	$0,0000 < 2,0000V$
1	1000 0000	$(128/255) * 5$	$2,5098 > 2,0000V$

Tabla. Conversión por aproximaciones sucesivas.

Paso	Palabra Digital	Conversión	Comparación
0	0000 0000	$(000/255) * 5$	$0,0000 < 2,0000V$
1	1000 0000	$(128/255) * 5$	$2,5098 > 2,0000V$
2	0100 0000	$(064/255) * 5$	$1,2549 < 2,0000V$

Tabla. Conversión por aproximaciones sucesivas.

Paso	Palabra Digital	Conversión	Comparación
0	0000 0000	$(000/255) * 5$	$0,0000 < 2,0000V$
1	1000 0000	$(128/255) * 5$	$2,5098 > 2,0000V$
2	0100 0000	$(064/255) * 5$	$1,2549 < 2,0000V$
3	0110 0000	$(096/255) * 5$	$1,8823 < 2,0000V$

Tabla. Conversión por aproximaciones sucesivas.

Paso	Palabra Digital	Conversión	Comparación
0	0000 0000	$(000/255) * 5$	$0,0000 < 2,0000V$
1	1000 0000	$(128/255) * 5$	$2,5098 > 2,0000V$
2	0100 0000	$(064/255) * 5$	$1,2549 < 2,0000V$
3	0110 0000	$(096/255) * 5$	$1,8823 < 2,0000V$
4	0111 0000	$(112/255) * 5$	$2,1960 > 2,0000V$

Tabla. Conversión por aproximaciones sucesivas.

Paso	Palabra Digital	Conversión	Comparación
0	0000 0000	$(000/255) * 5$	$0,0000 < 2,0000V$
1	1000 0000	$(128/255) * 5$	$2,5098 > 2,0000V$
2	0100 0000	$(064/255) * 5$	$1,2549 < 2,0000V$
3	0110 0000	$(096/255) * 5$	$1,8823 < 2,0000V$
4	0111 0000	$(112/255) * 5$	$2,1960 > 2,0000V$
5	0110 1000	$(104/255) * 5$	$2,0392 > 2,0000V$

Tabla. Conversión por aproximaciones sucesivas.

Paso	Palabra Digital	Conversión	Comparación
0	0000 0000	$(000/255) * 5$	$0,0000 < 2,0000V$
1	1000 0000	$(128/255) * 5$	$2,5098 > 2,0000V$
2	0100 0000	$(064/255) * 5$	$1,2549 < 2,0000V$
3	0110 0000	$(096/255) * 5$	$1,8823 < 2,0000V$
4	0111 0000	$(112/255) * 5$	$2,1960 > 2,0000V$
5	0110 1000	$(104/255) * 5$	$2,0392 > 2,0000V$
6	0110 0100	$(100/255) * 5$	$1,9607 < 2,0000V$

Tabla. Conversión por aproximaciones sucesivas.

Paso	Palabra Digital	Conversión	Comparación
0	0000 0000	$(000/255) * 5$	$0,0000 < 2,0000V$
1	1000 0000	$(128/255) * 5$	$2,5098 > 2,0000V$
2	0100 0000	$(064/255) * 5$	$1,2549 < 2,0000V$
3	0110 0000	$(096/255) * 5$	$1,8823 < 2,0000V$
4	0111 0000	$(112/255) * 5$	$2,1960 > 2,0000V$
5	0110 1000	$(104/255) * 5$	$2,0392 > 2,0000V$
6	0110 0100	$(100/255) * 5$	$1,9607 < 2,0000V$
7	0110 0110	$(102/255) * 5$	$2,0000 > 2,0000V$

Tabla. Conversión por aproximaciones sucesivas.

Paso	Palabra Digital	Conversión	Comparación
0	0000 0000	$(000/255) * 5$	$0,0000 < 2,0000V$
1	1000 0000	$(128/255) * 5$	$2,5098 > 2,0000V$
2	0100 0000	$(064/255) * 5$	$1,2549 < 2,0000V$
3	0110 0000	$(096/255) * 5$	$1,8823 < 2,0000V$
4	0111 0000	$(112/255) * 5$	$2,1960 > 2,0000V$
5	0110 1000	$(104/255) * 5$	$2,0392 > 2,0000V$
6	0110 0100	$(100/255) * 5$	$1,9607 < 2,0000V$
7	0110 0110	$(102/255) * 5$	$2,0000 > 2,0000V$
8	0110 0111	$(103/255) * 5$	$2,0196 > 2,0000V$

Tabla. Conversión por aproximaciones sucesivas.

- Localizado en el **Puerto E**.
- Resolución de **8 bits**.
- **8 canales** multiplexados.
Se pueden usar individualmente (cuatro lectura) o en conjuntos de 4 canales (1 lectura / canal).
- Modo de lectura continua.
- VRH máximo de **6V** y VRL no menor de **0V**.

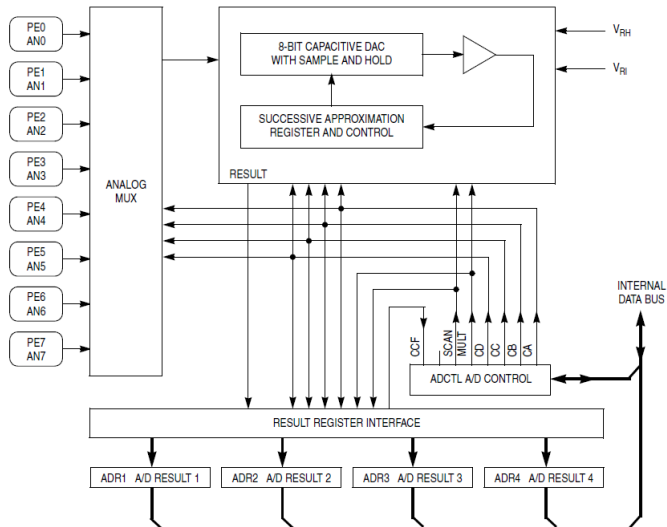
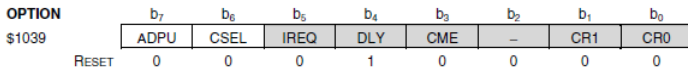
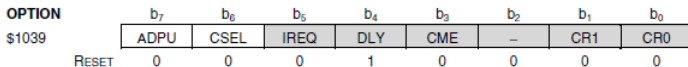


Figura: Subsistema analógico en el microcontrolador Motorola 68HC11[?]

Figura: Registro *Option*[?]

Figura: Registro *Option*[?]

- ADPU (*Analogic - Digital Power Up*).
Desenergizado(0), Energizado(1).

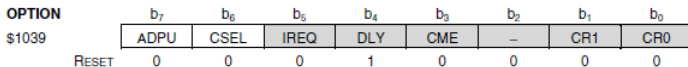


Figura: Registro *Option*[?]

- ADPU (*Analogic - Digital Power Up*).
Desenergizado(0), Energizado(1).
- CSEL: Selecciona la fuente de reloj.
Reloj de Sistema(0), Oscilador RC interno(1).

ADCTL		b ₇	b ₆	b ₅	b ₄	b ₃	b ₂	b ₁	b ₀
\$1030		CCF	–	SCAN	MULT	CD	CC	CB	CA
RESET		0	0	U	U	U	U	U	U

Figura: Registro *Control*[?]

ADCTL	b ₇	b ₆	b ₅	b ₄	b ₃	b ₂	b ₁	b ₀
\$1030	CCF	–	SCAN	MULT	CD	CC	CB	CA
RESET	0	0	U	U	U	U	U	U

Figura: Registro *Control*[?]

- CCF (*Conversion complete flag*):
Bandera de estado (solo lectura).
Conversión en proceso(0), conversión completa(1).

ADCTL	b ₇	b ₆	b ₅	b ₄	b ₃	b ₂	b ₁	b ₀
\$1030	CCF	–	SCAN	MULT	CD	CC	CB	CA
RESET	0	0	U	U	U	U	U	U

Figura: Registro *Control*[?]

- CCF (*Conversion complete flag*):
Bandera de estado (solo lectura).
Conversión en proceso(0), conversión completa(1).

Cualquier escritura a ADCTL, limpia la bandera CCF(0).

ADCTL	b ₇	b ₆	b ₅	b ₄	b ₃	b ₂	b ₁	b ₀
\$1030	CCF	–	SCAN	MULT	CD	CC	CB	CA
RESET	0	0	U	U	U	U	U	U

Figura: Registro *Control*[?]

- CCF (*Conversion complete flag*):
Bandera de estado (solo lectura).
Conversión en proceso(0), conversión completa(1).

Cualquier escritura a ADCTL, limpia la bandera CCF(0).

- SCAN: Lectura sencilla(0), lectura continua(1).

ADCTL	b ₇	b ₆	b ₅	b ₄	b ₃	b ₂	b ₁	b ₀
\$1030	CCF	–	SCAN	MULT	CD	CC	CB	CA
RESET	0	0	U	U	U	U	U	U

Figura: Registro *Control*[?]

- CCF (*Conversion complete flag*):
Bandera de estado (solo lectura).
Conversión en proceso(0), conversión completa(1).

- Cualquier escritura a ADCTL**, limpia la bandera CCF(0).

- SCAN: Lectura sencilla(0), lectura continua(1).

- MULT: Un canal leído 4 veces(0), 4 canales leídos una vez(1).

Numero de canal	Bits de control				Canal a medir	Resultado en
	CD	CC	CB	CA		
1	0	0	X	X	AN0	ADR1
2	0	0	X	X	AN1	ADR2
3	0	0	X	X	AN2	ADR3
4	0	0	X	X	AN3	ADR4
5	0	1	X	X	AN4	ADR1
6	0	1	X	X	AN5	ADR2
7	0	1	X	X	AN6	ADR3
8	0	1	X	X	AN7	ADR4

MULT = 1

Numero de canal	Bits de control				Canal a medir
	CD	CC	CB	CA	
1	0	0	0	0	AN0
2	0	0	0	1	AN1
3	0	0	1	0	AN2
4	0	0	1	1	AN3
5	0	1	0	0	AN4
6	0	1	0	1	AN5
7	0	1	1	0	AN6
8	0	1	1	1	AN7

MULT = 0

Figura: Selección de canales[?]

Numero de canal	Bits de control				Canal a medir	Resultado en
	CD	CC	CB	CA		
1	0	0	X	X	AN0	ADR1
2	0	0	X	X	AN1	ADR2
3	0	0	X	X	AN2	ADR3
4	0	0	X	X	AN3	ADR4
5	0	1	X	X	AN4	ADR1
6	0	1	X	X	AN5	ADR2
7	0	1	X	X	AN6	ADR3
8	0	1	X	X	AN7	ADR4

MULT = 1

Numero de canal	Bits de control				Canal a medir
	CD	CC	CB	CA	
1	0	0	0	0	AN0
2	0	0	0	1	AN1
3	0	0	1	0	AN2
4	0	0	1	1	AN3
5	0	1	0	0	AN4
6	0	1	0	1	AN5
7	0	1	1	0	AN6
8	0	1	1	1	AN7

MULT = 0

Figura: Selección de canales[?]

- CD,CC,CB,CA: Que canal(es) será(n) convertido(s).

ADRx

\$1031 ADR1	b ₇	b ₆	b ₅	b ₄	b ₃	b ₂	b ₁	b ₀
\$1032 ADR2	b ₇	b ₆	b ₅	b ₄	b ₃	b ₂	b ₁	b ₀
\$1033 ADR3	b ₇	b ₆	b ₅	b ₄	b ₃	b ₂	b ₁	b ₀
\$1034 ADR4	b ₇	b ₆	b ₅	b ₄	b ₃	b ₂	b ₁	b ₀
RESET	U	U	U	U	U	U	U	U

Figura: Registros de conversión[?]

- 1 Crear una palabra de control para el registro *OPTION* y escribirla en la dirección correspondiente (\$1039).
(*ADPU* = 1 y *CSEL* = 1/0).

- 1 Crear una palabra de control para el registro *OPTION* y escribirla en la dirección correspondiente (\$1039).
(*ADPU* = 1 y *CSEL* = 1/0).
- 2 Esperar 100 μ s para permitir la estabilización de bomba de carga.

- 1 Crear una palabra de control para el registro *OPTION* y escribirla en la dirección correspondiente (\$1039).
(*ADPU* = 1 y *CSEL* = 1/0).
- 2 Esperar 100 μ s para permitir la estabilización de bomba de carga.
- 3 Crear una palabra de control para el registro *ADCTL* y escribirla en la dirección correspondiente (\$1030).
(*SCAN* = 1/0, *MULT* = 1/0, seleccionar canales).

- 1 Crear una palabra de control para el registro *OPTION* y escribirla en la dirección correspondiente (\$1039).
(*ADPU* = 1 y *CSEL* = 1/0).
- 2 Esperar 100 μ s para permitir la estabilización de bomba de carga.
- 3 Crear una palabra de control para el registro *ADCTL* y escribirla en la dirección correspondiente (\$1030).
(*SCAN* = 1/0, *MULT* = 1/0, seleccionar canales).
- 4 Esperar hasta que *CCF* (del registro *ADCTL*) sea '1', para leer el resultado en los registros determinados.

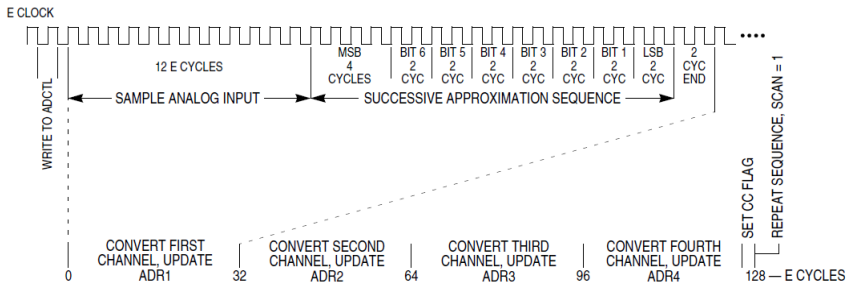


Figura: Diagrama de tiempos para la conversión analógica - digital

Diseñe un sistema de control de temperatura.

Este sistema deberá accionar un ventilador al sobrepasar 32 grados centígrados. Entre otro caso, el ventilador permanecerá apagado.

- Microcontrolador 68HC11
- Sensor de temperatura LM35: este sensor entrega 10mV por grado centigrado.

- Microcontrolador 68HC11
- Sensor de temperatura LM35: este sensor entrega 10mV por grado centigrado.

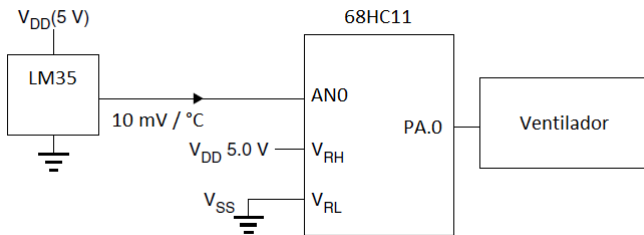


Figura: Esquemático del sistema

El diseño del sistema esta dado por:

Rango: 5V

Resolución: 19.53mV

El diseño del sistema esta dado por:

Rango: 5V

Resolución: 19.53mV

$$32\text{GradosCentigrados} * \frac{10\text{mV}}{\text{GradoCentigrado}} = 320\text{mV} \quad (13)$$

El diseño del sistema esta dado por:

Rango: 5V

Resolución: 19.53mV

$$32\text{GradosCentigrados} * \frac{10\text{mV}}{\text{GradoCentigrado}} = 320\text{mV} \quad (13)$$

$$\frac{320\text{mV}}{19,53\text{mV}} = 16,38 \quad (14)$$

El diseño del sistema esta dado por:

Rango: 5V

Resolución: 19.53mV

$$32\text{GradosCentigrados} * \frac{10\text{mV}}{\text{GradoCentigrado}} = 320\text{mV} \quad (13)$$

$$\frac{320\text{mV}}{19,53\text{mV}} = 16,38 \quad (14)$$

Aproximamos al número entero más cercano: 17

Convertimos a hexadecimal: 0x11

```

OPTION $39
ADCTL $30
PORTA $00
ADR1 $31

configura
    LDX    #$1000    ; Carga el registro indice con la dirección 0x1000, para utilizar direccionamiento indirecto.
    LDAA  #$80      ; Configura la palabra OPTION (1000 0000) .. ADUP = 1.
    STAA  OPTION,X  ; Carga al registro OPTION la palabra de configuración.
    LDAA  #$1FA     ; Carga el acumulador A con 506

espera
    ; Rutina de espera

    DECA          ; Decrementa A
    CMPA  #$00    ; Compara con cero.
    BNE   espera  ; Si aun no es cero, salta a espera. Si es cero, continua.

    LDAA  #$20    ; Configura la palabra ADCTL (0010 0000) .. SCAN = 1, MULT = 0. Canal 0.
    STAA  ADCTL,X ; Carga al registro ADCTL la palabra de configuración.

```

Figura: Código fuente en lenguaje ensamblador - parte I

```

convierte                                ; Rutina de conversión

BRCLR  ADCTL,X $80 convierte             ; Espera que el bit mas significativo (CCF) este en '1'.
LDAA   ADR1,X                             ; Carga en el acumulador A, el valor del registro de resultado (ADR1).
CMPA   #$11                               ; Lo compara con $11, equivalente a... 32 °C.
BLO    menor                              ; Si es menor, salta a ...
LDAA   #$01                               ; Activa el bit 0 en el acumulador A.
STAA   PORTA,X                           ; Manda el valor del acumulador A al puerto A (Enciende PA.0).
BRA    convierte                          ; Realiza la siguiente conversión.

menor

CLRA   ; Pone el acumulador A = 0x00
STAA   PORTA,X ; Manda el acumulador A al puerto A.
BRA    convierte ; Realiza la siguiente conversión.

END

```

Figura: Código fuente en lenguaje ensamblador - parte II

En ocasiones es útil complementar nuestro circuito analógico con una etapa de **acondicionamiento de señal**, lo cual nos da una **señal analógica de mejor calidad**, dando resultados más precisos en el proceso de conversión analógica - digital.

Algunas etapas comunes son: **amplificación, filtrado, aislamiento**, entre otros.

Es probable que nuestro sistema de conversión este captando **ruido eléctrico** generado por otros circuitos. Esto nos puede llevar a lecturas incorrectas.

Algunas ideas básicas para tratar con este problema, son:
promedio, histórico, filtrado, entre otros.