

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



PROYECTO FIN DE CARRERA

**MEDIDOR DE VOLTAMETRÍA
CÍCLICA PARA DISPOSITIVOS
DE TRANSMITANCIA
CONTROLABLE**

INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL: ELECTRÓNICA INDUSTRIAL

AUTOR: IVÁN ANDRÉS GONZÁLEZ GARCÍA

DIRECTOR: RICARDO VERGAZ BENITO



INDICE



1. INTRODUCCIÓN: MATERIALES DE TRANSMITANCIA CONTROLABLE Y DISPOSITIVOS MEDIDORES DE VOLTAMETRÍA CÍCLICA.....	1
1.1 Materiales con control de la transmitancia óptica. Materiales Electrocrómicos.	2
1.2 Voltametría cíclica: definición, utilización y estado de técnica.	10
1.3 Motivación para el trabajo: caracterización de dispositivos electrocrómicos. .	20
2. OBJETIVOS.....	23
2.1 Construcción de un medidor de voltametría cíclica.	23
2.2 Prueba de caracterización de un material electrocrómico.	24
3. DISEÑO DEL SISTEMA. DISPOSITIVOS EMPLEADOS.....	25
3.1 Descripción funcional del diseño del sistema. Diagrama de bloques.....	25
3.2 Elección de componentes.	28
3.2.1 Generador y Control del Voltaje.	28
3.2.2 Medición de corriente.....	33
3.2.3 Elección del microprocesador.	39
3.2.4 Interfaz con el usuario (PC).....	40
4. DESARROLLO DEL SISTEMA.....	43
4.1 Diseño por bloques.	43
4.2 Descripción detallada del sistema.....	44
4.2.1 Descripción del hardware.	45
4.2.2 Descripción del software.	72
5. RESULTADOS.....	97
5.1 Descripción de una calibración sobre un material.	97
5.2 Resultados medidos.	98
6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	103
6.1 Conclusiones.....	103
6.2 Líneas abiertas.	104
7. PRESUPUESTO Y ANEXOS.....	105
7.1 Presupuesto.....	105
7.2 Bibliografía	110
7.3 Anexos: hoja de características.....	112



INDICE DE FIGURAS



FIGURA 1. COMPOSICIÓN DE UN ELECTROCRÓMICO	6
FIGURA 2. FOTOS DE ELECTROCRÓMICOS.....	7
FIGURA 3. APLICACIONES DE LOS ELECTROCRÓMICOS.....	8
FIGURA 4. ONDA SALTO DE ESCALÓN.....	11
FIGURA 5. GRÁFICA DE CORRIENTE (ESCALÓN).....	11
FIGURA 6. FORMA DE ONDA LINEAL.....	12
FIGURA 7, GRÁFICA DE CORRIENTE (VOLTAJE LINEAL)	13
FIGURA 8. ONDA TRIANGULAR (VC).....	14
FIGURA 9. VOLTAMOGRAMA PARA VC	15
FIGURA 10. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA.....	26
FIGURA 11. BLOQUE GENERADOR DE VOLTAJE.....	28
FIGURA 12. CIRCUITO COMPARADOR.....	30
FIGURA 13. CIRCUITO INTEGRADOR.....	31
FIGURA 14. CONVERTIDOR CORRIENTE-TENSIÓN (I – V).....	34
FIGURA 15. PINES DEL AD7824.....	35
FIGURA 16. MODO BIPOLAR AD7824.....	36
FIGURA 17. CONFIGURACIÓN DE ACONDICIONAMIENTO V_{IN}	37
FIGURA 18. CONFIGURACIÓN DE ACONDICIONAMIENTO I_{OUT}	38
FIGURA 19. MICROCONTROLADOR AT89S52.....	39
FIGURA 20. PROGRAMA HYPER TERMINAL.....	41
FIGURA 21. MÉTODO CAPTURA DE TEXTO.....	41
FIGURA 22. DIAGRAMA DE LAS PARTES DE CADA BLOQUE.....	44
FIGURA 23. TRANSFORMADOR CROVISA DE TOMA INTERMEDIA DE 12V.....	46
FIGURA 24. REGULADOR DE TENSIÓN LM7805/08.....	47
FIGURA 25. REGULADOR DE TENSIÓN LM7905/08.....	47
FIGURA 26. CIRCUITO BLOQUE DE ALIMENTACIÓN.....	48
FIGURA 27. MICROCONTROLADOR AT89S52.....	48
FIGURA 28. CIRCUITO DE RESET DEL MICROCONTROLADOR.....	49
FIGURA 29. CIRCUITO OSCILADOR DEL MICROCONTROLADOR.....	50
FIGURA 30. CONECTOR RS-232 DE 9 PINES.....	52
FIGURA 31. CONEXIONADO MAX-232.....	53
FIGURA 32. ESQUEMA ELÉCTRICO. ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL.....	54
FIGURA 33. CONVERTIDOR AD7824.....	54
FIGURA 34. TABLA SELECTOR DE CANAL AD7824.....	55
FIGURA 35. DIAGRAMA DE TIEMPOS MODO1. AD7824.....	57
FIGURA 36. ESQUEMA ELÉCTRICO GENERADOR DE ONDA TRIANGULAR.....	58
FIGURA 37. EJEMPLO ONDA CUADRADA-TRIANGULAR.....	59



FIGURA 38. PINEADO, FOTO Y DIAGRAMA DE BLOQUES DEL AD5241.	60
FIGURA 39. DIAGRAMA ESCRITURA DEL AD5241.	61
FIGURA 40. SALIDA VOLTAJE EC. USO DE RÉLES.	65
FIGURA 41. ACTIVACIÓN DE UN RÉLE DE 5 VDC.....	65
FIGURA 42. CIRCUITO MEDIDOR DE CORRIENTE.	68
FIGURA 43. CARCASA CARA FRONTAL ABIERTA.	69
FIGURA 44. CARCASA CARA TRASERA ABIERTA.	70
FIGURA 45. CARCASA CARA LATERAL ABIERTA.	70
FIGURA 46. CARCASA CARA TRASERA.....	71
FIGURA 47. CARCASA CARA FRONTAL.	71
FIGURA 48. PROGRAMADOR LAB TOOL-48.	74
FIGURA 49. INTERFACE LABTOOL-48.	74
FIGURA 50. GRÁFICAS CÁLCULO PRECARGA TIMER 0.	78
FIGURA 51. DIAGRAMA ESCRITURA AD5241.	86
FIGURA 52. SISTEMA CONTADOR.....	88
FIGURA 53. MENÚ ELECCIÓN DEL VOLTAJE.....	91
FIGURA 54. MENÚ CONFIRMACIÓN DE DATOS.	91
FIGURA 55. MENÚ NUEVA MEDIDA - FIN DEL PROGRAMA.....	96
FIGURA 56. VOLTAMOGRAMA SR=50MV/s -- V=0,5V.	101
FIGURA 57. VOLTAMOGRAMA SR=10MV/s – V=1,5V.....	101

INDICE DE FLUJOGRAMAS:

FLUJOGRAMA 1. DIAGRAMA DE FLUJO TÍPICO PARA UN ARCHIVO EJECUTABLE.....	73
FLUJOGRAMA 2. FLUJO GENERAL DEL PROGRAMA	75
FLUJOGRAMA 3. FLUJOGRAMA DEL 1º BUCLE WHILE.....	80
FLUJOGRAMA 4. FLUJOGRAMA FUNCIÓN ROTO ().	84
FLUJOGRAMA 5. FUNCIÓN GRABA_POTEN().	86
FLUJOGRAMA 6. FLUJOGRAMA DE LA INTERRUPCIÓN IT0.	87
FLUJOGRAMA 7. FLUJOGRAMA DEL 2º BUCLE WHILE()	90
FLUJOGRAMA 8. FLUJOGRAMA FUNCIÓN LEER_GUARDA_VOLTAJE()	92
FLUJOGRAMA 9.FLUJOGRAMA FUNCIÓN LEER_GUARDA_CORRIENTE().....	94



INDICE DE ANEXOS

Anexo I-A Fotelito placa final.....	113
Anexo I-B Esquema eléctrico completo.....	115
Anexo I-C Hoja de características AD7824.....	117
Anexo I-D Hoja de características reguladores.....	120
Anexo I-E Hoja de características Microcontrolador.....	124
Anexo I-F Hoja de características MAX-232.....	128
Anexo I-G Hoja de características potenciómetro digital AD5241.....	133
Anexo I-H Código fuente (lenguaje C).....	139
Anexo I-I Tabla de resultados $SR=50mV/s - V_0=0,5V$	151
Anexo I-J Tabla de resultados $SR=10mV/s - V_0=1,5V$	153



1. INTRODUCCIÓN: MATERIALES DE TRANSMI- TANCIA CONTROLABLE Y DISPOSITIVOS MEDIDORES DE VOLTAMETRÍA CÍCLICA.

En este primer capítulo, se hablará sobre los materiales de transmitancia controlable, sus propiedades, aplicaciones, etc. y sobre los materiales electrocrómicos, tanto su composición, tratamiento, estudios y utilidades. Se explicará una de las técnicas empleadas para caracterizarlos: en especial la voltametría cíclica, concluyendo con los motivos por los que se ha realizado este trabajo.



1.1 MATERIALES CON CONTROL DE LA TRANSMITANCIA ÓPTICA. MATERIALES ELECTROCRÓMICOS.

En los últimos años, la tecnología ha experimentado importantes avances que progresivamente se han ido incorporando a nuestra vida cotidiana; han aparecido así las llamadas “modas tecnológicas”, que se suceden cada día a mayor velocidad en función de la demanda del mercado.

Una de esas modas que se ha implantado, es la *domótica*. Se trata de la automatización, control local y remota del hogar (apagar-encender, abrir-cerrar y regular) en aplicaciones y dispositivos domésticos como pueden ser: instalaciones, sistemas, funciones para iluminación, climatización, persianas, toldos, puertas, ventanas, cerraduras, riego, electrodomésticos, control de suministro de agua, gas, electricidad, etc.

Hoy en día, los nuevos materiales con los que se fabrican los dispositivos están orientados a obtener el máximo rendimiento y a reducir el consumo eléctrico de los mismos, aportando simultáneamente un mayor grado de calidad de vida (baterías de litio, uso de fibra de carbono en los automóviles, etc.).

Entre los nuevos materiales que se están estudiando se hallan los dispositivos de control de *transmitancia* (relación entre la cantidad de radiación que atraviesa un material y la que incide sobre él), y de *reflectancia* (relación entre la cantidad de radiación que refleja un material y la que incide sobre él) resultando de gran importancia en los sistemas de seguridad de vehículos, o en los paneles informativos (en ambos casos evitan que se refleje la luz).

Pero, ¿cuál es el mecanismo que permite llegar a controlar con facilidad la luz que pasa a través de un material?

Al interaccionar la radiación con la materia, aquélla sufre cuatro posibles procesos: transmisión [T], reflexión [R], scattering [S] (o redistribución de la energía radiante por parte de la materia) y absorción [A] [Max99].

Definiendo cuatro coeficientes de potencia relacionados con los citados fenómenos (T, R, S, A) y, considerando una señal luminosa normalizada de potencia unidad, se puede establecer entre ellos la siguiente relación:

$$T+R+S+A=1$$

El efecto electro-óptico que presentan diversos materiales consiste básicamente en que, mediante la aplicación de una señal eléctrica de excitación externa, se puede variar alguno de los términos de la relación anterior, a expensas de modificar uno o varios de los términos restantes que integran la citada igualdad, ya que la suma de todos ellos debe permanecer constante [Hec97].

En términos prácticos, esto quiere decir que la amplia variedad de dispositivos construidos con materiales que son capaces de modular la luz, se basa en el balance o intercambio de energía que tiene lugar cuando la señal óptica interactúa con el material.

Así, los materiales capaces de controlar el paso de la luz por medio de la electrónica, pueden clasificarse, de forma aproximada, en tres tipos:

- Los que mediante la acción de un campo eléctrico producen una reorientación de la estructura o las moléculas del material, dando lugar a un cambio del índice de refracción efectivo del medio, y por tanto, de su transmitancia. Un ejemplo de éstos son los cristales líquidos.

- Aquéllos cuyo funcionamiento se basa en variaciones químicas que provocan la variación de su color mediante la aplicación de una tensión externa, como por ejemplo los materiales electrocrómicos (EC).
- Existen unos dispositivos de partículas suspendidas (SPD) que están constituidos por pequeñas partículas (micrométricas) capaces de absorber la luz visible, y cuyo funcionamiento se basa en el alineamiento (bajo la aplicación de una tensión externa) o en un desorden aleatorio de las mismas (cuando se retira la excitación eléctrica) que provoca, en el primer caso, el paso de luz por el dispositivo, y en el último, un bloqueo de la misma por *scattering* o dispersión de la luz.

Dentro de este tipo, se encuentran los materiales electroforéticos, que están siendo desarrollados por la compañía E-Ink; consisten en millones de microcápsulas de polímetro transparente del diámetro de un cabello humano, cada una de las cuales contiene micropartículas blancas de TiO_2 , micropartículas de tintes oscuros (al inicio se utilizó el color azul o negro) y un fluido claro donde las partículas blancas y negras están suspendidas [Dit01].

Las micropartículas de los materiales electroforéticos se colocan entre dos capas de electrodos; la capa del electrodo superior es transparente. Las partículas blancas tienen carga positiva y las negras carga negativa. Al aplicar un campo eléctrico, las partículas son estimuladas, por lo que se mueven hacia la parte superior o inferior de la microcápsula.

El principio empleado para el movimiento de las partículas es la denominada Ley de la Fuerza Eléctrica de Coulomb, la cual especifica que las cargas opuestas se atraen y las cargas iguales se repelen. Por consiguiente, al aplicar una carga eléctrica negativa en el electrodo superior, las partículas blancas son atraídas hacia arriba, formando un píxel blanco visible por el usuario; en caso contrario, al aplicar un campo eléctrico positivo, las partículas blancas se repelen y se ubican en la



parte inferior de la microcápsula, y los pigmentos oscuros ascienden formando un píxel negro. El uso de estos materiales abre el camino para fabricar papel electrónico.

Adicionalmente, existe una gama de materiales que también modifican su transmitancia, ya sea utilizando la misma radiación que incide sobre ellos, como ocurre en los materiales fotocromicos (radiación UV principalmente), o bien utilizando una radiación térmica (materiales termocromicos), u oxidando o reduciendo el gas de un material (materiales gasocromicos).

Los cambios de color en los objetos dan signos visuales que pueden ser usados para llevar información útil a un observador [Bam01]. Además, por absorción selectiva o transmisión de luz por un material, se puede modular la energía lumínica incidente sobre un observador. Cuando un estímulo externo químico o físico causa un cambio reversible de color o una variación en la transmisión de la luz, las posibles aplicaciones son considerables.

Los materiales cuyo estudio motiva el presente trabajo son los electrocromicos, por lo que en adelante nos centraremos en ellos. Numerosos materiales químicos presentan estados redox con distintos espectros de absorción ópticos. Cuando el intercambio de los estados redox genera variaciones de la transmitancia espectral en el intervalo visible en un material, a éste se le denomina *electrocromico*. Un material electrocromico es aquél cuyo cambio reversible de color tiene lugar por la reducción (ganancia de electrones) o por la oxidación (pérdida o cesión de electrones), al paso de una corriente eléctrica después de aplicarle un potencial eléctrico apropiado [Lev02].

Varias especies químicas pueden ser conmutadas entre estados redox que tienen distintos espectros de absorción. Tal espectro es provocado bien por una excitación electrónica interna de energía moderada, o por un cambio óptico de intervalencias transferido cuando la especie química tiene dos centros de diferentes valencias o estados de oxidación.

Estos materiales son considerados electrocromicos cuando muestran cambios visibles de color muy marcados bajo iluminación [Rau99].

Se estudian también distintas especies químicas para la modulación de la radiación cercana al intervalo infrarrojo (NIR: Near Infra-Red), para el infrarrojo térmico y para intervalos de microondas. En esos casos, el término “color” puede significar una respuesta de los detectores de esas regiones electromagnéticas, y no una simple apreciación del ojo humano [Rau99].

En la figura 1 se muestra un dispositivo de EC, principalmente es una estructura de cinco capas superpuestas en un substrato o colocado entre dos substratos en una configuración laminar (con un espesor de μm) [Gran06].

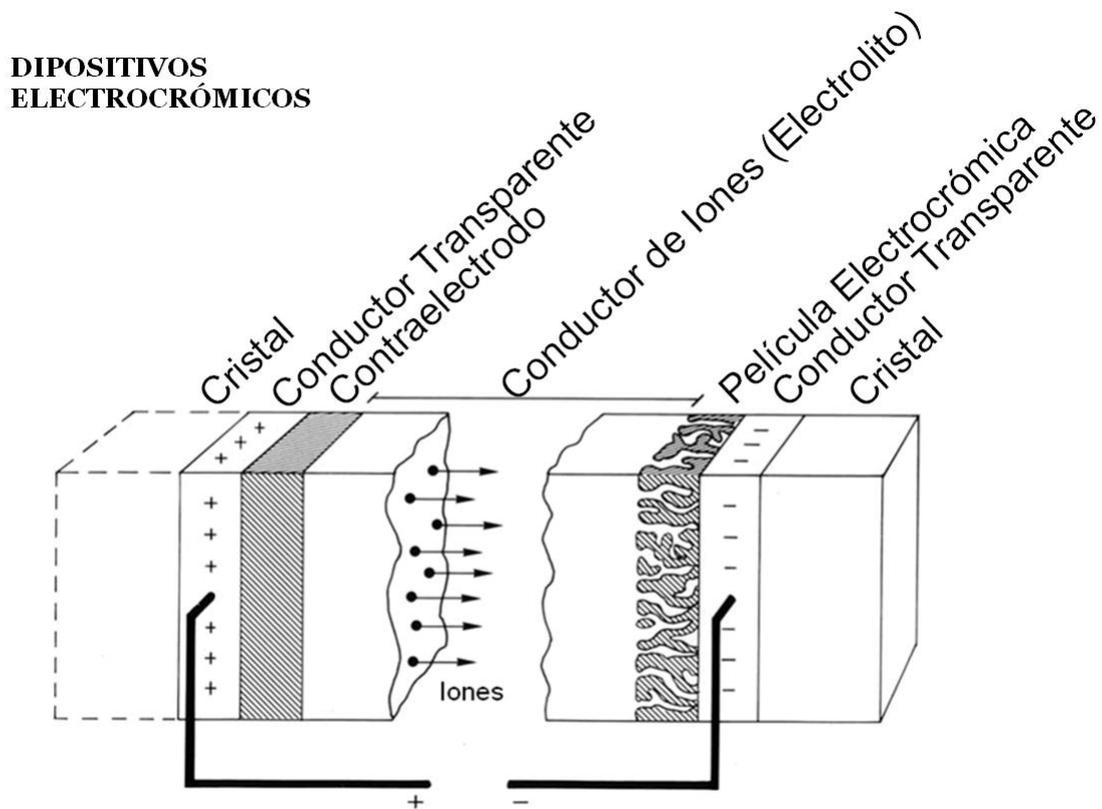


Figura 1. Composición de un electrocrómico

La capa central es un electrolito, generalmente una capa de polímero o una película delgada de un óxido hidratado. Al lado del electrolito hay una capa de

EC, normalmente es un óxido (WO_3 es el más empleado) o una película orgánica adecuada.

En el otro lado del electrolito hay una película delgada que sirve como almacenamiento de iones, es la capa de contraelectrodo: se encarga de que exista un balance de cargas compensado, para lo que se puede utilizar un óxido (el NiO o IrO_2 son dos buenos candidatos por sus especiales propiedades) o una película orgánica.

Esta estructura central de 3 capas se coloca entre las películas transparentes eléctricamente conductoras; el mejor material en términos de óptica y propiedades eléctricas es el $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$ (conocido como ITO) [Gra02], mientras que los contactos de $\text{SnO}_2:\text{F}$ son menos costosos y realmente aprovechables a lo largo del área del substrato de cristal.

Cuando se aplica un voltaje del orden de 1V ó 2V entre los conductores eléctricos transparentes, los iones se mueven del contraelectrodo a la capa electrocrómica. Los electrones inyectados desde los conductores transparentes, alteran las propiedades ópticas (el dispositivo se colorea o aclara) como se ve en la Figura 2. Al retornar o cambiar el voltaje, se vuelve a las propiedades originales. La coloración puede pararse en algún nivel intermedio, y el dispositivo suele presentar memoria en circuito abierto, es decir, al dejar de aplicar el voltaje necesario para colorear el dispositivo, éste permanecerá coloreado durante un tiempo, ocurriendo así el estado de memoria.



a) EC con Voltaje



b) EC sin Voltaje

Figura 2. Fotos de electrocrómicos plásticos empleados en este trabajo.

Las aplicaciones comerciales de estos dispositivos de materiales EC incluyen: los anti-destellos en los retrovisores traseros de los coches [Ros01], tiras de EC para indicadores del estado de carga de la batería, pantallas, gafas electrocrómicas (Figura 3)... Detallamos algunas:

- En las “ventanas inteligentes” (basadas en la modulación de la transmitancia o reflectancia de la radiación solar) para el uso en coches (techos solares) y en edificios [Ros01].
- Reutilizar el código de barras de las etiquetas.
- Proteger del desgaste ocular.
- Controlar el “efecto toldo” en los aviones (evita que el piloto sea cegado por los rayos del sol).
- Realizar sistemas de reducción de reflejos para oficinas.
- Desarrollar nuevos materiales para camuflaje.
- Conseguir mejor control térmico para trabajos espaciales.
- Control de la reflectancia o transmitancia de la luz en dispositivos de pantallas (“*displays*”) para paneles informativos y almacenes.



Visera del casco de una moto



Ventana inteligente

Figura 3. Aplicaciones de los electrocrómicos.

Muchos de estos productos aparecerán en un futuro no muy lejano, especialmente cuando sean factibles las técnicas de fabricación, y los productos sean más duraderos, llegando a mejorar la estabilidad de los mismos.



Medidor de voltametría cíclica para dispositivos de transmitancia controlable

Los materiales electrocrómicos deben ser caracterizados óptica y eléctricamente. Este trabajo versa sobre uno de los sistemas de caracterización eléctrica, que ahora presentamos.

1.2 VOLTAMETRÍA CÍCLICA: DEFINICIÓN, UTILIZACIÓN Y ESTADO DE TÉCNICA.

La voltametría cíclica (VC) es una técnica electroquímica de microelectrólisis, de tipo transitorio (donde el transporte de materia al electrodo se produce por difusión). Se utiliza para la obtención de información de forma muy rápida sobre las reacciones químicas asociadas a los procesos de transferencia electrónica, como los producidos en los materiales electrocromáticos.

De esta manera se puede estudiar el comportamiento durante la reacción redox de las especies químicas presentes en ella. Existen varias formas de voltametría [Hib93]:

- Salto Escalón (*Potencial Step*)
- Barrido Lineal (*Linear sweep*)
- Voltametría cíclica (*Cyclic Voltammetry*)

Para la voltametría en forma de salto de escalón, se aplica sobre el material un voltaje que conmuta instantáneamente de un valor V_1 a otro V_2 , como muestra la figura 4.

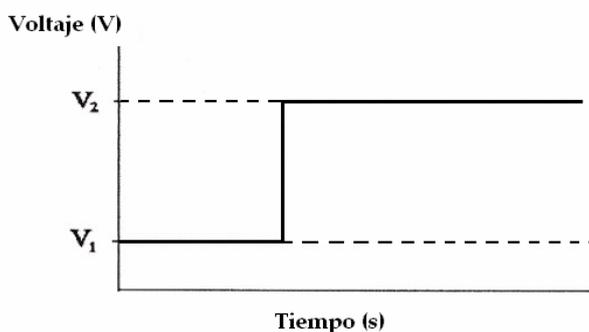
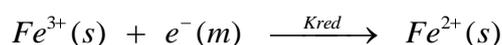


Figura 4. Onda salto de escalón.

Por poner un ejemplo, se considera la siguiente reacción química:



Normalmente el rango de voltaje se selecciona de forma que a V_1 la reducción de (Fe^{3+}) es termodinámicamente desfavorable. Una vez que se produce el escalón (tiempo=0), el reactante (Fe^{3+}) se convierte al producto (Fe^{2+}) y comienza a fluir una gran corriente. (Figura 5)

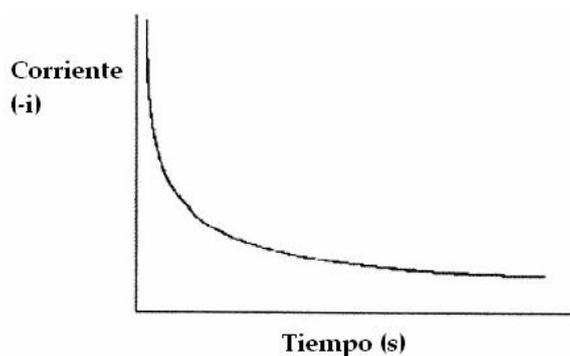


Figura 5. Gráfica de corriente (escalón).

Otra forma de voltametría que se suele utilizar en experimentos e investigaciones de electroquímica es la forma de onda lineal. La técnica más simple que utiliza esta forma de onda es la voltametría lineal de barrido.

El potencial es barrido en una dirección, desde el valor inicial hasta el valor final. (Figura 6)

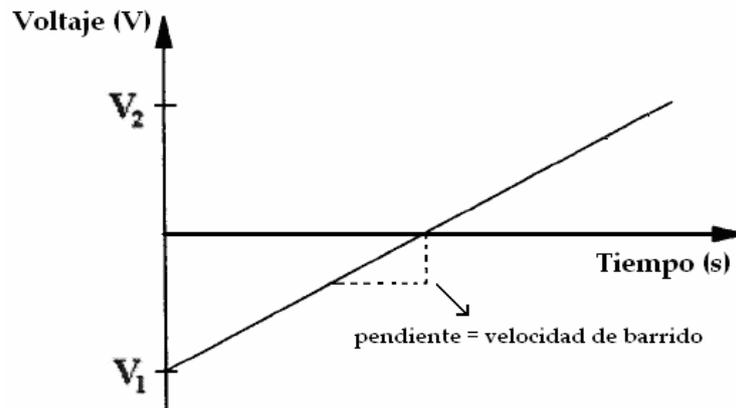


Figura 6. Forma de onda lineal

La velocidad de barrido (*scan rate*, SR) se calcula de la inclinación de la rampa (pendiente). Modificando el tiempo que tarda en barrer el rango de voltajes se puede cambiar la velocidad de barrido [Chr94].

Las características del voltamograma lineal de barrido (Figura 7) dependen de varios factores [Bar80]:

- La tasa de la reacción de transferencia de electrones.
- La reactividad química de las especies electroactivas.
- La velocidad de barrido de voltaje.

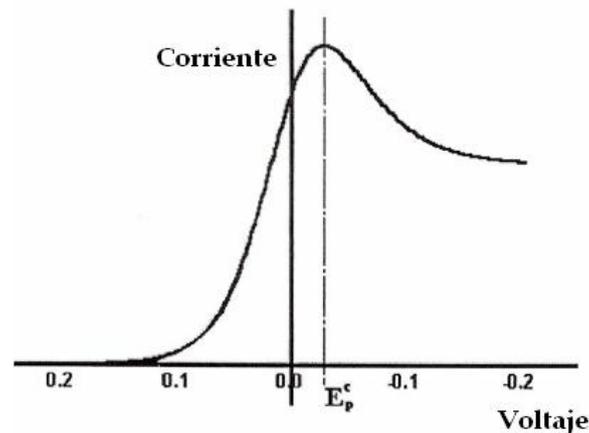


Figura 7. Gráfica de corriente (voltaje lineal)

La gráfica habitual se muestra en la figura 7: comienza en la parte izquierda, donde no hay flujo de corriente. Cuando el voltaje se barre hacia la derecha (a valores más reactivos), la corriente comienza a fluir y eventualmente alcanza un pico antes de que vuelva a caer. Para comprender el comportamiento necesitamos considerar la influencia de un voltaje en equilibrio establecido en la superficie del electrodo.

La corriente aumenta cuando el voltaje se barre desde su valor inicial mientras que la posición de equilibrio se mueve hacia la parte de la derecha, convirtiendo así más reactantes. El pico marca el potencial de reacción máximo, lo que quiere decir, que se ha llegado a oxidar ó reducir completamente la superficie del electrodo a tratar, y no existe más flujo de electrones. Esto provoca que no se cumpla la ecuación de Nerst, que se utiliza para calcular el potencial de reducción de un electrodo cuando las condiciones no son la estándar en equilibrio.

La siguiente voltametría, es la técnica cíclica, donde el voltaje es barrido entre dos valores a un SR fijo, pudiendo modificarse el SR en cada nuevo experimento, y por lo tanto variar el periodo de la señal.

La técnica de voltametría cíclica consiste en que cuando el voltaje alcanza V_2 la exploración se invierte y el voltaje es barrido de vuelta hasta V_1 , originando una forma triangular (Figura 8).

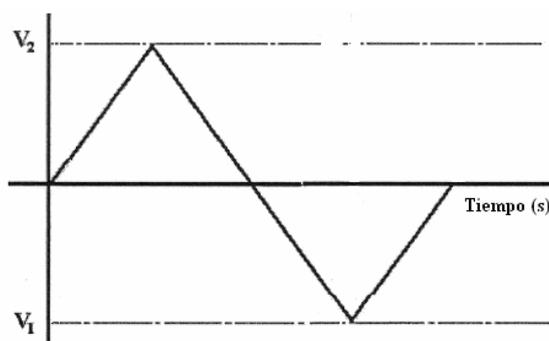


Figura 8. Onda triangular (VC)

Si un sistema redox se mantiene en equilibrio al ser sometido a un barrido de potencial, se dice que el proceso redox es reversible (el equilibrio requiere que las concentraciones de superficie de *Oxidación (O)* y de *Reducción (R)* se mantengan en los valores exigidos por la ecuación de Nernst).

El voltaje se mantiene al principio en el potencial inicial (E_0), donde no se produce ningún proceso de electrolisis, y por lo tanto no existe flujo de corriente faradaica, la cual, aparece cuando existe un proceso de transferencia directa de electrones en una reacción de oxidación en un electrodo y la reducción en el otro electrodo.

La corriente faradaica de reducción (catódica) tiene, por convención en electroanálisis, signo positivo y la corriente de oxidación (anódica) signo negativo [Gro93].

Cuando vamos aumentando el voltaje, el compuesto que está reducido empieza a recibir electrones, originando que la superficie del electrodo se oxide. A un valor determinado la dirección del barrido cambia de sentido, ocasionando a la superficie oxidada que vuelva a ser reducida. Una vez que el voltaje vuelve al punto inicial se puede considerar finalizado el experimento.

Esto tiene la ventaja de que el producto de una reacción de transferencia que ocurre en el barrido directo puede ser probado de nuevo en el barrido inverso.

Posteriormente se mide la respuesta de la especie electroactiva en un gráfico, registrándose curvas I-E, que son comúnmente denominadas *voltamogramas*.

El comportamiento típico de la corriente en un experimento de voltametría cíclica se muestra en el siguiente gráfico. (Figura 9)

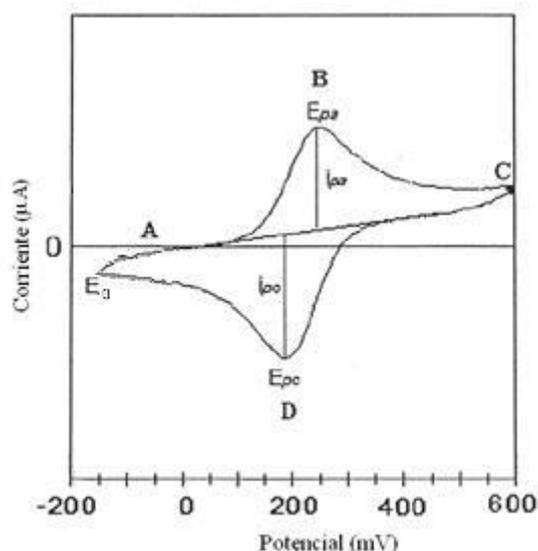


Figura 9. Voltamograma para VC

Al principio del experimento la solución contiene sólo la forma reducida del par de especies químicas redox, por lo que a potenciales menores del potencial redox (por ejemplo el potencial inicial “E₀”), no hay conversión del estado reducido al oxidado, la forma oxidada (punto A). Al comenzar el proceso aparece una corriente anódica que crece muy rápidamente hasta llegar al punto máximo del potencial redox. En el pico anódico (punto B, corriente i_{pa} y potencial E_{pa}) el potencial redox es lo suficientemente positivo para que cualquier especie reducida que alcance la superficie del electrodo sea instantáneamente oxidada, pasando a estar en el estado oxidado.



La corriente seguirá disminuyendo lentamente, ya que el electrodo se encuentra oxidado hasta que llegue el punto donde el voltaje de barrido cambie de sentido. Por tanto la corriente depende ahora tanto de la tasa de transferencia de masa en la superficie del electrodo como de la dependencia con el tiempo, lo que produce una forma asimétrica del pico.

Cuando el barrido cambie de sentido (punto C) la corriente continúa descendiendo con qt (carga \times tiempo) hasta cerca del potencial redox.

En este punto se produce la reducción, pasando la especie activa del estado oxidado al estado reducido, lo que causa una corriente catódica que eventualmente produce una respuesta en forma de pico (punto D).

La VC es útil tanto a nivel cualitativo como cuantitativo. En el ámbito cualitativo se puede tener una idea del valor del potencial al que se oxida o se reduce una especie, y del potencial al que se reduce u oxida la especie formada. Esto dependerá de si el proceso incluye una transferencia electrónica simple o si hay reacciones químicas acopladas al mismo.

Los parámetros más característicos e importantes del proceso redox que podemos obtener a partir de los voltamogramas son [Gro93]:

- La separación de los picos de potenciales ($E_{p_c} - E_{p_a}$) es igual a $\frac{58}{n}$ (mV) para todas las velocidades de barrido a 25°C, donde n es el número equivalente de electrones transferidos durante el proceso redox.

- El cociente de picos de corriente $\frac{i_{pa}}{i_{pc}}$ es igual a 1 para todas las velocidades de barrido, en condiciones de equilibrio.

- El pico de corriente i_p se incrementa linealmente como función de la raíz cuadrada de la velocidad de barrido (SR).

El pico de corriente i_p se obtiene de la ecuación:

$$i_p = 2.69 \times 10^5 \cdot n^{\frac{3}{2}} \cdot A \cdot C \cdot D^{\frac{1}{2}} \cdot SR^{\frac{1}{2}}$$

donde: $n = n^{\circ}$ de electrones transferidos.

A = área de la superficie del electrodo

C = concentración de la especie activa (mol/cm^3)

D = coeficiente de difusión (m^2/s)

SR = velocidad de barrido (V/s)

El comportamiento reversible de un proceso redox puede alterarse al variar los valores de los parámetros anteriores. Las causas principales de un comportamiento irreversible se explican a continuación:

Transferencia electrónica lenta [Gro93]:

La reversibilidad requiere que la transferencia del electrón sea lo suficientemente rápida para mantener las concentraciones de superficie del Oxidante (O) y del Reductor (R) en los valores requeridos por la ecuación de Nernst. Por tanto, la reversibilidad depende de los valores relativos de;

- La constante de tasa de transferencia de electrón (k_s).
- La tasa de cambio de potencial.
- La velocidad de barrido (SR).



Si los valores de k_s son mayores que 1 cm/s el proceso de transferencia electrónica es rápido, mientras que si son del orden de 0.1 cm/s la transferencia electrónica será lenta a SR bajos y rápida a SR altos.

En el caso que una sustancia electroactiva tenga asociada una reacción química al proceso de transferencia electrónica, esto se reflejará en el voltamograma mediante la obtención de una onda irreversible.

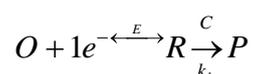
Mediante el uso de la VC podremos determinar la velocidad de la reacción por aumento de la velocidad de barrido de potencial hasta la obtención de una onda reversible, que nos indicará la presencia de una especie en esa escala de tiempo.

Además, por el estudio de los parámetros asociados al proceso de transferencia electrónica, tales como i_p y E_p , se podrá saber la naturaleza de la reacción química asociada a la transferencia electrónica. De esta forma será posible conocer si la reacción química (etapa determinante de la velocidad) es de primer o segundo orden, así como si se observa o no el efecto de la concentración al estudiar la variación de los valores obtenidos en cada voltamograma con la velocidad de barrido de potencial.

Reacciones Químicas del Oxidante (O) y del Reductor (R) [Gro93]:

Los valores de equilibrio de O y R solamente pueden ser mantenidos en un experimento de VC si ambos son estables dentro del tiempo en que se realiza la prueba.

Por ejemplo, si consideramos el proceso:



Donde el oxidante pasa a ser Reducido y acto seguido le sigue la conversión del Reducido a Producto, entonces se ve que debe generarse más cantidad de Reducido para compensar esta pérdida. Por tanto, la tasa de reducción se incrementa y E_{pc} se mueve a un valor más positivo.

En resumen, $\frac{i_{pa}}{i_{pc}}$ es menor que uno (ya que el valor en el barrido directo no es igual al barrido inverso) y el valor de la corriente sólo puede ser modificado por reacciones químicas que siguen a la transferencia del electrón.

El efecto de una reacción química depende del cociente $\frac{k}{SR}$ (donde k es la tasa de la reacción química).

Si el valor del cociente es grande la reacción química tiene un gran efecto, mientras que si es pequeño tendrá poco efecto. Por tanto, es posible eliminar el efecto de la reacción química (y con esto restaurar la reversibilidad) aumentando SR.

La tasa de la reacción química k puede ser calculada mediante estudios de simulación o investigando el efecto de SR en $\frac{i_{pa}}{i_{pc}}$.

Aunque la VC está ampliamente utilizada para la caracterización inicial redox de una molécula (por ejemplo los potenciales redox y la estabilidad de los diferentes estados de oxidación) y para investigaciones cualitativas de reacciones químicas que acompañan a la transferencia de electrón, existen algunas desventajas inherentes a esta técnica:

1. Los efectos de una transferencia heterogénea y lenta de electrón y las reacciones químicas no pueden ser separados. Si estos dos procesos están presentes entonces las constantes de tasa sólo pueden ser calculadas utilizando métodos de simulación.
2. Existe una corriente de carga secundaria propia del experimento, de magnitud $SR \cdot C_{dl}$ (donde C_{dl} es la capacidad del electrodo). Esto restringe el límite de detección. En resumen, el cociente de la corriente faradaica de pico con la corriente de carga, disminuye al aumentar SR (ya que i_p es proporcional a $SR^{1/2}$), y esto aumenta el límite del valor de SR que puede ser utilizado.

A grandes rasgos, se puede concluir que la voltametría cíclica es una poderosa herramienta para la determinación de potenciales redox formales; detección de reacciones químicas que preceden o continúan a una reacción química, y evaluación de la cinética del electrón.

Además una de las características más importantes de la VC es su gran versatilidad, permitiendo trabajar con una buena sensibilidad en un rango amplio de potenciales y con una escala de tiempo variable.

1.3 MOTIVACIÓN PARA EL TRABAJO: CARACTERIZACIÓN DE DISPOSITIVOS ELECTROCRÓMICOS.

Este proyecto nace fundamentalmente de las investigaciones sobre las propiedades ópticas y eléctricas, así como las utilidades de los materiales electrocrómicos realizadas en el Grupo de Displays y Aplicaciones Fotónicas (GDAF), perteneciente al Departamento de Tecnología Electrónica de la Universidad Carlos III de Madrid. Este grupo trabaja en colaboración con el centro de investigación de tecnologías electroquímicas donostiarra CIDETEC, que desarrolla dispositivos poliméricos.

Se intenta conseguir nuevos materiales EC, para lo cual es necesario el estudio y caracterización de éstos, con el fin de obtener un material estable y capaz de cubrir los requerimientos establecidos en las aplicaciones actuales o en otras nuevas.

Dentro de esta caracterización, un equipo portátil de voltametría cíclica puede ser realmente útil para comprobar los parámetros de cada dispositivo incluso dentro de las salas donde sean fabricados. Al inicio de este trabajo, el GDAF no disponía de un equipo medidor de voltametría cíclica, por lo que desarrollar uno se convirtió en el objetivo del mismo. Posteriormente, se le añadió el concepto de portabilidad como valor añadido a los ya existentes en el mercado, de cara a su posible uso por parte de CIDETEC.

Existen en el mercado varios equipos capaces de medir voltametría cíclica, como por ejemplo: **PCI4/300**, **PCI4/750** y el **FAS2 Femtostat**, que pertenecen a la marca **GAMRY**, y se instalan en los slots del interface de conexión de periféricos del Pc. La resolución de corriente del PCI4/300 y del PCI4/750 baja a 1 fA y 2.5 fA, respectivamente, y comparte una capacidad de resolución de voltaje de 1 μ V, además tienen una salida de corriente de 300mA y 750mA.

El Femtostat FAS2 fue diseñado específicamente para aplicaciones que requieren una alta sensibilidad, desempeñando una mayor resolución de corriente de 0.01fA y una salida de corriente de 30mA, utiliza técnicas de procesamiento de señales digitales para medir impedancias de hasta 10¹³ ohms sobre una gama de frecuencias de 10 μ Hz a 1 MHz, sin utilizar un dispositivo externo.

A pesar de contar con la desventaja de ser materiales poco conocidos por el público fuera del ámbito científico, una vez que estén ya implementados y sean fiables, podrán ser unos de los dispositivos con mayor auge y desarrollo, ya que sus aplicaciones atraerían rápidamente a empresas tecnológicas y usuarios finales.

Por otra parte, una de las principales motivaciones para llevar a cabo este proyecto, ha sido el poder realizar mi pequeña aportación al desarrollo de estos materiales, con el fin de que estos dispositivos se lleguen a implantar y utilizar en la vida cotidiana; para ello, es necesario la caracterización de los mismos y poder obtener conclusiones definitivas sobre su comportamiento.





2. OBJETIVOS.

En las próximas líneas, se expondrán los objetivos que se han propuesto para llevar a cabo este proyecto.

2.1 CONSTRUCCIÓN DE UN MEDIDOR DE VOLTAMETRÍA CÍCLICA.

El objetivo de este proyecto es obtener un aparato portátil capaz de caracterizar dispositivos electrocrómicos, y obtener los valores más característicos (V_{EC} , I_{EC}) en un ordenador, para así dibujar sus gráficas y estudiar el rendimiento del dispositivo.

El aparato electrónico a construir tendrá que ser capaz de generar una señal que estimule los dispositivos electrocrómicos y que esté conectado en un PC para almacenar en un archivo los datos obtenidos. Estos datos, se mostrarán en gráficas dando lugar a voltamogramas, que son los diagramas para el estudio y caracterización de los EC.



El sistema debe generar una forma de onda adecuada para el uso de la técnica de voltametría cíclica, concretamente una señal triangular, además de variar su periodo (frecuencia) como su amplitud.

Al aplicar voltaje a los EC, se generan en su interior transformaciones químicas de oxidación y reducción que liberan electrones, estos son la corriente que consume el EC, la cual se espera alcance valores en torno al orden de centenas de μA y decenas de mA, pudiendo llegar hasta medir centenas de nA.

El medidor contendrá dentro del software un menú en el cual el usuario podrá seleccionar, dentro de un rango el valor de SR que desee, y el valor de potencial máximo que quiera aplicar al EC.

2.2 PRUEBA DE CARACTERIZACIÓN DE UN MATERIAL ELECTROCRÓMICO.

La caracterización de un dispositivo electrocrómico es un objetivo esencial, lo que se quiere conseguir es poder analizar el comportamiento de un material electrocrómico, cuando se le aplica un voltaje determinado, y obtener los datos necesarios para su estudio, por medio de la técnica de Voltametría Cíclica. De esta manera se conseguirá demostrar la consecución del objetivo anterior.



3. DISEÑO DEL SISTEMA. DISPOSITIVOS EMPLEADOS.

A continuación se describirá a grandes rasgos el contenido del proyecto, exponiendo las partes de que consta el sistema, y enumerando los componentes que se utilizaron en la composición de dicho aparato.

3.1 DESCRIPCIÓN FUNCIONAL DEL DISEÑO DEL SISTEMA. DIAGRAMA DE BLOQUES.

Para la creación del sistema medidor de voltimetría cíclica, se emplearán:

- Varios circuitos de generación y acondicionamiento para obtener la señal requerida.
- Un microprocesador que gobernará en todo momento las señales internas que afecten al aparato.
- Un sencillo sistema mecánico donde se conectarán los EC, con el fin de hacer pasar la onda triangular por él y obtener la corriente consumida por estos materiales.

Además de crear la forma de onda triangular y la posterior lectura de la corriente consumida del EC, el medidor se comunicará con un PC por medio de una comunicación serie estándar, así se evitarán los posibles problemas de compatibilidad o de conexión.

A continuación se describirán las partes integrantes del sistema, donde por medio de un sencillo diagrama de bloques, como se muestra en la figura 10, se irán explicando las funciones de cada una.

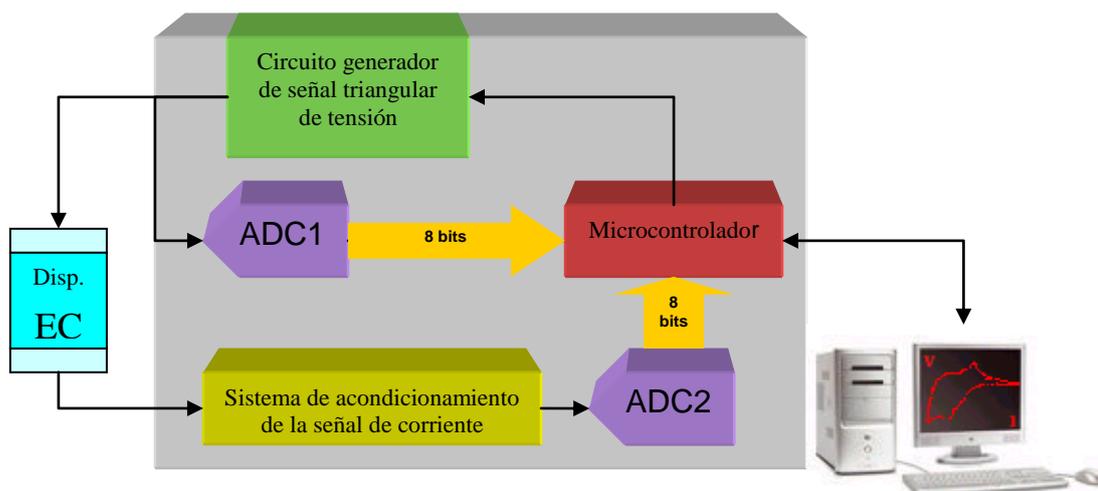


Figura 10. Diagrama de bloques del sistema.



En primer lugar, se encuentra el circuito generador de la señal triangular de tensión, forma de onda esencial para realizar la técnica de voltametría cíclica. Como es de esperar a la salida de este circuito, habrá una señal que varíe tanto de amplitud como de frecuencia, con el fin de poder excitar al EC de varias maneras, incrementando o disminuyendo el potencial máximo, además de reducir o aumentar el tiempo que tarda en llegar al voltaje máximo.

Para aplicar al EC la señal triangular anteriormente generada, se utilizarán cables con cabeza de cocodrilo que se conectarán en los extremos del material. Además en uno de los extremos se obtendrá la corriente saliente del EC.

En el momento de aplicar el voltaje al EC, comenzarán unas transformaciones químicas en su interior, produciendo una corriente saliente que será la que dé paso a explicar la siguiente parte; el circuito de acondicionamiento de la señal de corriente.

Este bloque, se encarga de recoger la corriente y acondicionarla para que, en otro punto del sistema, se trabaje con ella. El problema que surge en este sistema, es que la corriente saliente del EC, puede llegar a alcanzar valores muy por debajo del amperio, por lo que el circuito de acondicionamiento debe ser muy preciso en la captación de la corriente y en su posterior tratamiento.

Por último, pero no por ello menos importante, se encuentra un microcontrolador, cuyas funciones son de gestionar las señales, almacenar los datos, y comunicarse con un ordenador. El microcontrolador es el cerebro del sistema, él se encarga de iniciar la fase de generación de la señal triangular, almacenar en todo momento el voltaje que se aplica al EC y la corriente que sale de éste, así como de transferir estos datos a un ordenador, el cual creará un archivo con los datos proporcionados por el microcontrolador, con el fin de obtener las gráficas de voltamogramas para la caracterización de estos materiales.

3.2 ELECCIÓN DE COMPONENTES.

En este apartado se detallarán las partes del sistema profundizando en los componentes utilizados que forman el mismo, como son: generador y control del voltaje, medición de corriente, elección del microcontrolador e interfaz del usuario.

3.2.1 GENERADOR Y CONTROL DEL VOLTAJE.

Los componentes que se van a utilizar en esta parte, son elementos de electrónica básica, concretamente resistencias, condensadores y amplificadores operacionales (A.O.), todos ellos gestionados por un microcontrolador que se describirá en los próximos puntos de este apartado.

En este punto se genera una señal de voltaje, según las características anteriormente mencionadas. En la figura 11 se muestra el diagrama donde se puede apreciar en qué consiste el bloque generador de voltaje.

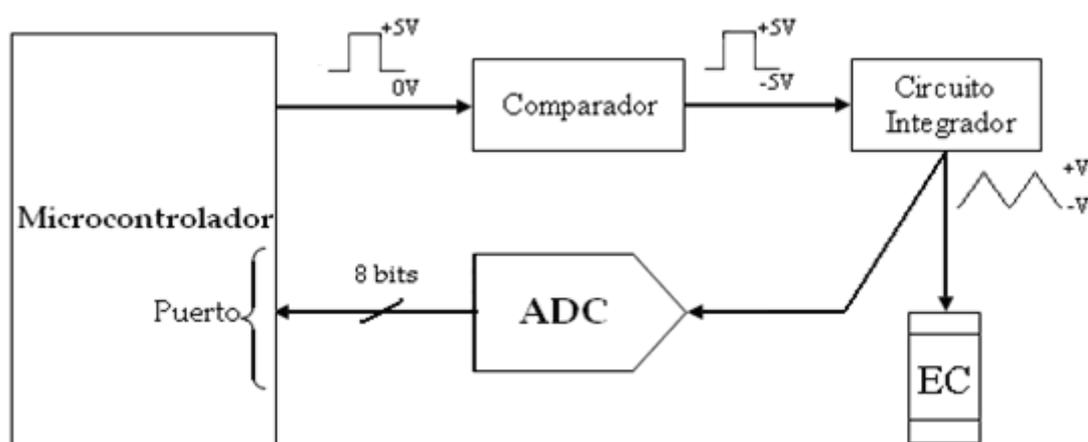


Figura 11. Bloque generador de voltaje.



Los valores fijos de tensiones extremas que se podrán aplicar al EC son: $\pm 0.5V$, $\pm 1V$, $\pm 1.5V$, $\pm 2V$, $\pm 2.5V$, $\pm 3V$., siguiendo las recomendaciones del fabricante (CIDETEC), y además no se tiene constancia de valores superiores a estos.

Para obtener una onda triangular cuyo valor de pico sea de estos voltajes, se utilizará una de las configuraciones de los amplificadores operacionales, el *circuito integrador*.

Este convertidor de señal, transformará una señal cuadrada simétrica en una onda triangular con la misma frecuencia que la señal de entrada.

El microcontrolador genera una señal cuadrada, de frecuencia igual a la que se quiera en la onda triangular; pero la señal cuadrada no es simétrica, siendo en su nivel alto $+5V$ y nivel bajo $0V$.

Existen varios circuitos para transformar una señal no simétrica en una simétrica, entre ellos se encuentra el circuito comparador.

El comparador está formado por un amplificador, el cuál irá comparando la señal perteneciente del micro con un voltaje concreto, y dependiendo de si la comparación es positiva o negativa, el amplificador se saturará de forma igual al signo de comparación realizado.

El A.O. utilizado es el MAX952, el cuál posee unas características acordes al dispositivo necesario, como puede ser tener un *slew rate* muy rápido y ser un dispositivo que se alimenta a $\pm 5V$. Así, cuando se saturé se obtendrá una señal cuadrada simétrica.

El circuito comparador se muestra en la figura 12.

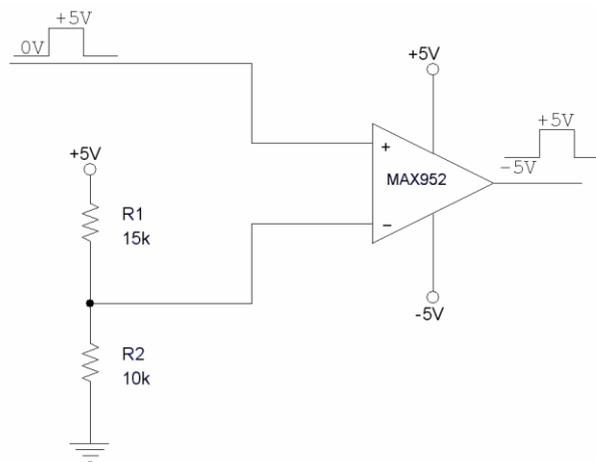


Figura 12. Circuito comparador.

En la entrada negativa se ha conectado un circuito potenciométrico, que está compuesto de 2 resistencias de valores concretos para obtener en su punto medio de unión un voltaje de 2V, como sigue a la fórmula:

$$\text{Siendo } \begin{cases} R_1 = 15k\Omega \\ R_2 = 10k\Omega \end{cases} \quad V_- = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot 5V \Rightarrow V_- = 2V$$

$$\text{Si } V_+ - V_- = \begin{cases} * \text{ si } V_+ = 5V \text{ ----- } V_+ - V_- > 0 \text{ ----- } V_{\text{salida}} = +5V \\ * \text{ si } V_+ = 0V \text{ ----- } V_+ - V_- < 0 \text{ ----- } V_{\text{salida}} = -5V \end{cases}$$

Una vez que se tiene la señal cuadrada simétrica, se conecta al circuito integrador, que está compuesto por un A.O., resistencias y un condensador. El esquema eléctrico del integrador se muestra en la figura 13.

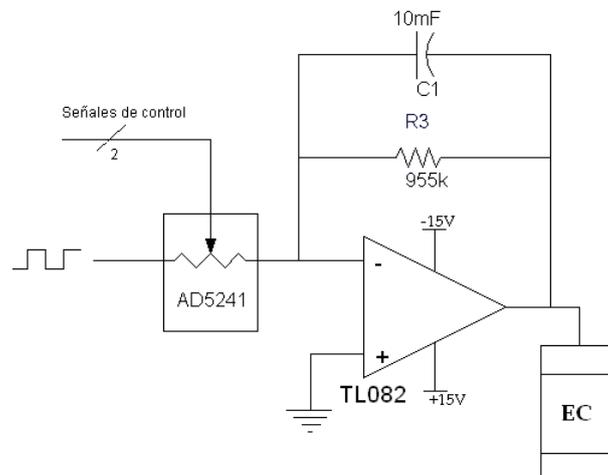


Figura 13. Circuito Integrador.

Como se quiere realizar varios experimentos con diferentes SR, el circuito integrador deberá ir modificándose con respecto a las pretensiones del usuario, por lo tanto tendrá que haber un componente que varíe de valor a medida que se cambie el SR. Ese dispositivo es el AD5241 (potenciómetro digital), el cual por medio de unas señales de control, varía su valor de resistencia.

Se pensó en un principio utilizar VDR, varistores que por medio de una tensión varían su resistencia, pero se observó que no abarcaban todo el rango de Scan Rate requerido, es decir, por muchos VDR que se colocase, no se llegaba a obtener un valor máximo de resistencia de $1M\Omega$, con lo que no se puede usar estos componentes.

En un principio, el rango de SR era de $100mV/s$ hasta $500\mu V/s$, siguiendo las necesidades de caracterización del grupo investigador, pero más adelante se consiguió aumentar este rango, de lo cual se hablará más adelante.

El A.O. elegido es el TL082: está alimentado a $\pm 5V$ ($V+$, $V-$), los materiales EC son bastantes lentos en su conmutación, y ello obliga a veces a SR muy pequeños en los experimentos de voltametría cíclica [Alle01], por lo que la frecuencia mínima es de $166 \mu\text{Hz}$ ($T= 6000 \text{ s}$).

La frecuencia a la que empezamos a integrar es de $16,66 \mu\text{Hz}$, es decir, 10 décadas por debajo de la frecuencia mínima para garantizar que la malla RC no produzca atenuación en el amplificador a las frecuencias de trabajo de este. Suponiendo un condensador de $C=10\text{mF}$, se podrá obtener el valor de la resistencia que se debe colocar en el filtro.

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_3 C} \Rightarrow R_3 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 10\text{mF} \cdot 16,66\mu\text{Hz}} \Rightarrow R_3 = 955\text{k}\Omega$$

A continuación, para obtener el valor necesario de la resistencia R_{AD5241} (que será la que modificará la tensión de salida de la onda triangular) seguimos la fórmula del integrador:

$$V_0 = -\frac{1}{R_{AD5241} C} \int_0^t V_i \cdot dt$$

Operando:

$$V_0 \cdot R_{AD5241} \cdot C \int_0^t V_i \cdot dt \xrightarrow{\text{integrando}} V_0 \cdot R_{AD5241} \cdot C \int_0^t V_i \cdot dt = -V_i \cdot t$$

$$V_0 \cdot R_{AD5241} \cdot C \int_0^t V_i \cdot dt \xrightarrow{\text{despejando}} R_{AD5241} = \frac{V_i \cdot t}{V_0 \cdot C}$$

Si el scan rate es $SR = \frac{V_{salida}}{\text{tiempo}}$ $\left[\frac{V}{s} \right]$

Sustituyendo se obtiene que:

$$R_{AD5241} = \frac{V_i \cdot t}{V_0 \cdot C} \Rightarrow \boxed{R_{AD5241} = \frac{V_i}{SR \cdot C}}$$

Realización de casos:

Caso 1 (máximo):

$$\left. \begin{array}{l} SR= 500 \mu V/s \\ V_0= 3 V \end{array} \right\} R_{AD5241} = \frac{V_i}{SR \cdot C} = \frac{5}{500 \mu V / s \cdot 10 mF} = R_{AD5241} = 1 M\Omega$$

Caso 2 (medio):

$$\left. \begin{array}{l} SR= 50 mV/s \\ V_0= 0,5 V \end{array} \right\} R_{AD5241} = \frac{V_i}{SR \cdot C} = \frac{5}{50 mV / s \cdot 10 mF} = R_{AD5241} = 10 K\Omega$$

Caso 3 (mínimo):

$$\left. \begin{array}{l} SR= 100 mV/s \\ V_0= 0,5 V \end{array} \right\} R_{AD5241} = \frac{V_i}{SR \cdot C} = \frac{5}{100 mV / s \cdot 10 mF} = R_{AD5241} = 5 K\Omega$$

En resumen, cuando el usuario modifique el valor del SR, el microcontrolador mandará al potenciómetro digital unas señales de control, para que éste cambie el valor de su resistencia, de este modo el circuito integrador irá variando con respecto a los valores del SR, tanto en frecuencia como en amplitud.

3.2.2 MEDICIÓN DE CORRIENTE.

A continuación tendrá lugar la medición de la corriente que consume el EC. Para este apartado se utilizará un circuito convertidor corriente-tensión, o también conocido con el nombre de amplificador de *transimpedancia*. El esquema eléctrico aparece en la figura 14.

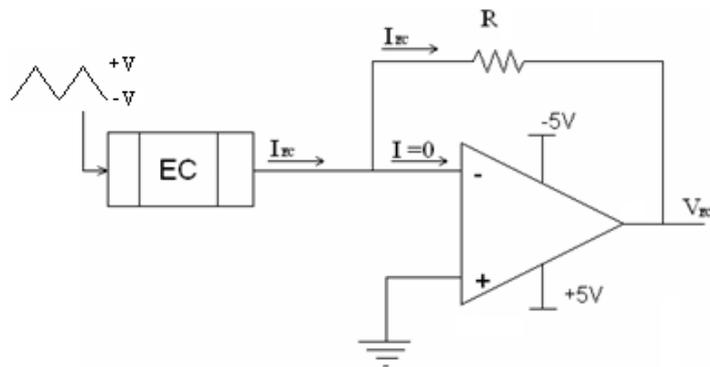


Figura 14. Convertidor Corriente-Tensión (I – V).

Gracias al convertidor podemos obtener la corriente en forma de voltaje, según la fórmula;

$$V_E = -R \cdot I_{EC} \quad (\text{Ley de Ohm})$$

Sabiendo el valor de la resistencia R, que se encuentra entre la salida y la entrada inversora, y midiendo el voltaje de salida, se consigue obtener el valor de la corriente que circula por el EC, gracias a la fórmula de Ley de Ohm; a todo esto, hay que considerar que el A.O. se encuentra en realimentación negativa, y que teóricamente no habrá corriente en sus entradas, así se considera que toda la corriente que sale del EC pasa por la resistencia y se convierte en tensión medible. Dadas las impedancias habitualmente halladas tanto en los electrocrómicos (entre centenas de kohms y ohmios) como en los TL081 (Megs), puede concluirse que esta aproximación es válida.

Una vez que ya se ha medido la corriente, habrá que guardar los datos V-I para su posterior estudio.

Tanto el voltaje de entrada como la corriente, están en forma de tensión, por lo que es muy fácil tratar esos valores por medio de un ADC (Convertidor Analógico-Digital) que transforme esos valores analógicos en datos digitales,

con el fin de que el microcontrolador sea capaz de entender esos datos y guardarlos en memoria o transmitirlo al puerto serie para su estudio.

El convertidor es una pieza clave en el sistema, y avisa al micro en qué situación se encuentra el sistema; para el caso del generador de tensión, el convertidor lee los valores de tensiones que se están aplicando al EC, y los traspa a al micro, éste los guarda y a la vez comprueba que no se ha llegado al límite impuesto por el usuario; cuando se ha llegado al punto de amplitud máximo expuesto por el usuario, el micro conmuta la señal de nivel bajo a nivel alto o viceversa.

Para el caso de la corriente, el ADC recoge el valor de la tensión de salida del circuito de transimpedancia, y lo manda al micro para que éste, junto con el dato del voltaje aplicado, envíe los datos a un PC por algún proceso de comunicación. El ADC utilizado es el AD7824, un convertidor de 8 bits, multicanal, es decir posee la cualidad de alternar 4 posibles entradas analógicas con lo que se evita añadir más convertidores a la placa, su alta velocidad es primordial para realizar las conversiones, y se alimenta a +5V. La configuración de sus pines se muestra en la figura 15.

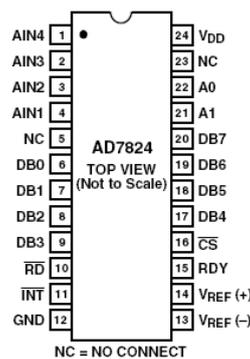


Figura 15. Pines del AD7824.

El rango de entradas analógicas es de $V_{REF(-)}/V_{REF(+)}$, es decir, si conectamos $-3V/+3V$, podemos convertir señales que se encuentren en ese rango de tensiones, ideal para el objetivo de leer las tensiones de la señal triangular, pero no es válido, ya que el convertidor sólo admite señales positivas, por lo se debe tratar las señales bipolares para que tomen la forma de una señal positiva.

En la hoja de características del AD7824 (**Anexo I-C**), se muestra una configuración para poder convertir señales bipolares, para ello se utiliza un amplificador y unas resistencias, con el fin de transformar la señal bipolar en una señal entre $0V$ y $+5V$, dicha configuración se muestra en la figura 16.

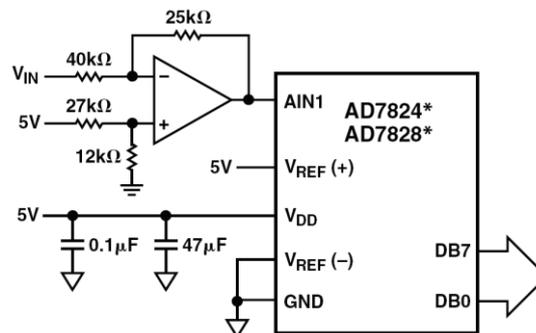


Figura 16. Modo bipolar AD7824.

El esquema que se muestra en la figura 16, se parte de una entrada V_{IN} de $\pm 4V$, que es transformada a una entrada entre 0 y $5V$, ya que ese es el rango que acepta el AD7824 ($V_{REF(-)}=0V$ y $V_{REF(+)}=5V$).

Es evidente que la configuración que se presenta en la figura 16, no es muy válida para el proyecto, ya que se perdería mucha definición, con lo que se calcularán los nuevos valores de las resistencias necesarias para una señal bipolar entre $\pm 3V$ (Control de tensión) y para $\pm 1V$ (Control de corriente).

3.2.2.1 CÁLCULOS PARA OBTENER VALORES DE TENSIONES:

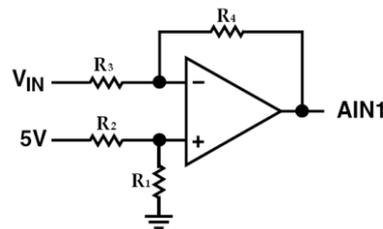


Figura 17. Configuración de acondicionamiento V_{IN} .

Las condiciones que se deberán presentar son:

- $A_{IN1}=0V$ cuando $V_{IN}=+3V$
- $A_{IN1}=5V$ cuando $V_{IN}=-3V$

Con estas condiciones las ecuaciones que se obtienen son:

$$\left. \begin{aligned} V_+ &= \frac{R_1}{(R_1 + R_2)} \cdot 5 \\ I &= \frac{V_{IN} - V_+}{R_3} \\ A_{IN1} &= V_+ - (I \cdot R_4) \end{aligned} \right\} \text{Operando, obtenemos unos valores de } \begin{cases} R_1 = 3750\Omega \\ R_2 = 10k\Omega \\ R_3 = 30k\Omega \\ R_4 = 25k\Omega \end{cases}$$

Estas resistencias son una de las posibles combinaciones que pueden dar lugar al paso de la señal bipolar a una unipolar, la fórmula simplificada para saber qué tensión es la que se está midiendo realmente es:

$$\boxed{A_{IN1} = 2,5 - 0,833 \cdot V_{IN} \quad \mathbf{V}}$$

3.2.2.2 CÁLCULOS PARA OBTENER VALORES DE LA INTENSIDAD:

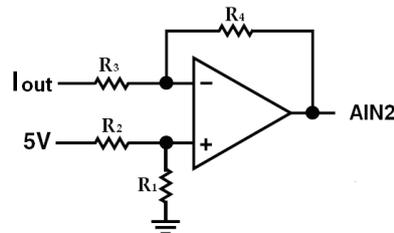


Figura 18. Configuración de acondicionamiento I_{out} .

La corriente que se obtendrá será baja, del orden de decenas o centenas de μA , por lo que si se conecta una resistencia del orden de unidades de $k\Omega$, se llega a tener un valor máximo de $\pm 1V$ a la salida del convertidor I-V, para casos por debajo de corrientes $\pm 150\mu A$, y con una resistencia de $6,8k\Omega$.

Suponiendo uno de los casos límites:

$$I_{EC} = 150\mu A \rightarrow V_{I-V} = I_{EC} \cdot R_{I-V} = 150\mu A \cdot 6,8k\Omega \Rightarrow V_{I-V} = 1,02 \text{ V}$$

Es por ello que se eligen los valores de $\pm 1V$ para acondicionar la corriente al ADC.

Las condiciones que se deberán presentar son:

- $AIN2=0V$ cuando $V_{I_{out}} = +1V$
- $AIN2=5V$ cuando $V_{I_{out}} = -1V$

Al igual que ocurre para la configuración de acondicionamiento de V_{in} , obtenemos las mismas ecuaciones para el cálculo de las resistencias que formarán el circuito.

$$\left. \begin{aligned}
 V_+ &= \frac{R_1}{(R_1 + R_2)} \cdot 5 \\
 I &= \frac{V_{IN} - V_+}{R_3} \\
 AIN1 &= V_+ - (I \cdot R_4)
 \end{aligned} \right\} \text{Operando se tienen estos valores} \left\{ \begin{aligned}
 R_1 &= 1,6k\Omega \\
 R_2 &= 10k\Omega \\
 R_3 &= 10k\Omega \\
 R_4 &= 25k\Omega
 \end{aligned} \right.$$

Estas resistencias son una de las posibilidades que existen para que el circuito acondicionador sea unipolar, ya que la entrada de la señal es bipolar. La fórmula para saber la corriente que se está midiendo es la siguiente:

$$AIN2 = 2,5 - 2,5 \cdot V_{I_{oi}}$$

3.2.3 ELECCIÓN DEL MICROPROCESADOR.

Se ha utilizado el microcontrolador AT89S52 (Figura 18), perteneciente a la familia MCS-51 de Atmel, el cuál, posee unos requisitos acordes con las necesidades del sistema, como son:

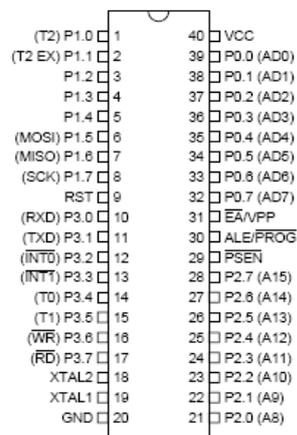


Figura 19. Microcontrolador AT89S52.

- 4 puertos de entrada y salida, para la conexión y control del sistema.
- 4 contadores/temporizadores para generar retardos y temporizaciones.
- Puerto de comunicación serie.
- Memoria Flash Programable necesaria para abarcar las líneas de código del sistema, concretamente una capacidad de 8K Bytes.

La elección de este microcontrolador AT89S52 viene determinada por varios motivos:

- Cumple con las necesidades del sistema.
- Conocimiento del funcionamiento, ya que en asignaturas cursadas en la titulación se estudiaron los microcontroladores de la familia 8x51.
- Material existente en el laboratorio, tanto software como hardware para trabajar con este microcontrolador.

3.2.4 INTERFAZ CON EL USUARIO (PC).

Para comunicar el sistema con un PC, se realiza una comunicación serie, por medio de un cable RS-232, el tipo de comunicación es Half-Duplex, de 2 hilos (Rxd y Txd), donde el cable Rxd se encarga de leer y el Txd de escribir.

El interfaz o medio por donde el usuario podrá seguir la evolución del sistema, es el programa Hyper Terminal del sistema operativo Windows, cuya ruta de acceso se muestra en la figura 20.

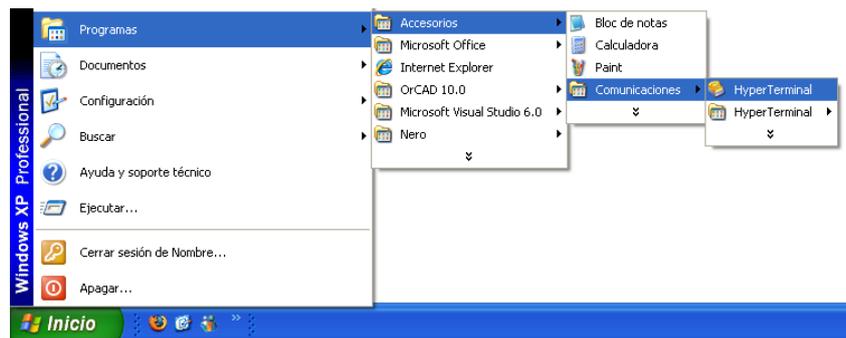


Figura 20. Programa Hyper Terminal.

Este programa nos muestra en la pantalla del PC, el menú donde el usuario podrá realizar la elección del SR y de su amplitud máxima, dando lugar a la aparición de los valores de tensión aplicada al EC y de la corriente consumida por el EC.

El Hyper Terminal nos ofrece la opción de crear una documento de texto, tal y como aparece en la figura 21. Este archivo *.txt* contendrá todo aquello que haya recibido el PC del sistema, con el fin de obtener las gráficas de voltametría cíclica necesarias para la caracterización del dispositivo EC.

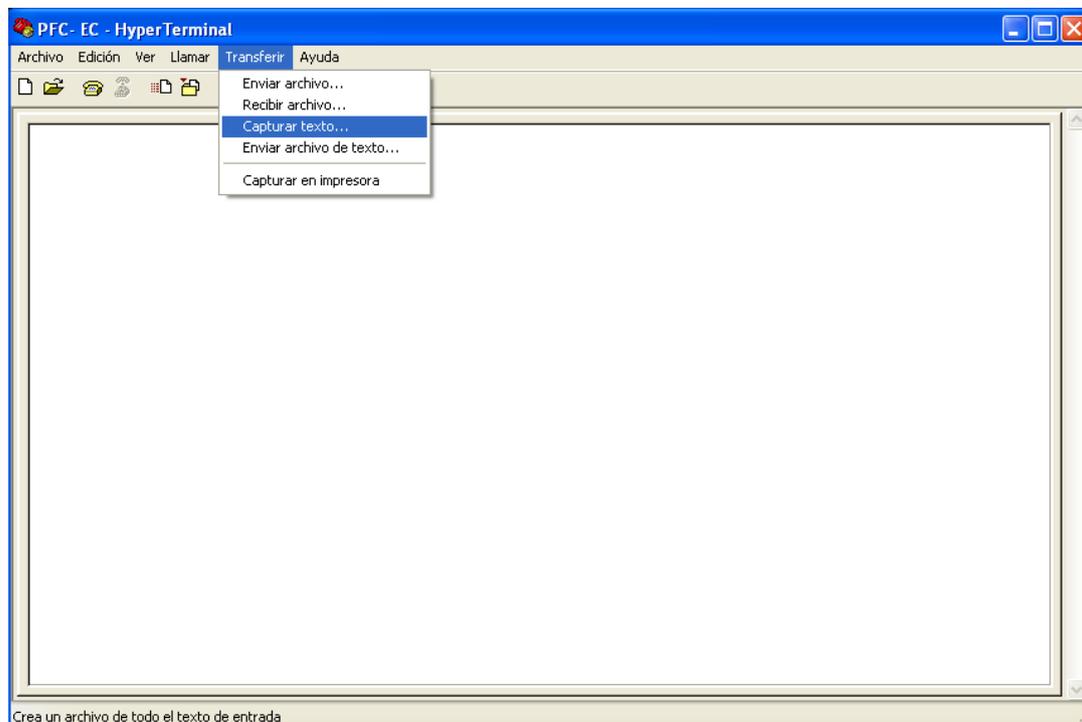


Figura 21. Método captura de texto.





4. DESARROLLO DEL SISTEMA.

En este punto, se detallarán con mayor profundidad las partes que componen el sistema tanto del hardware como del software.

Se describirá los circuitos y dispositivos empleados, explicando el porqué del uso de éstos, su conexión y tratamiento de la señales del sistema, además de ofrecer una visión del programa que gobierna el sistema por medio de flujogramas.

4.1 DISEÑO POR BLOQUES.

Para entender mejor el diseño del sistema electrónico, se dividirá por bloques para un seguimiento adecuado de los objetivos del proyecto, a continuación se expone un diagrama con las partes del sistema, donde aparecerán los circuitos como la alimentación, microprocesador, generador de la señal triangular, lecturas de datos, acondicionamiento de la corriente, comunicaciones, etc.

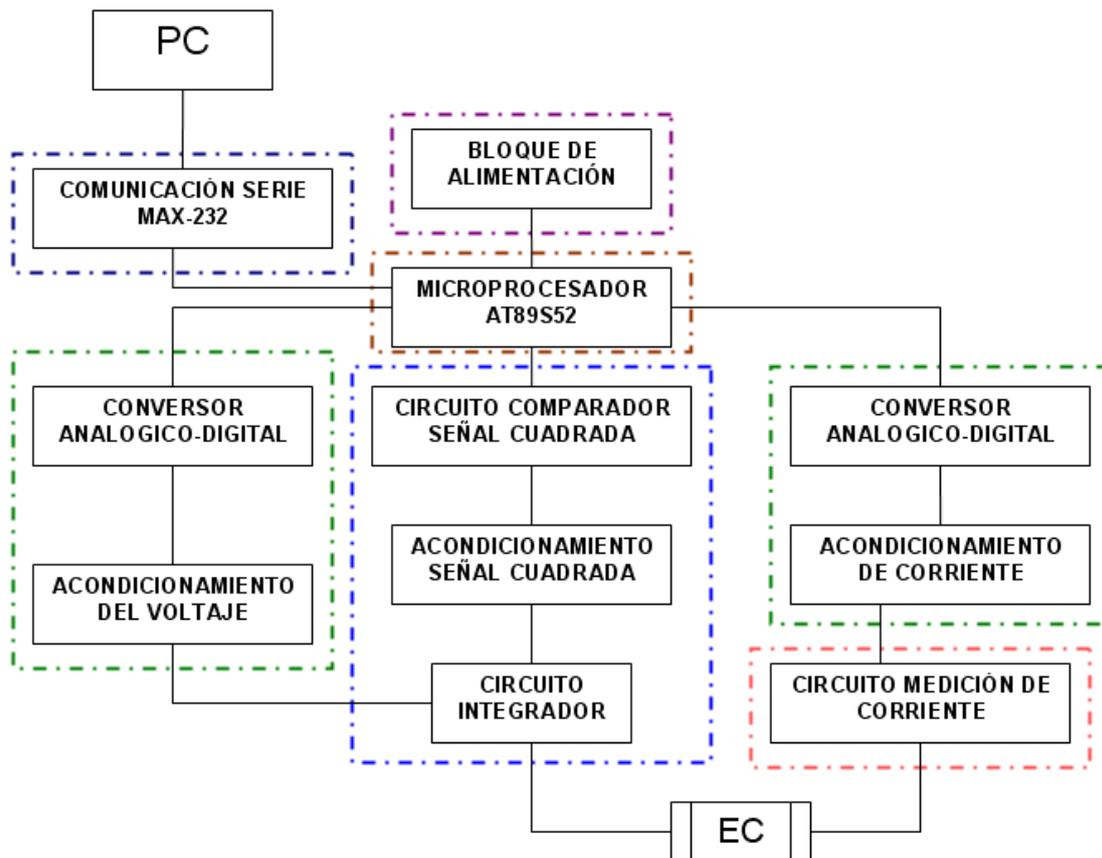


Figura 22. Diagrama de las partes de cada bloque.

4.2 DESCRIPCIÓN DETALLADA DEL SISTEMA.

Como se puede observar en la figura 22, el sistema consta de varios bloques que son fáciles de diferenciar por el color que los rodea, como son:

- *Bloque de alimentación (violeta).*
- *Microprocesador (marrón).*
- *Comunicación serie (azul oscuro).*
- *Acondicionamiento de señales (verde).*
- *Generador de señal triangular (azul).*

- *Medición de la corriente (rojo).*

Todos estos apartados corresponden al sistema hardware. En el caso del sistema software, se describirá el lenguaje de programación utilizado, así como las diferentes funciones que componen el programa, basándonos en flujogramas para su correcta y sencilla explicación.

4.2.1 DESCRIPCIÓN DEL HARDWARE.

En este punto se detalla la parte física del sistema, y se profundiza en los circuitos empleados para su implantación en una placa. Para ello se seguirá el diagrama de bloques que aparece en la figura 22.

4.2.1.1 BLOQUE DE ALIMENTACIÓN

Debido a la variedad de circuitos de los que está compuesto nuestro sistema, se necesitan varias alimentaciones para su correcto funcionamiento. Concretamente los siguientes valores: +8V, -8V, +5V y -5V, que alimentarán tanto a los A.O. evitando la saturación de éstos, como a los integrados digitales (ADC o microprocesador entre otros).

Uno de los objetivos del trabajo es conseguir que el sistema sea capaz de ser transportado con facilidad, es decir, un sistema portátil. Para ello se debe descartar la utilización de fuentes de alimentación que se usan en el laboratorio como pueden ser (LENDER DC POWER SUPPLY IMMY3003D-3). Para solucionar este inconveniente, se pensó en alimentar el circuito con un adaptador de tensión CA/CC, pero esta alternativa se desechó debido a que no se podían obtener de forma estable tensiones negativas.

Finalmente, se ha utilizado un transformador de toma intermedia conectado a un circuito rectificador, con el fin de rectificar la señal alterna de la red

(220Vac, $f=50\text{Hz}$), y convertirla en una señal continua que proporcione +12V y -12V.(Figura 23)

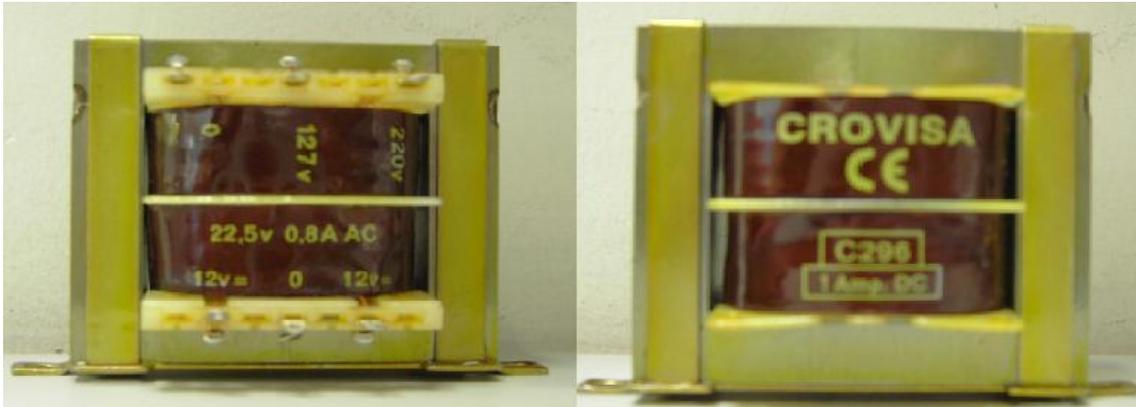


Figura 23. Transformador CROVISA de Toma intermedia de 12V.

Una vez que se tiene los +12V y -12V de continua, por medio de reguladores de tensión, se obtiene la alimentación necesaria para el correcto funcionamiento del sistema.

Se han empleado los sencillos y robustos reguladores integrados de la serie LM78XX (tensiones positivas) y LM79XX (tensiones negativas). Los reguladores LM78XX (**Anexo I-D**), que se utilizan son el LM7805 y el LM7808, y en el caso de los LM79XX, se utilizan el LM7905 y LM7908.

Se elige un LM7805, que proporciona, ante una entrada mayor de 10V (en este caso 12V) una tensión de salida de 5V, siempre que se monte con la configuración especificada que se puede ver a continuación, con un condensador $C1=0.33\mu\text{F}$ y $C2=0.1\mu\text{F}$.

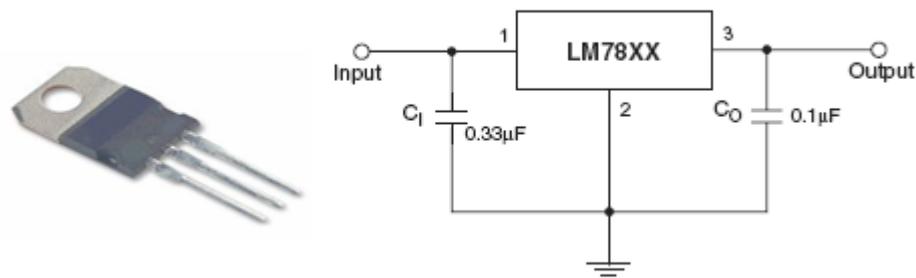


Figura 24. Regulador de tensión LM7805/08.

Para las tensiones negativas, se utiliza el regulador LM79XX, el cual funciona igual al LM78XX, a excepción del circuito de configuración, los valores de los condensadores y la posición de los pines del regulador.

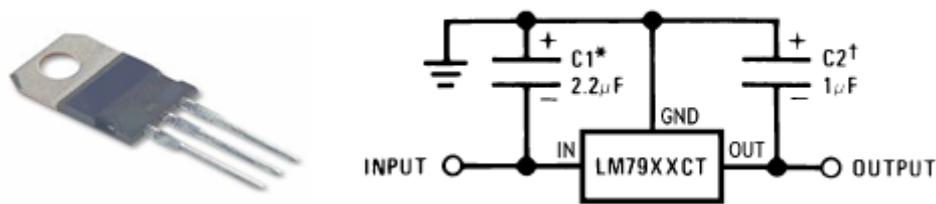


Figura 25. Regulador de tensión LM7905/08.

Para poder rectificar la señal alterna, procedente del transformador se utiliza un puente rectificador, de forma integrada y con las descripciones de 1A y 50V, además de los condensadores necesarios para poder filtrar la señal y disminuir el rizado, para lo cual se conectan dos condensadores de valor 2200 µF.

Todos los componentes mencionados en este punto se muestran en la figura 26 que representa el circuito del bloque de alimentación.

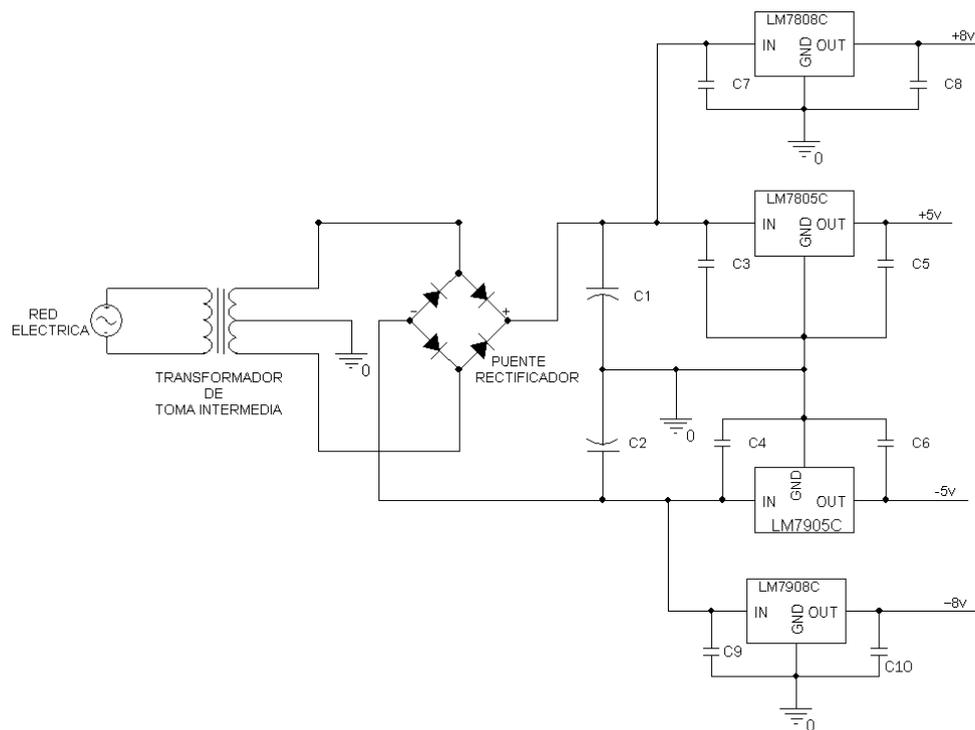


Figura 26. Circuito bloque de alimentación.

4.2.1.2 MICROPROCESADOR

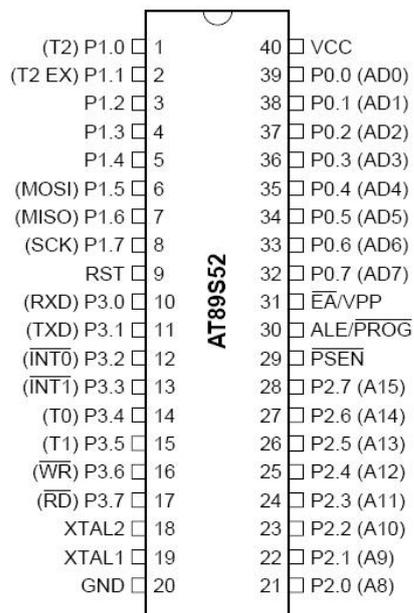


Figura 27. Microcontrolador AT89S52.

El microprocesador empleado, pertenece a la familia ATMEL, se trata del AT89S52, el cual posee unas características adecuadas a las pretensiones requeridas por nuestro proyecto, como ya se ha mencionado.

Se deben conectar al microcontrolador los circuitos de “reset”, y el “circuito oscilador”.

Se entiende como “reset” a la puesta en condiciones iniciales de un sistema. Este sistema puede ser mecánico o de otro tipo, en este caso electrónico. Normalmente se realiza al conectar el sistema, pero también se produce con un pulsador mediante un circuito electrónico externo. Así se puede volver a las condiciones iniciales de forma manual.

Cuando se acciona el reset, todo los pines de los puertos del AT89S52 se ponen a ‘1’ lógico. El reset se producirá cuando se mantenga la señal a nivel bajo durante al menos 2 ciclos de instrucción (24 ciclos de reloj). Los valores de condensadores y resistencia son los recomendados por el fabricante para el AT89S52. El circuito es el siguiente:

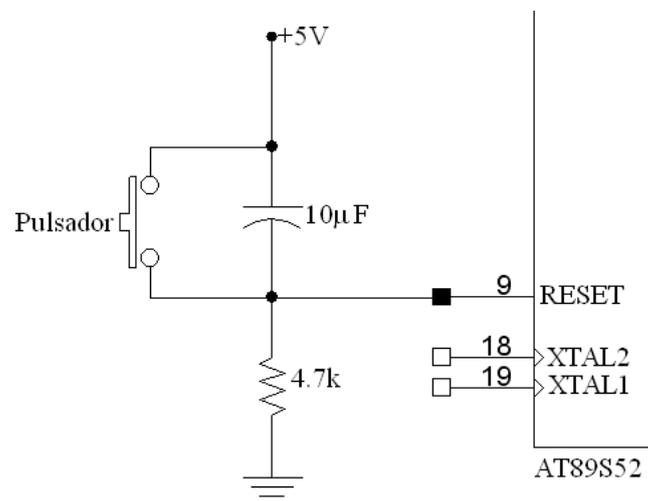
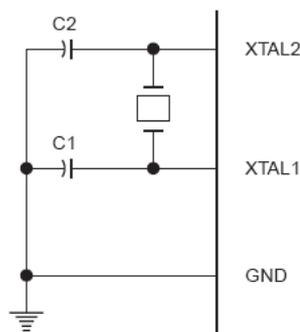


Figura 28. Circuito de Reset del microcontrolador.

Por otra parte, el circuito oscilador, marcará la velocidad de ejecución de las instrucciones, el tiempo de desbordamiento de los Temporizadores y la precarga a establecer para la comunicación serie, dependiendo del valor del cristal que se conecte. La frecuencia del cristal elegido es 11.0592MHz. Sabemos que 1 ciclo máquina = 12 ciclos de reloj, por lo tanto:

$$1 \text{ ciclo máquina} = \frac{f_{CLK}}{12} = 1 \text{ c.m.} = 1.085\mu\text{s.}$$

La conexión del circuito se hará como indica el fabricante en las hojas de características, donde los valores recomendados de condensadores para el cristal elegido son de $30 \text{ pF} \pm 10 \text{ pF}$, eligiendo condensadores de 33pF.



Note: C1, C2 = $30 \text{ pF} \pm 10 \text{ pF}$ for Crystals
= $40 \text{ pF} \pm 10 \text{ pF}$ for Ceramic Resonators

Figura 29. Circuito Oscilador del Microcontrolador.

El microcontrolador se puede comunicar con diversos dispositivos externos, como pueden ser memorias (para ampliar su capacidad), u ordenadores. En este caso se utiliza el sistema de comunicación serie, para comunicar el microcontrolador con un ordenador.

La comunicación se realiza a través de 2 pines, concretamente el pin 10 y el pin 11, que corresponden a RXD (recepción digital) y TXD (transmisión digital). En el siguiente punto se detallará con mayor detalle el porqué de este tipo de comunicación.



Además de todo lo mencionado, este microcontrolador posee fuentes de interrupción y temporizadores (timers), fáciles de configurar e utilizar. En los sucesivos apartados de este bloque se profundizará en las interrupciones y timers utilizados, en este proyecto.

Para más información acerca de las características del microcontrolador AT89S52, acudir al **Anexo I-E**.

4.2.1.3 COMUNICACIÓN PUERTO SERIE.

Para hacer que dos dispositivos se comuniquen entre ellos se necesita un método de comunicación y un lenguaje o protocolo entre ambos dispositivos. El transmisor envía pulsos que representan el dato enviado a una velocidad determinada, y el receptor “escucha” dichos pulsos a esa misma velocidad. Esta técnica es conocida como comunicación serie asíncrona, la cual, es la que se aplica para poder comunicar nuestro microcontrolador con un PC.

Conectamos el microcontrolador y el PC, intercambiado datos a una velocidad de 9600 bits por segundos (también llamados *baudios*), el PC capturaré el voltaje que le está enviando el micro, y cada $1/9600$ de un segundo, interpretará dicho voltaje como un nuevo bit de datos. Si el voltaje tiene valor HIGH (+5V), interpretará el dato como 1, y si tiene valor LOW (0V), interpretará el dato como 0. De esta forma, interpretando una secuencia de bits de datos, el Pc puede obtener el mensaje transmitido.

Es importante determinar el orden de envío de los bits, normalmente, el transmisor (micro) envía en primer lugar el bit con más peso (o más significativo), y por último el de menos peso (o menos significativo) del formato binario.

Como conclusión, para que sea posible la comunicación serie, ambos dispositivos deben concordar en los niveles de voltaje (HIGH y LOW), en la velocidad de transmisión, y en la interpretación de los bits transmitidos. Es decir, deben tener el mismo protocolo de comunicación serie (conjunto de reglas que controlan la secuencia de mensajes que ocurren durante una comunicación entre dispositivos). Generalmente se usa el protocolo serie llamado RS-232 e interfaces (conectores vs puertos serie) que utilizan dicha norma.

La mayoría de los PC's utilizaban el estándar RS-232 para la comunicación serie, pero actualmente los PC's están migrando hacia otras formas de comunicación serie, tales como USB (Bus Serie Universal), y Firewire, que permiten una configuración más flexible y velocidades de transmisión más altas.

Para conectar un dispositivo a un PC, necesitamos seleccionar un puerto serie y el cable apropiado para conectar al dispositivo serie. Se utiliza el cable RS-232 con la siguiente configuración:

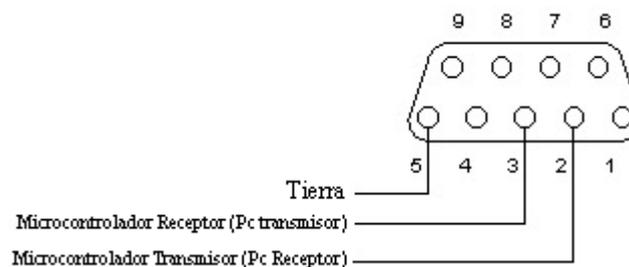


Figura 30. Conector RS-232 de 9 pines.

Para implementar este tipo de comunicación necesitaremos un dispositivo capaz de adaptar las tensiones del micro al ordenador, para ello se utiliza el circuito integrado MAX-232, que convierte los niveles de las líneas de un puerto serie RS232 a niveles TTL y viceversa.

El MAX-232 soluciona la conexión necesaria para lograr comunicación entre el puerto serie de un PC y cualquier otro circuito con funcionamiento en base a señales de nivel TTL/CMOS. (**Anexo I-F**).

La conexión para la comunicación serie se muestra en la figura 31, donde se ve una posible conexión del integrado con el DB9, para esta comunicación se ha escogido el pin14 como salida al RS-232 y el pin 13 como entrada de datos al sistema.

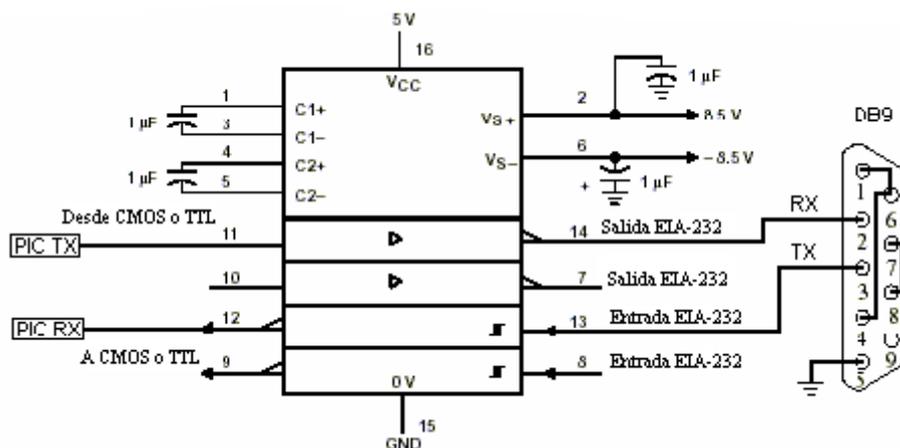


Figura 31. Conexión MAX-232.

4.2.1.4 ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL

Se obtienen del sistema unas señales que deben acondicionarse para que el micro pueda gobernar las secuencias de datos recibidos, como son la señal triangular inyectada al EC, y la corriente saliente de éste. El esquema eléctrico se muestra en la siguiente figura.

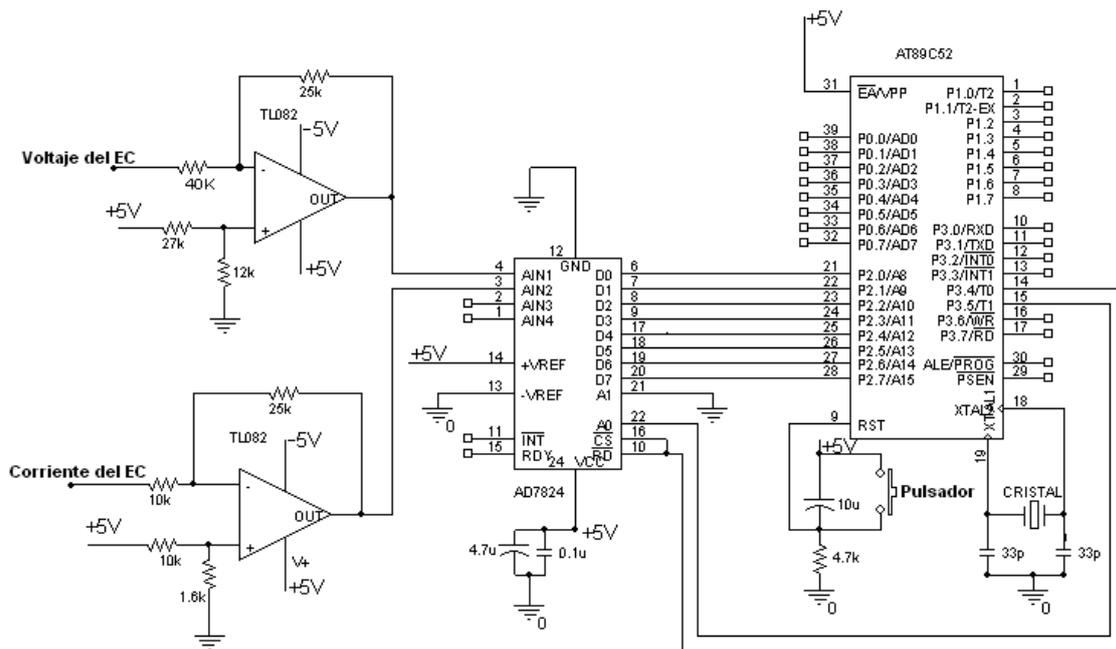


Figura 32. Esquema eléctrico. Acondicionamiento de la señal.

Para adaptar las señales se utiliza un dispositivo integrado, concretamente el convertidor analógico-digital AD7824.

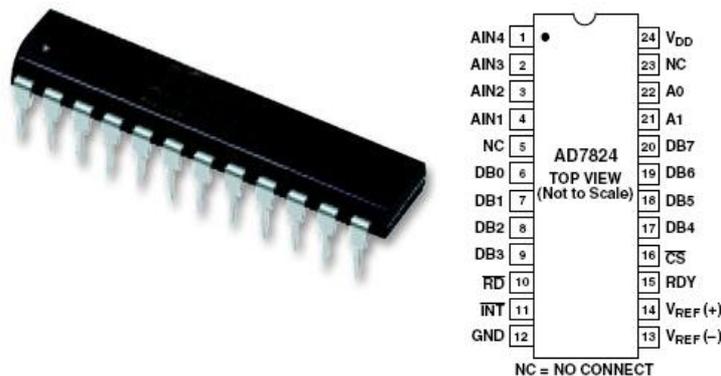


Figura 33. Convertidor AD7824.

Como ya se mencionó, el AD7824, tiene 4 entradas con las que por medio de 2 bits, se selecciona la entrada que se quiere; estos bits son el A0 y A1 que corresponden con los pines 22 y 21.

La tabla de la verdad para la selección del canal de entrada es:

Tabla I. Tabla de la verdad / Selección del canal de entrada

AD7824		AD7828			Canales
A1	A0	A2	A1	A0	
0	0	0	0	0	AIN1
0	1	0	0	1	AIN2
1	0	0	1	0	AIN3
1	1	0	1	1	AIN4
		1	0	0	AIN5
		1	0	1	AIN6
		1	1	0	AIN7
		1	1	1	AIN8

Figura 34. Tabla selector de canal AD7824.

Como tenemos 2 señales que debemos acondicionar, sólo usaremos dos de las cuatro entradas, quedando 2 entradas para aplicaciones o modificaciones futuras.

Para cambiar el canal de entrada, se conecta el pin 22 (A0), al pin 15 del micro, siendo éste el que conmutará la entrada del convertidor, cuando sea necesario. El pin 21 del AD7824 queda conectado permanentemente a tierra, es decir, un '0' lógico continuo.

Cabe destacar que este dispositivo, sólo convierte señales de entrada positivas, y que en nuestro caso se obtendrán tanto señales positivas y negativas. Para resolver este inconveniente, se conectan los circuitos de acondicionamiento (formados por A.O's y resistencias) a cada entrada del ADC tal y como se describe en los apartados 3.2.2.1 y 3.2.2.2 de este documento.

El AD7824 tiene dos entradas digitales para medir el tiempo y controlar al convertidor. Se trata del chip-select (CS) y leer (RD). Para realizar la operación de "Leer", tanto el CS como RD deben de estar a nivel bajo ('0' lógico), y entonces se inicia la conversión en el canal de entrada seleccionado por el multiplexor de entrada (A0 y A1).



Hay dos modos de operación para convertir los datos;

- Modo 0: Está destinado para microprocesadores que pueden ser gestionados dentro de un estado de espera.
- Modo 1: No requiere microprocesadores en estado de espera.

Para obtener los datos del convertidor, se utiliza el modo 1, ya que así, no forzamos al microprocesador a estar en un estado de espera.

Como se mencionó anteriormente, el proceso de “lectura de datos”, comienza cuando los pines CS y RD están en nivel bajo, los datos de la conversión anterior se leen desde las salidas tri-estado (DB7-DB0). Estos datos pueden ser ignorados, pero en nuestro caso, son los más importantes.

La salida del pin RDY, está en colector abierto, y no nos proporciona ningún tipo de información del estado en este modo de operación, con lo que se conecta a tierra. Al final de la conversión, el pin INT baja a nivel lógico 0.

Para realizar una segunda operación de lectura, es necesario acceder a los resultados de una nueva conversión, para ello se lanza una nueva dirección dentro del multiplexor de entradas y comienza otra conversión, el pin INT regresa al estado lógico 1, y los pines CS y RD retornan al nivel alto.

Una vez pasado este punto, se repetiría el proceso de conversión. El tiempo necesario para una correcta conversión será de 2,5 μ s. más que suficiente ya que la velocidad de barrido (SR) que se tendrá es muy lenta, de hecho es probable que se obtengan varios datos casi en el mismo punto, como se pueden apreciar en las tablas de datos dentro del **ANEXO I-C**.

En la siguiente figura se muestra el diagrama de tiempos que se ha de seguir para la correcta conversión.

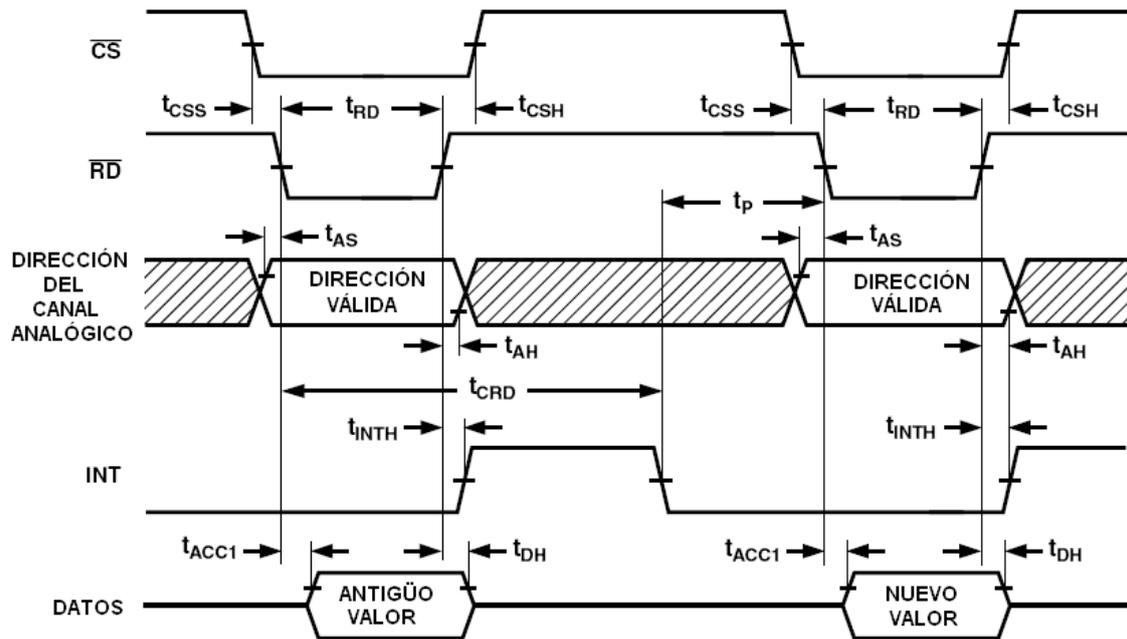


Figura 35. Diagrama de Tiempos Modo1. AD7824.

4.2.1.5 GENERADOR DE LA SEÑAL TRIANGULAR

Como se menciona en la introducción de este documento, se necesita una onda triangular para excitar a los dispositivos EC en la voltametría cíclica. Para realizar diversas medidas, que mostrarían el comportamiento del dispositivo EC, se irá variando tanto la amplitud como la frecuencia de la señal triangular de excitación.

El esquema eléctrico del generador de la señal triangular es el siguiente:

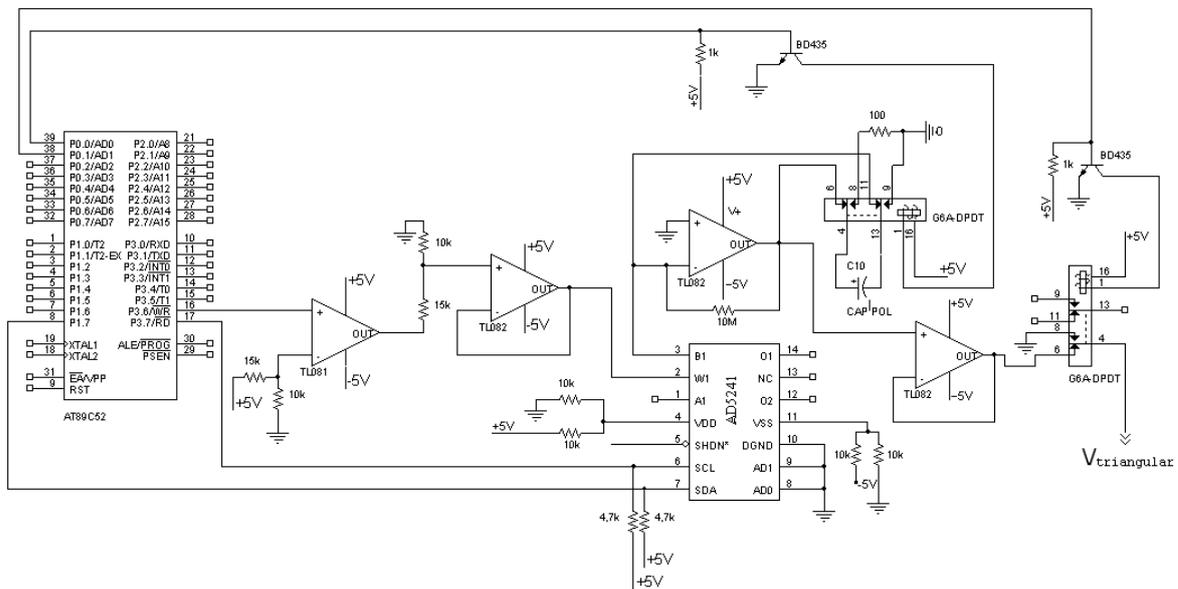


Figura 36. Esquema eléctrico generador de onda triangular.

El objetivo es variar tanto la amplitud y la frecuencia, al valor que imponga el usuario.

Lo primero que se hará es marcar unos límites o rangos determinados para el buen funcionamiento del sistema.

El rango que abarca el sistema tanto para amplitud como para la tasa de barrido aplicada al EC son, $[0V, \pm 3V]$ y $[200 \mu V/s, 50 mV/s]$ respectivamente.

Una vez que ya son conocidos los rangos; se explica el razonamiento seguido para poder variar la onda triangular.

En primer lugar, se explica cómo variar la amplitud, basándose en la teoría del circuito integrador, como muestra la siguiente figura:

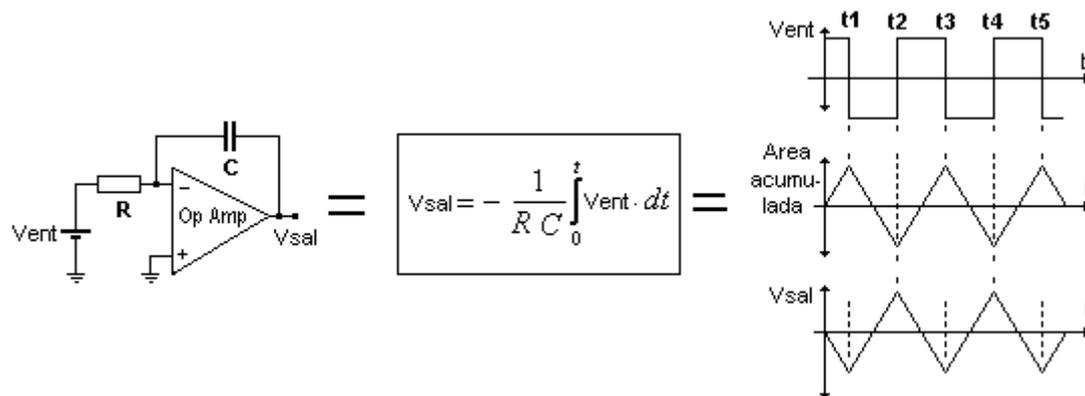


Figura 37. Ejemplo onda cuadrada-triangular.

Como se observa en la figura 37, si los tiempos de conmutación (t_1, t_2, \dots) de la señal cuadrada varían, la señal integrada (triangular), irá aumentando o disminuyendo su amplitud.

Por lo tanto, sólo se tiene que variar los tiempos de conmutación de la onda cuadrada que se integra, para poder variar la amplitud. Hay que tener en cuenta, que esto sólo se cumple cuando la pendiente de la triangular es la misma, es decir, en la fórmula del integrador, la pendiente corresponde a los datos, $\frac{1}{R \cdot C}$, por lo tanto si modificamos algún dato de esta fórmula, se modifica la pendiente, y por lo tanto se modifica la frecuencia.

En definitiva, ya se ha demostrado el proceso, para variar la amplitud y la frecuencia de la señal.

- Para variar su amplitud, depende de los tiempos de conmutación de la onda cuadrada, que se integrará para obtener la señal triangular, siempre y cuando la pendiente sea constante.
- Para poder controlar la tasa de barrido o SR de la señal triangular, se modificará el valor de la resistencia R, según la fórmula $\frac{1}{R \cdot C}$.

Evidentemente, debe existir algún dispositivo, para ir modificando los valores;

- Para modificar los tiempos de conmutación, el encargado de variar estos tiempos es el Micro (AT89S52).
- Para el apartado de la frecuencia, utilizaremos un Potenciómetro Digital, que será controlado por el AT89S52, es decir, el valor de R será modificado por el potenciómetro que a su vez será controlado por el micro.

Hay diversos potenciómetros digitales en el mercado, para este proyecto se ha utilizado el potenciómetro **AD5241**, de la marca *Analog Devices*, el cual posee una resistencia máxima de 1M Ω .



Figura 38. Pineado, Foto y Diagrama de bloques del AD5241.

Las principales características de este potenciómetro son:

- El valor máximo del potenciómetro es 1M Ω (existen pocos potenciómetros que lleguen a esta valor resistivo).
- Doble alimentación, idónea para operar con aplicaciones bipolares. (MAX= $\pm 2,7V$).
- Interfaz **I²C** compatible con un bus serie. (Comunicación 2 hilos)
- 256 posiciones.

- Salidas lógicas extras, programables (muy útiles para posibles aplicaciones futuras como activar o desactivar pines de algún integrado).

El valor del AD5241 se irá modificando siguiendo el protocolo de comunicación I²C, es decir, 2 vías de entrada que son el CLK (reloj) y DATA (datos).

El potenciómetro tiene 256 posiciones, por lo que la resolución para 1MΩ es:

$$RESOLUCIÓN = \frac{1M\Omega}{256} = 3906,25\Omega \Rightarrow 3,906k\Omega$$

Nuestro potenciómetro debe trabajar en modo bipolar, así que deberá funcionar tanto para entradas positivas como negativas.

La máxima alimentación que soporta, en modo bipolar es de ±2,7V, por lo que debemos modificar la señal cuadrada (±5V) a un rango inferior. Concretamente se reduce a una señal cuadrada de ±2V, y alimentamos al potenciómetro con ±2.5V, tal y como se muestra en el esquema eléctrico de la figura 36, donde Vdd y Vss es la alimentación de +2,5V y -2,5V respectivamente.

El diagrama para escribir un nuevo valor de resistencia en el potenciómetro se muestra en la figura 39.

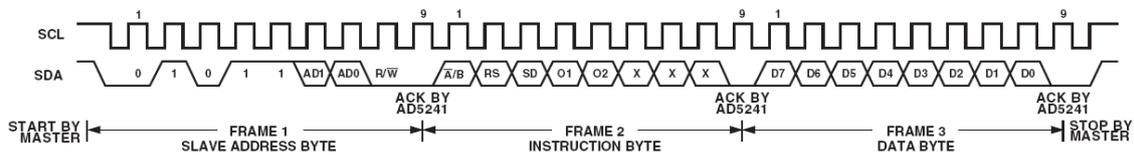


Figura 39. Diagrama escritura del AD5241.



Se utilizan 3 Frames, para configurar y escribir el valor o posición que se quiere. Como se observa en la figura, hay una condición de START, que se deberá cumplir para iniciar la escritura del potenciómetro.

A continuación vienen los 3 frames, cada uno de 8 pulsos de reloj, que corresponden con 8 bits para configurar o escribir.

Al finalizar los frames, existe un noveno pulso (ACK), el cual informa al Maestro, en este caso el micro, de que el potenciómetro recibió con éxito todos los datos del frame.

Para finalizar la escritura del potenciómetro, se debe cumplir la condición de STOP, primordial para que el potenciómetro salga del proceso de escritura, y actúe como resistencia al valor programado.

Las operaciones que se realizan en cada frame, son las siguientes:

- *Frame 1 (Dirección del Byte Esclavo)*: Consiste en 7 bits de dirección auxiliar, seguidos del bit R/\overline{W} . Si el bit es 0, el potenciómetro pasa a modo de escritura, pero si es el bit es 1, se encuentra en el modo lectura.
- *Frame 2 (Instrucciones del Byte)*: Este frame es el de configuración, en él se puede configurar al potenciómetro, para que empiece desde el punto medio de su escala, que cortocircuite los terminales del cursor a un extremo del potenciómetro o dar valor lógico a las salidas de los pines O_1 y O_2 .
- *Frame 3 (Datos del Byte)*: Aquí se introduce el valor que se quiere que alcance el potenciómetro, los datos estarán en binario, y el primer bit es el MSB.

El modo de obtener los datos del valor en binario, se explicará, en el apartado “Descripción del Software”, ya que se trata de una conversión hecha en lenguaje C.

Para más información de las características del potenciómetro digital AD5241, acuda al **Anexo I-G**.

Volviendo a la señal triangular y a la fórmula de la pendiente, hay un dato que será constante en todo momento, y es el valor del condensador. Para hallar el valor concreto del condensador, nos basamos en el rango de SR.

Sabemos que el valor máximo pedido, son 50 mV/s , y aplicamos la fórmula del integrador:

$$V_0 = -\frac{1}{R_{AD5241} C} \int_0^t V_i \cdot dt$$

Si se despeja de la fórmula V_0 y el tiempo t , considerado para 1 segundo, obtenemos, el valor de SR;

$$SR = \frac{V_0}{t}$$

Caso mínimo:

$$\left. \begin{array}{l} SR = 50 \text{ mV/s} \\ V_0 = 0,5 \text{ V} \\ R_{AD5241} = 3,9 \text{ k}\Omega \end{array} \right\} C = \frac{V}{SR \cdot R_{AD5241}} = \frac{2}{50 \text{ mV/s} \cdot 3,9 \text{ k}\Omega} \approx C = 10 \text{ mF}$$

Como el valor de C es constante y el valor máximo de R_{AD5241} es de $1 \text{ M}\Omega$, sólo nos queda despejar de la ecuación el límite máximo del SR.

$$SR_{\text{máximo}} = \frac{V_i}{R_{\text{máx}} \cdot C} = \frac{2}{1 \text{ M}\Omega \cdot 10 \text{ mF}} \rightarrow SR_{\text{máximo}} = 200 \text{ }\mu\text{V/s}$$

Por lo que el rango definitivo del SR $[50 \text{ mV}/s - 200 \mu\text{V}/s]$. Este rango cumple con unas de las especificaciones marcadas al inicio de este proyecto, de hecho se ha aumentado el rango abarcando más datos en los extremos.

La frecuencia a la que se empieza a integrar es de $16,66 \mu\text{Hz}$ ($T=6000\text{s}$), es decir, 1 década por encima de la frecuencia mínima. Con valor del $C=10\text{mF}$, se podrá obtener el valor de la resistencia que se debe colocar en el filtro.

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_3 C} \Rightarrow R_3 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 10\text{mF} \cdot 16,66\mu\text{Hz}} \Rightarrow R_3 = 955 \text{ K}\Omega$$

Ya se puede crear el circuito integrador, que convertirá a la señal cuadrada antes generada en una señal acorde para excitar al EC.

Hay que tener en consideración que todos estos cálculos, son para un instante t_0 =inicial, es decir, el condensador se considera inicialmente descargado, con lo que la señal triangular, parte inicialmente de 0V .

La forma de partir siempre de las mismas condiciones iniciales (c.i.) es muy sencilla, basta con descargar al condensador, siempre y cuando se inicie una nueva medida.

Para ello, utilizamos réles que harán conmutar el circuito integrador, abriendo el circuito cerrado en la malla de realimentación, aislando al condensador y forzándole a su descarga inmediata, tal y como se muestra en la figura 40.

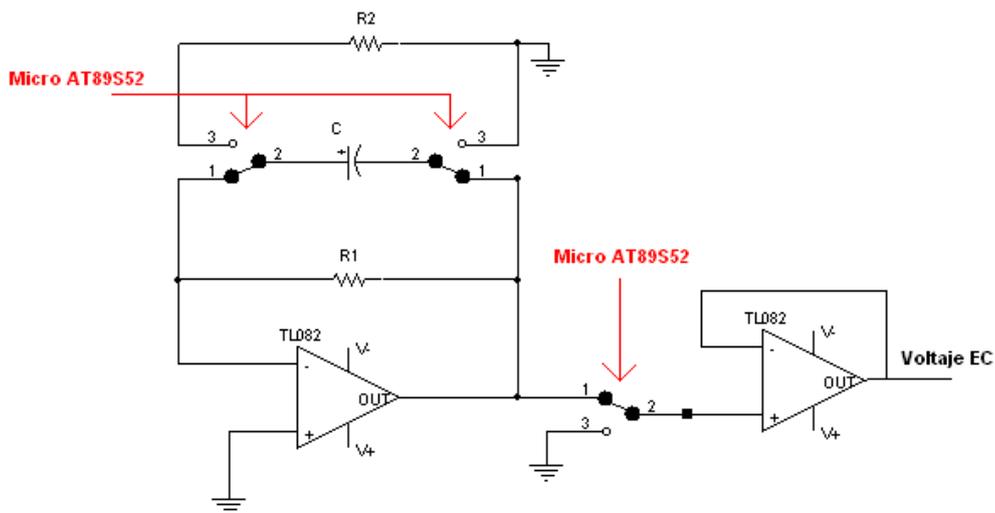


Figura 40. Salida Voltaje EC. Uso de réles.

Los réles utilizados pertenecen a la marca *OMRON*, concretamente cuyo modelo es el modelo G6A-234P, tiene alta sensibilidad en circuitos digitales, y conmuta de posición por medio de una tensión de 5V, ideal en nuestro circuito. Se han escogido estos dispositivos, ya que son de fácil conexión y manejo.

Para poder conmutar estos réles, usaremos los pines del micro para controlar en todo momento, el inicio del sistema. Pero existe un problema, los pines del micro no dan suficiente corriente para poder conmutar al réle.

Para solucionar este inconveniente, se utiliza un transistor, que permite hacer llegar al réle la corriente necesaria sin pasar por el micro.

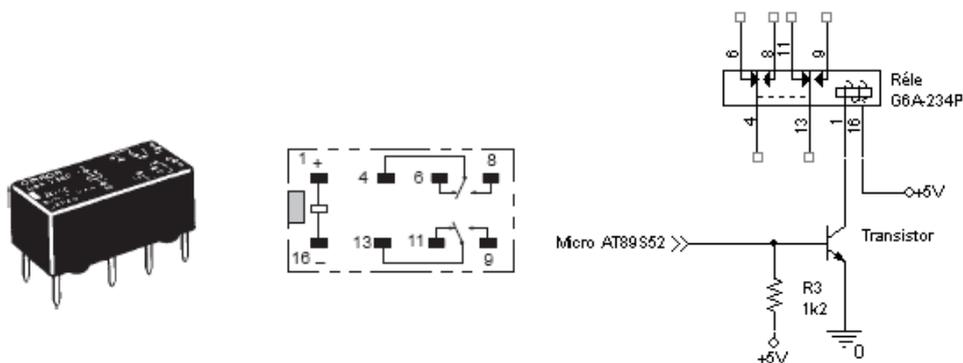


Figura 41. Activación de un réle de 5 Vdc.

El funcionamiento es el siguiente:

Cuando el pin de salida del micro está a 1, no hay corriente de base, por lo que el transistor está cortado y no circula corriente por el relé. Cuando se pone un 0 a la salida, existe una corriente de base que hace que el transistor se ponga en saturación, cayendo 0.2 V en la unión CE (Colector-Emisor) y el resto en el relé, activándolo.

Para calcular R3 hay que tener en cuenta que el transistor deberá estar en saturación. La corriente máxima que necesita el relé es de 80 mA, que será la corriente I_{colector} . Para que el transistor esté en saturación se debe cumplir que $I_C > \beta \cdot I_B$. La β se obtiene en las hojas de características del transistor y escogeremos la menor posible. β vale 130 y la corriente que necesita el relé es de 80 mA.

$$80 \text{ mA} > 130 I_B.$$

Por lo que la corriente mínima que debe salir del micro es de 0,6 mA. Para asegurarse que está saturado se coloca 3 mA. Ahora calcularemos R3. La tensión en la salida del micro es 0 V y la V_{BE} de 0.8 V.

$$5 = I \cdot R + V_{BE} \Rightarrow 5 = 3\text{mA} \cdot R + 0,8\text{V} \Rightarrow R = \frac{5 - 0.8}{3} = 1\text{K}4 \cong 1\text{K}2$$

Ahora es el micro, el que controla las conmutaciones de los réles, lo que es primordial para que el condensador esté totalmente descargado, al comienzo de la medida. Además el último réle controlará el paso de la tensión al EC, estando a masa durante el proceso de carga de valores del usuario, y habilitando la entrada de la señal triangular al EC cuando sea necesario.

Una vez explicado en detalle el hardware, perteneciente al bloque generador de la señal triangular, es necesario aclarar el proceso que lleva a la formación de la señal específica.



El micro genera la señal cuadrada de donde parte el generador de la triangular, pero la señal cuadrada debe conmutar. El micro recibe las órdenes de los instantes en que debe cambiar la señal gracias al AD7824, pues éste está convirtiendo la tensión aplicada al EC en datos que pueda leer el micro, concretamente el micro lee los datos en paralelo por medio del puerto 2.

Por lo tanto cuando el voltaje de la señal triangular, llega al valor determinado por el usuario, el micro conmuta la señal para modificar el sentido de la pendiente (subida-bajada).

4.2.1.6 MEDICIÓN DE CORRIENTE

En este bloque se explicará, la medida de la corriente procedente del EC. Dependiendo del estado de éste, se obtendrán medidas de corriente variables, pero dentro de unos valores. Se sabe de anteriores estudios realizados por los fabricantes de estos materiales, que la corriente tiene valores muy bajos para dispositivos tan pequeños como los que se suelen recibir en el GDAF, del orden de 1 cm^2 , en torno a las centenas de μA ó decenas de nA .

El objetivo de este bloque, es captar la corriente, transformarla y acondicionarla para que el micro pueda leerla. El procedimiento de lectura es similar al utilizado en el apartado de la lectura de la señal triangular.

La corriente del EC seguirá la forma de la tensión aplicada, así que tendremos que medir corrientes negativas y positivas. Para transformar la corriente usaremos el siguiente esquema eléctrico:

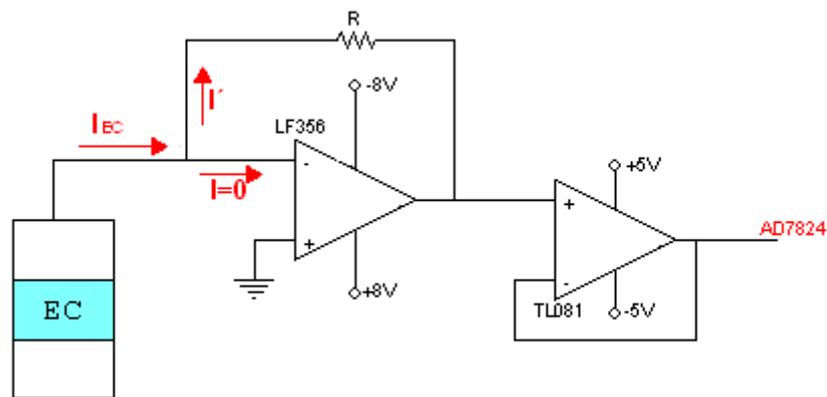


Figura 42. Circuito medidor de corriente.

Debemos fijar el valor máximo y mínimo, que alcanzaremos al medir la corriente: en el grupo GDAF se realizaron varios test iniciales de caracterización en materiales EC de 5x5 cm, obteniéndose un rango de variación de corriente entre los $-250\mu\text{A}$ hasta $+250\mu\text{A}$.

Partiendo de estos valores, por medio del circuito “corriente-tensión”, podemos calcular el valor de la resistencia R de la Figura 42, que será por la que pase toda la corriente del EC, debido a que en un A.O. cuando está realimentado negativamente, se produce el efecto de cortocircuito en sus entradas, originando una masa virtual en la entrada negativa. Así tenemos la siguiente expresión:

$$V = I \cdot R \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} V_{\text{máx}} = 3V \\ I_{\text{máx}} = 250\mu\text{A} \end{array} \right\} \Rightarrow R = \frac{V}{I} = \frac{3V}{250\mu\text{A}} \rightarrow R = 12k\Omega \approx R = 10k\Omega$$

Una vez que se ha transformado la corriente en tensión, por medio de un buffer (aísla las etapas), conectamos la salida de este circuito al convertidor A/D AD7824, para que convierta la tensión que cae en la resistencia R, y la transmita al micro, el cual por software calculará la corriente saliente del EC.

4.2.1.7 PLACA BASE Y ACABADO FINAL

Para realizar y mostrar todo el esquema eléctrico, se usa el software ORCAD 10.0. Para mostrar gráficamente el esquema eléctrico se utiliza una de las herramientas del ORCAD, concretamente el Pspice, con el que se obtiene el esquema que aparece en el (**ANEXO I-B**).

Pero también dentro del ORCAD se usa la aplicación Layout, con la que obtenemos el fotolito completo de la placa final con todas las pistas y componentes, el cual se puede observar en el (**ANEXO I-A**), y utilizarlo para la creación física de la placa.

Para concluir se muestra el producto final, tal como se presenta al usuario.



Figura 43. Carcasa cara frontal abierta.

En esta figura se puede observar el frontal de la caja con la parte superior abierta, cuya extracción superior es de fácil manejo evitando posible fallos de desconexión.



Figura 44. Carcasa cara trasera abierta.

En la figura 44 se muestra la cara trasera de la caja, dejando ver la conexión del botón reset, y de los terminales para los cables que se conectarán al EC.



Figura 45. Carcasa cara lateral abierta.

En la figura 45, se encuentra la vista lateral de la caja, donde se aprecia todas las conexiones internas del sistema.



Figura 46. Carcasa cara trasera.

En la figura 46, pertenece a la vista trasera del dispositivo, donde se aprecia el conector IEC para la alimentación de 220Vac. junto con su interruptor, y además el conector DB9 para la conexión serie con el PC.



Figura 47. Carcasa cara frontal.

En la figura 47, se muestra la cara delantera del aparato final, con los conectores de banana rojo y negro donde irán los cables para conectar el EC al sistema, y un botón reset.

Llegado a este punto se cumple uno de los objetivos expuesto a comienzo de este proyecto de crear un sistema portátil que mida la voltimetría cíclica para dispositivos EC.

4.2.2 DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE.

El software se desarrolla de forma paralela al hardware, ambos son muy importantes para que el sistema funcione de forma precisa y fiable.

El software es el conjunto de instrucciones que debe seguir el hardware con el fin de desempeñar el trabajo para el que fue diseñado.

Uno de los puntos primordiales para realizar un buen software, radica en el lenguaje de programación a utilizar.

Existen varios lenguajes de programación como pueden ser: *Ensamblador, C/++C, Pascal, Visual Basic, etc.* El lenguaje que se empleará para el desarrollo del software, es el lenguaje C, ya que éste es el que se ha utilizado durante la carrera y nos proporciona varias ventajas sobre los demás:

- **FORMACIÓN DEL PROGRAMADOR:** Lenguaje fácil de comprender, por ello, el tiempo de aprendizaje es relativamente corto con respecto a otros lenguajes.
- **LENGUAJE ESTRUCTURADO:** De esta forma se puede depurar mejor las instrucciones y hacer más comprensible el código a otras personas.
- **RAPIDEZ:** No es tan rápido como el lenguaje ensamblador (lenguaje máquina), pero un código bien hecho en C, puede ser más rápido que en ensamblador.
- **PORTABILIDAD:** Fácil de encontrar compiladores C para cualquier plataforma. Esta es una ventaja muy importante para cualquier sistema.
- **TUTORIAL:** Existe mucha información acerca de la programación en C, lo cual facilita el acceso a la documentación para utilizar correctamente los comandos en C.

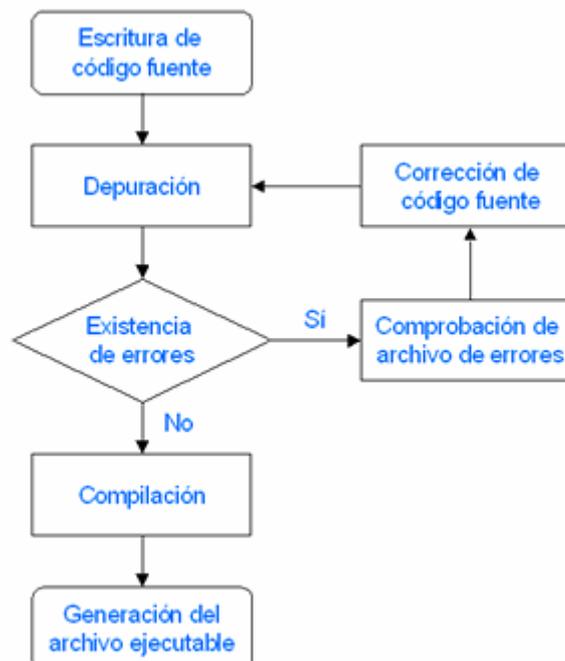
Una vez elegido el lenguaje de programación, utilizaremos el entorno de programación **KEIL PK51**, herramienta disponible en el laboratorio GDAF.

Este entorno dispone principalmente de 2 aplicaciones:

- **µVision-51:** Entorno orientado al desarrollo para microcontroladores pertenecientes a la familia 8051/MCS-51
- **dScope-51:** Simulador/Depurador para los microcontroladores de la familia 8051/MSC-51.

Dentro de la aplicación µVisión, existen varios programas. Todos son útiles para el desarrollo óptimo de un código de programación, para microcontroladores 8051. Entre ellos encontramos, un ensamblador, compilador, linkador y un convertidor a Hex (genera un fichero Intel).

Una vez que se redacta el programa deseado, es necesario la depuración del mismo; comprobación de errores o el cambio de algunas sentencias. A continuación se muestra el típico diagrama de flujo para obtener un archivo ejecutable y fiable.



Flujograma 1. Diagrama de flujo típico para un archivo ejecutable

Una vez depurado el código y convertido en un archivo ejecutable, es necesario traspasar dicho programa al microcontrolador.

Para ello, disponemos en el laboratorio del GDAF de un programador UNIVERSAL LAB TOOL-48, que permite la programación de varios microcontroladores de la marca ATMEL, así como de otros fabricantes.



Figura 48. Programador LAB TOOL-48.

Para poder programar los micros, la herramienta LabTool-48 se conecta por medio de un cable DB25 (comunicación paralela) a un ordenador.

El software del LabTool-48 es fácil de utilizar: se selecciona el micro a programar (AT89S52), elegimos el archivo .HEX creado en el μ Vision, y accionamos el icono de *PROGRAM*.

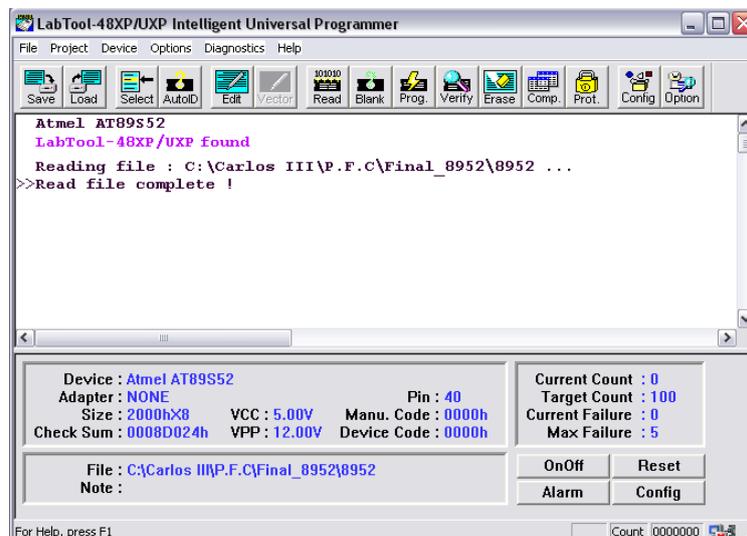
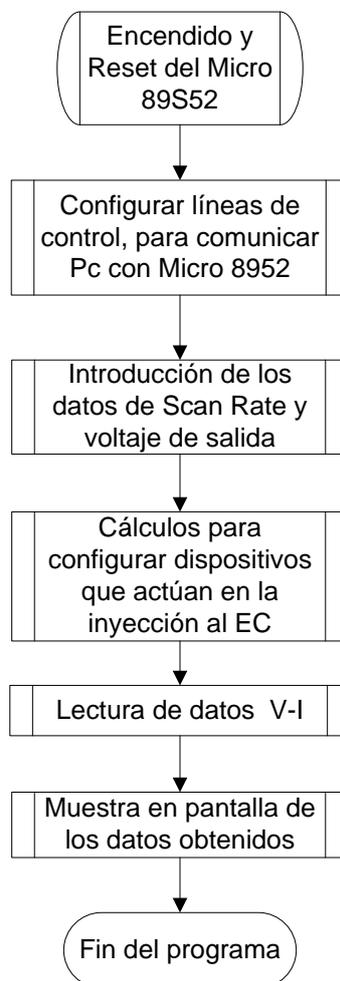


Figura 49. Interface LabTool-48.

El software debe controlar todas las funciones y alteraciones que se den en el hardware. Por ello, el código debe ser capaz de controlar y almacenar cualquier tipo de dato generado en el sistema.

Además debe cumplir con las premisas iniciales: generar una señal triangular, y ser capaz de obtener datos del comportamiento del EC (corriente de EC).

El siguiente flujograma muestra de forma general los pasos que realizará el código fuente del programa diseñado para este proyecto.

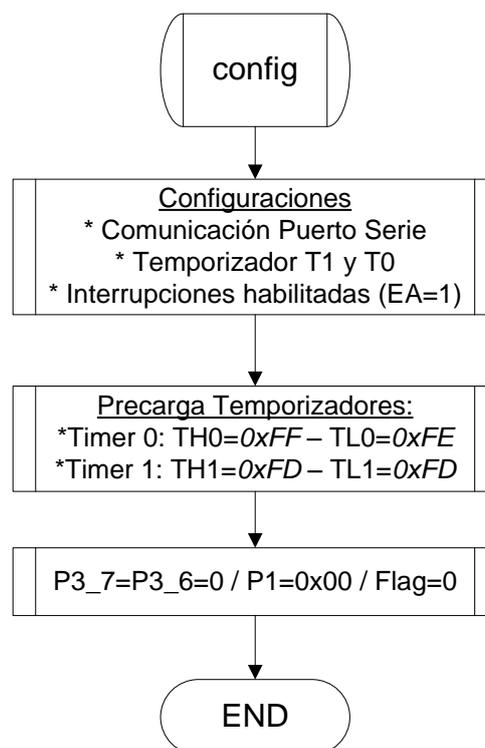


Flujograma 2. Flujo general del programa

A continuación se detallará en profundidad el diseño del software siguiendo el orden secuencial del programa.

Una vez que se inicia la ejecución del programa, dentro de la función *main* (función principal del programa), se realiza una llamada a la función *config*. Esta llamada se encarga de configurar las líneas de control y comunicaciones del micro con el PC, como se muestra en el flujograma 3.

- Llamada a la función “**config**”



Flujograma 3. Llamada función “config”.

En esta función, establece las premisas necesarias para que el micro establezca comunicación con el PC. La sincronización de ambos dispositivos es importante a la hora de introducir y mostrar los datos por la pantalla del PC.

Los comandos para configurar al micro serán en lenguaje ensamblador, debido a la rapidez de ejecución de estas instrucciones.

Se configura la salida de datos por el puerto serie, y la velocidad de sincronización con el PC (9600 baudios). Por medio de una sencilla fórmula, se puede cargar al Timer1 para sincronizar los dispositivos.

$$TH1 = 256 - \frac{K \times \text{Oscillator Frequency}}{384 \times \text{Baud Rate}}$$

Fórmula 1. Cálculo del Timer1 generador de baudios.

La frecuencia del cristal de cuarzo que tiene el micro es de 11.0592MHz, así pues, despejando de la fórmula, obtenemos que TH1= 253. Pasado a HEX, el dato quedará cargado con **0xFD**, y como sólo usamos 8 bits del timer1, se carga para TH1 y TL1 el mismo dato.

A continuación, se habilitan las interrupciones que se utilizarán durante la ejecución del programa. En este caso será la interrupción del Timer0 y la interrupción de recepción del puerto serie.

La siguiente configuración se centra en la carga del Timer0, que será fundamental en la sincronización de los datos del micro al potenciómetro digital.

La carga que vamos imponer al Timer0 será de 510µs según la hoja de característica (**Anexo I-G**).

Usamos el Timer0 en Modo1, es decir, el número de bits será 16.

$$\begin{aligned} f_{CLK} &= 11,0592 \text{ MHz} \\ T_{instrucción} &= \frac{12}{f_{CLK}} = \frac{12}{11,0592 \cdot 10^6} = 1,085 \mu\text{s} \\ T_{Desbordamiento} &= 2^{n^{bits}} * T_{instrucción} = 71,11 \text{ ms} \end{aligned}$$

Fórmula 2. Cálculo de precarga Timer 0

La precarga del Timer0 se calcula de siguiente forma:

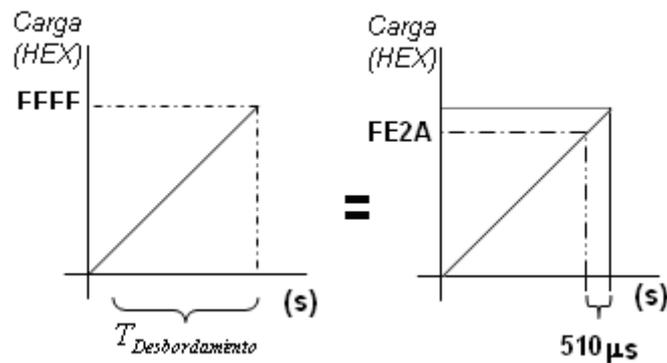


Figura 50. Gráficas cálculo precarga Timer 0.

$$\left. \begin{array}{l} \text{Tiempo} = 510 \mu\text{s} \\ T_{\text{instrucción}} = 1,085 \mu\text{s} \end{array} \right\} = \text{Incremento} = \frac{\text{Tiempo}}{T_{\text{instrucción}}} = \frac{510 \mu\text{s}}{1,085 \mu\text{s}} = 470.$$

$$\text{Pr ec arg a} = 2^{n^{\circ}\text{bits}} - \text{Incremento} = 2^{16} - 470 = 65066 \xrightarrow{\text{HEX}} \text{FE2A}$$

Partiendo de que $T_{\text{Desbordamiento}}$ dura 71,11ms en ir del 0000-FFFF (Hex), que cada incremento es de 1,085 μs , y que el tiempo a contar son 510 μs se puede calcular el punto de partida para que el timer cuente el tiempo requerido. Para ello se calcular cuantos incrementos se deben hacer para contar el tiempo pedido.

Una vez conseguido este dato, sólo queda restarlo al numero total de incrementos que tiene el timer antes de llegar al final, así se consigue el valor decimal de la precarga del timer que habrá de ser convertido en hexadecimal.

Por lo tanto, la precarga del Timer0 queda de la siguiente forma: **TH0=0xFE / TL0=0x2A.**

Finalmente se configura los pines del micro que inicialmente deben estar a 0 lógico (nivel bajo), y las variables o flags de ayuda.

Al salir de la llamada a la función config, se vuelve al programa principal "main".



Es aquí donde se encuentra una serie de bucles abiertos concatenados, que revelan varias aplicaciones que se realizan en el programa.

El primer bucle que aparece, consiste en permitir al usuario repetir o iniciar una nueva medida de datos, siempre y cuando el programa haya empezado a mostrar los datos de la medida anterior. Se utiliza en este caso la sentencia “for”.

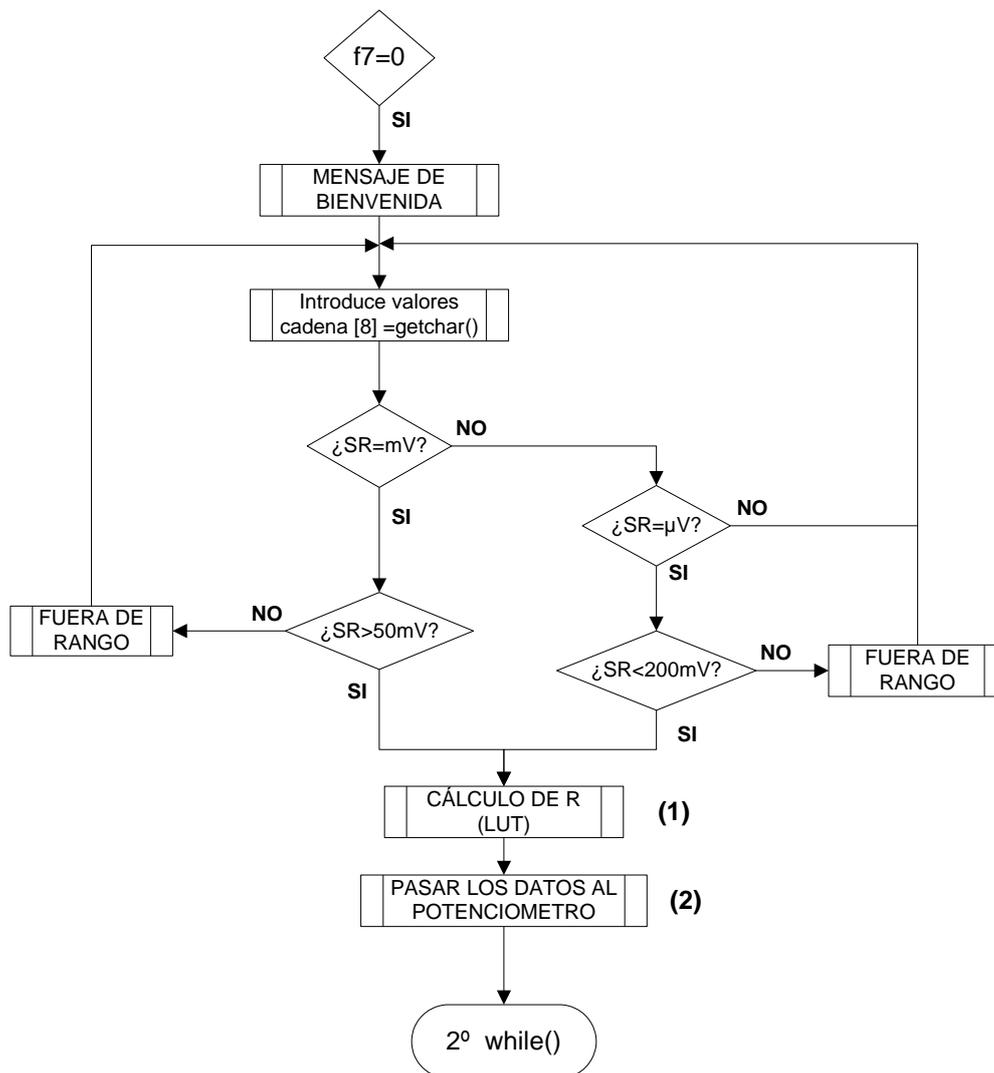
El siguiente bucle, emplea la sentencia “while”, que comprende dos partes importantes del programa: la introducción y almacenamiento de los datos que el usuario determine.

Para introducir los datos se utilizarán 2 sentencias while; una de ellas, será para los datos del Scan Rate, y la otra seleccionará la tensión de salida al Ec. Por último, quedaría el bucle final, que se encarga de ir pasando los datos obtenidos a las variables correspondientes para mostrarlos en pantalla.

- **Primer bucle *while()*.**

Para poder entrar en este bucle, se deberá cumplir la sentencia que se muestra dentro de los paréntesis. La sentencia de este primer while, se trata de un bit de ayuda o flag auxiliar (**f7**), que inicialmente está a 0.

A continuación se muestra un flujograma con todas las aplicaciones que se realizan dentro de esta sentencia.



Flujograma 4. Flujograma del 1º bucle while

Lo primero que se realiza al entrar en el bucle, son los comandos de presentación. Se muestra en pantalla el texto de bienvenida: nombre del programa, versión del software, nombre del programador, etc.

Se utiliza el comando **puts()**, que es muy práctico cuando sólo se quiere imprimir texto en pantalla. Para poder utilizar esta función, necesitamos la librería de funciones **#include<stdio.h>** al principio del programa.

Después de la presentación, introducimos los datos del SR. Para ello, se utiliza una cadena de caracteres **char cadena[]**, donde se irá colocando el valor numérico que el usuario determine, en forma de carácter.

Al introducir el SR, el usuario debe determinar si el valor es en: μV ó mV . Es aquí donde es importante que el valor introducido, quede en forma de carácter. Se puede leer el último carácter de la cadena, y saber si el dato pertenece a valores de μV ó mV .

Es necesario diferenciar el dato, ya que para cada caso, se realizan unos cálculos que llevan a la configuración correcta para continuar el proceso.

El dato introducido es un carácter, pero lo necesitamos en forma numérica, para poder realizar las operaciones correspondientes.

Una forma sencilla de convertir una cadena de caracteres a un número entero, es usando el comando **atoi()**, que pertenece a la librería **<stdlib.h>**.

Una vez que se tiene el dato del SR de forma entera, realizamos los cálculos respectivos para obtener el valor correcto del potenciómetro digital, para que el circuito integrador funcione correctamente.

Las operaciones matemáticas que se ejecutan, cambian dependiendo del valor del SR, por ejemplo:

- Dato en μV :
* Instrucciones en C:

```
scan_rate=scan_rate/10;  
R=((2*10000)/scan_rate);
```

$$SR = 400\mu\text{V}$$
$$R = \frac{V_i}{SR \cdot C} = \frac{2}{400 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 10^{-3}} =$$
$$R = \frac{2}{4 \cdot 10^{-6}} \cdot \left(\frac{10^6}{10^6} \right) \approx \frac{2 \cdot 10^6}{4} = 500 \cdot 10^3 \Omega = 500\text{k}\Omega$$

- Dato en mV :
* Instrucciones en C:

```
R=((2*100)/scan_rate);
```

$$SR = 20\text{mV}$$
$$R = \frac{V_i}{SR \cdot C} = \frac{2}{20 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 10^{-3}} =$$
$$R = \frac{2}{2 \cdot 10^{-4}} \cdot \left(\frac{10^4}{10^4} \right) = \frac{2 \cdot 10^4}{2} = 10 \cdot 10^3 \Omega = 10\text{k}\Omega$$

El siguiente paso, consiste en pasar el valor obtenido de la resistencia al potenciómetro digital.

Este paso es bastante importante, ya que si no se consigue enviar bien los datos al potenciómetro, la señal triangular no será la esperada y los demás datos serán erróneos.

- **Conversión del valor de R (1)**

Para poder enviar el valor de la resistencia calculada al potenciómetro, deberá estar en forma binaria. Para obtener esta conversión, se aplicará el uso de una LUT (*Look Up Table*), donde nos convertirá el dato en un valor decimal, que corresponde al número en binario.

Se sabe que la resolución del potenciómetro digital, es de: 3,906kΩ.

Creamos la tabla de la siguiente forma:

Valor de posición (n)	Valor del potenciómetro	Valor binario	Posición del potenciómetro
256	1MΩ	1111-1111	1000
255	996 kΩ	1111-1110	996
⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮
1	3,906kΩ	0000-0001	5,906
0	0	0000-0000	3,906

Cálculos:

Para pasar de una posición a otra: $\frac{1000 - 3,906}{255} = 3,9 \text{ k}\Omega$

$$n = 0 \Rightarrow 2$$

$$n = 1 \Rightarrow 2 + \left(\frac{1000 - 3,906}{255} \right) \cdot n = 5,9k\Omega$$

$$n = 2 \Rightarrow 2 + \left(\frac{1000 - 3,906}{255} \right) \cdot n = 9,8k\Omega$$

Ahora se guarda el valor de “n”, en una variable para más adelante, convertirla en binario. Para finalizar la explicación de LUT, se expone un ejemplo, para su mejor comprensión:

$$\left. \begin{array}{l} SR = 20mV \\ R = 10k\Omega \end{array} \right\} \Rightarrow R > \left(2 + \left(\frac{1000 - 3,906}{255} \right) \cdot n \right) \Rightarrow \mathbf{1} = 2 \xrightarrow{-} \underline{10k\Omega} > \underline{9.8k\Omega}$$

En esta operación el valor del SR se coloca para mostrar que el valor de R en un SR de $20 \frac{mV}{s}$ es muy próximo al calculado con la LUT.

Para realizar la operación de LUT, se utiliza un bucle while, donde se irá barriendo toda la tabla hasta llegar al punto donde no cumpla la sentencia del bucle, y por lo tanto, obtener el número decimal que corresponde con el valor que se debe pasar al potenciómetro digital.

```
while( R > (2 + (3,906 * j)))  
{  
    j++;  
}
```

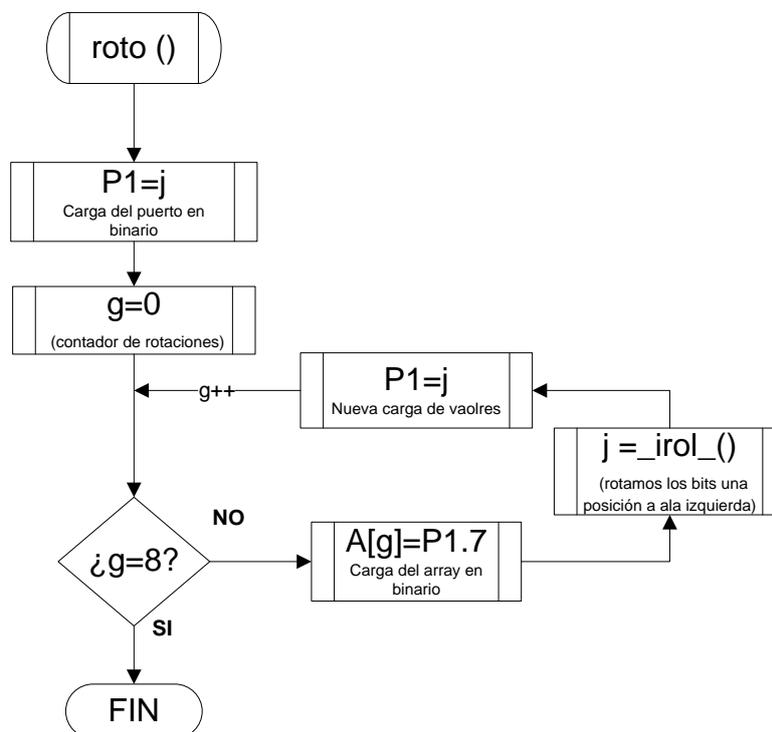
- **Tratamiento de datos y escritura del potenciómetro (2)**

En este punto del software, se explica el modo de transformar el dato obtenido en decimal a binario, así como la forma de introducir dicho valor en el potenciómetro para que quede grabado. Se utilizan varias llamadas a funciones, así es más fácil seguir el programa y comprenderlo.

Las llamadas que se realizan son:

- roto (función para rotar bits).
- graba_poten (función escritura del AD5241).

Llamada a la función roto()



Flujograma 5. Flujograma función roto ().

El flujograma 5 muestra la función que convertirá el valor del potenciómetro a un dato binario. La forma de ir pasando los bits en binario al AD5241, se realiza por el pin P1.7 del micro.

El valor en decimal del potenciómetro se copia directamente al puerto 1, (P1=n), así queda cargado el puerto1 con el valor en binario.

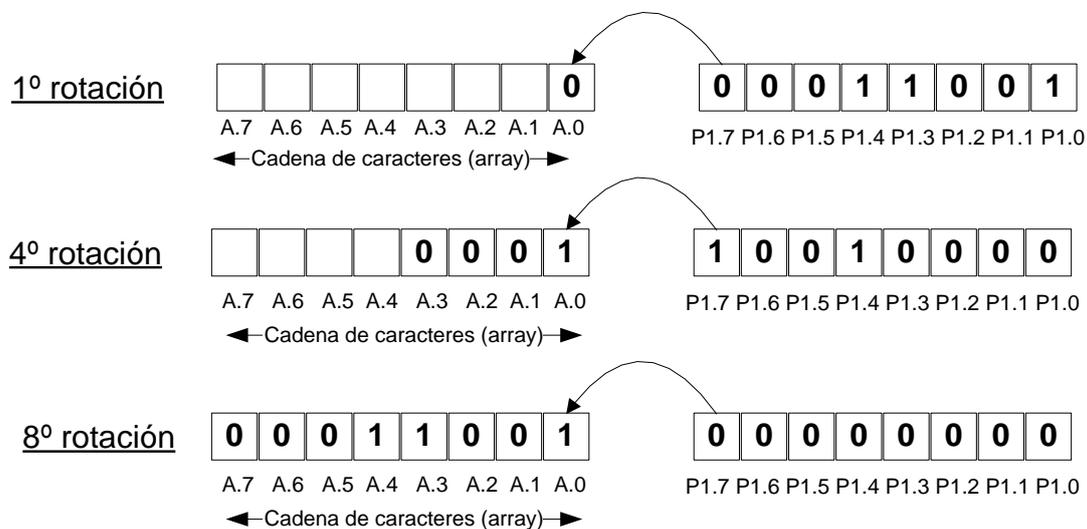
Por ejemplo:

Cuando n=25, que corresponde con el valor R=99,5kΩ. Al ejecutar la instrucción (P1=n), queda de la siguiente forma:

n=25	P1.7	P1.6	P1.5	P1.4	P1.3	P1.2	P1.1	P1.0
	0	0	0	1	1	0	0	1

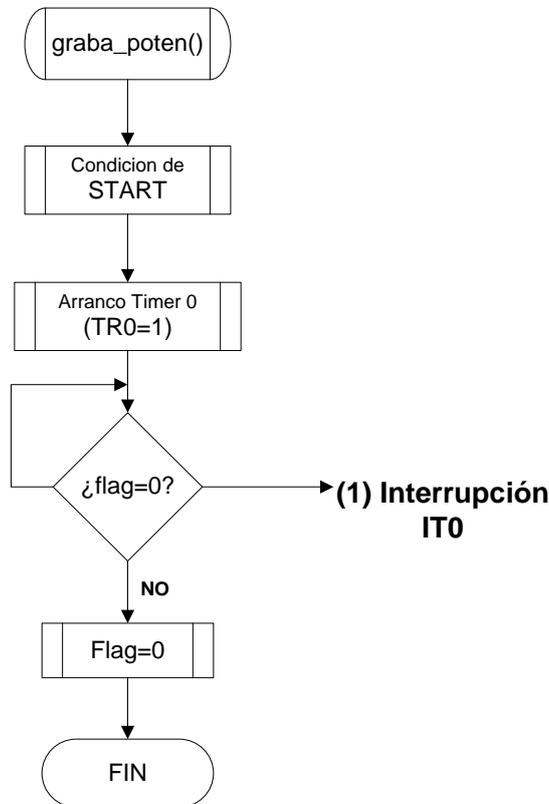
Usando una cadena de caracteres, se guardan los valores de cada bit, empezando por el bit más significativo, que en este caso es el P1.7

Por medio de la instrucción “*_irol_(q,1)*”, se irá rotando los bits que se encuentra en el P1 hacia al izquierda y una sola posición.



Para saber que hemos rotado y cargado todo los valores, se genera un bucle donde se pregunta si se han realizado las 8 rotaciones. Cuando se haya terminado las rotaciones, se tendrá el array de 8 caracteres cargado con los bits que componen el valor del potenciómetro.

Llamada a la función graba_poten()



Flujograma 6. Función graba_poten().

En esta función grabaremos los datos que se han almacenado en el array al potenciómetro digital (flujograma6). Dentro de esta llamada se va a realizar una interrupción del temporizador T0.

La forma de pasar los datos de una forma correcta, para grabar el potenciómetro digital, se muestra en la siguiente figura:

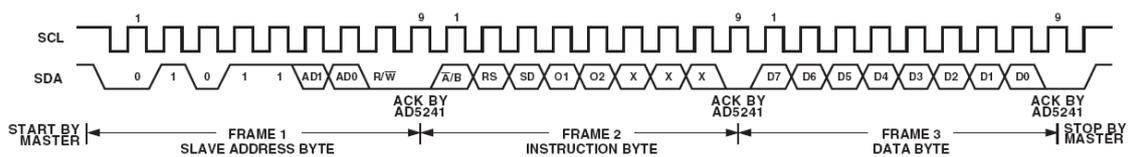


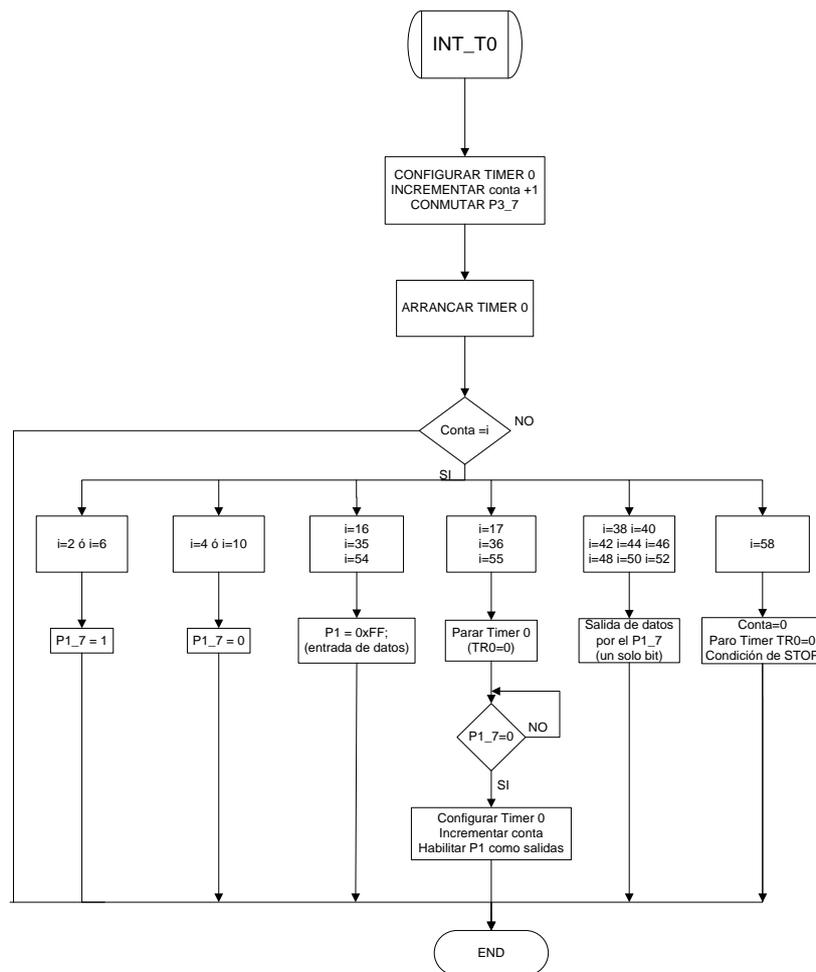
Figura 51. Diagrama escritura AD5241.

Por medio del bus de comunicaciones serie I²C, transmitimos los datos y el reloj, del micro al potenciómetro. Siendo el P1_7 el correspondiente a los datos y el P3_7 al reloj. Aplicando la condición de START, el potenciómetro digital entra en modo de escritura, y arrancamos el Timer 0, para que cuando se desborde entremos en la interrupción.

Para esperar que salte la interrupción, entramos en un bucle infinito, cuya condición es *flag=0*. Para salir del bucle infinito la variable *flag*, deberá ser 1.

Una vez que *flag* llega a ser 1, salimos del bucle y volvemos a poner el *flag* a 0 para la próxima carga de datos al potenciómetro, llegando al terminador de la función y lanzándonos al programa principal, donde finaliza el bucle 1^o while.

Interrupción Timer 0:



Flujograma 7. Flujograma de la interrupción IT0.

Cuando se entra en la interrupción IT0, se comienza a enviar los datos para escribir el potenciómetro digital con el valor requerido, tal y como se muestra en el flujograma 7.

Cada vez que se entra de nuevo en la interrupción, lo primero que se hace es cambiar el bit de desbordamiento, conmutamos el pin P3_7 que pertenece a la señal de reloj del potenciómetro, e incrementamos el contador.

Se utilizará el timer 0, para sincronizar los datos con el reloj. Se usará un contador para saber la posición de la entrada de datos en que nos encontramos.

Con esta forma de realizar la escritura, resulta bastante sencilla la carga de datos hacia el potenciómetro, sólo es necesario seguir el diagrama de escritura.

Para profundizar con mayor detalle, en la explicación de cómo se ha planteado el sistema contador, se muestra en la siguiente figura;

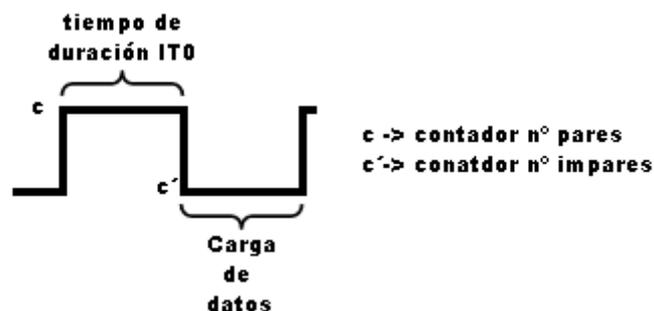


Figura 52. Sistema contador.

El potenciómetro lee los datos cuando el reloj está a nivel alto, por lo que iremos variando el valor de la señal de datos en el nivel bajo, es decir, cuando el contador esté en los números impares. Cada semiciclo es la duración de la interrupción.



Para saber qué hacer cuando el contador llega a un punto concreto de cambio, utilizaremos bucles “if” encadenados, siendo la condición para entrar en los bucles es el valor del contador. Así de esta forma vamos cumpliendo el diagrama de escritura del potenciómetro.

Ahora una vez configurado el potenciómetro, sólo queda pasar los datos almacenados en el array del valor que deberá tener el potenciómetro.

Para ello utilizamos un bucle “switch”, y dependiendo en qué valor del contador estemos, copiamos en el pin P1_7 el valor que corresponda de la posición del array.

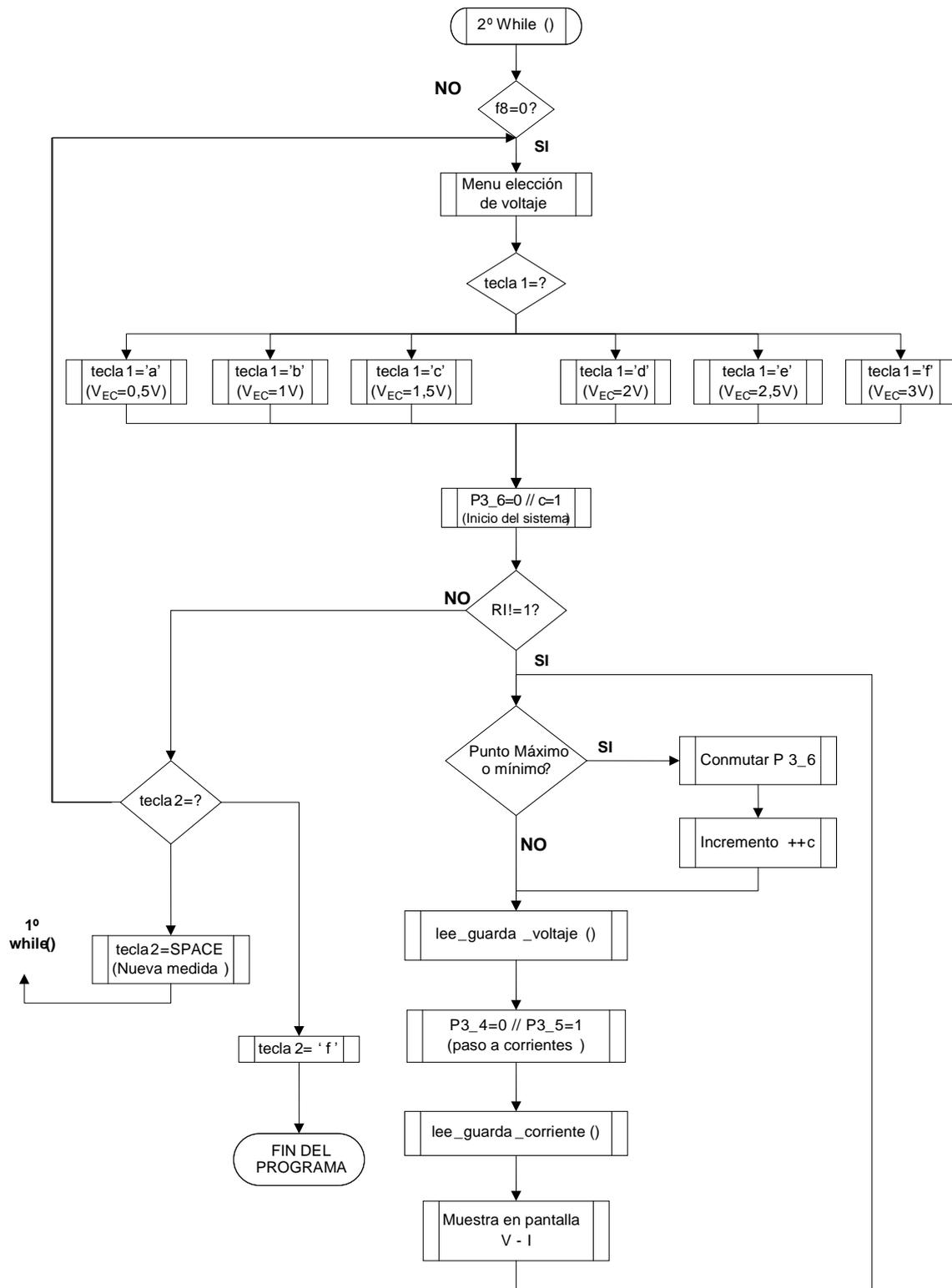
Por último, queda enviar el comando de STOP al potenciómetro para acabar el proceso de escritura, e inicializar el contador para la próxima escritura. Además ponemos el flag a 1, para salir del bucle infinito y continuar en el programa principal.

Una vez que se sale de la función *graba_poten*, se cambia el bit F7 a 0, para salir del primer bucle while y por lo tanto entrar en el segundo bucle while.

- **Segundo bucle *while*()**

En este segundo bucle, se va a tratar, la lectura y escritura tanto del voltaje como de la corriente que atraviesa al EC, tal y como se muestra en el flujograma 8.

El programa está diseñado para elegir entre los valores de voltaje: 0,5 / 1 / 1,5 / 2 / 2,5 / 3V, que se aplicarán al EC.



Flujograma 8. Flujograma del 2º bucle while()

Lo primero que aparece al entrar en este bucle son mensajes por pantalla, que informan al usuario de la elección del voltaje que desea aplicar al EC., por medio de un Menú, donde están relacionados los voltajes con letras del abecedario (figura 53).

```
-->INTRODUZCA EL SCAN RATE DENTRO DEL INTERVALO [500uV/s-66mV/s]
33mV

Introduzca el valor de salida del voltaje
----pulse 'a' para 0,5V
----pulse 'b' para 1V
----pulse 'c' para 1,5V
----pulse 'd' para 2V
----pulse 'e' para 2,5V
----pulse 'f' para 3V
```

Figura 53. Menú elección del voltaje.

Una vez que se ha seleccionado el valor requerido, vuelven a aparecer por pantalla todos los datos introducidos por el usuario, con el fin de confirmar que los datos sean correctos, como se muestra en la figura 54.

```
-->INTRODUZCA EL SCAN RATE DENTRO DEL INTERVALO [500uV/s-66mV/s]
33mV

Introduzca el valor de salida del voltaje
----pulse 'a' para 0,5V
----pulse 'b' para 1V
----pulse 'c' para 1,5V
----pulse 'd' para 2V
----pulse 'e' para 2,5V
----pulse 'f' para 3V

e

Los Datos introducidos son:
    Scan_Rate      ====> 33mV/s
    Tension de salida ====>  2.5V
    Seguro que quiere aplicar estos datos: si (s) o No (n)?
recuerde para una nueva medida pulse SPACE
```

Figura 54. Menú confirmación de datos.

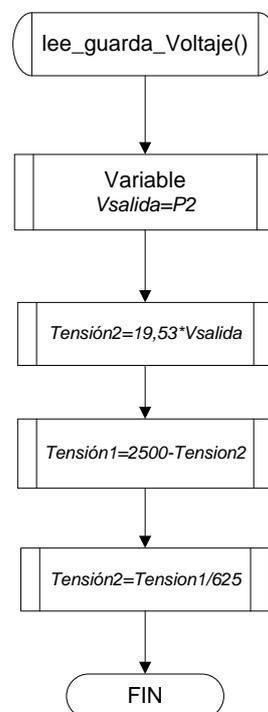
Ya se tienen todos los datos para comenzar a tomar medidas e iniciar el sistema. Cuando pulsamos la tecla 's' se activan los réles por medio de los pines P0_0 y P0_1, y conmutamos de valor el pin P3_6 que será la señal primordial para luego ser integrada.

A continuación nos encontramos con un bucle while donde la condición para entrar es por medio del puerto serie, mientras no se reciba dato alguno del puerto serie no salimos del bucle. Con esto se quiere hacer que hasta que no se pulsa alguna tecla del teclado no saldremos del bucle y se mantendrá la recolección de medidas.

Por medio de los pines P3_4 y P3_5 controlamos al ADC para cambiar del modo leer_voltaje al modo leer_corriente.

Así empezamos leyendo los valores de voltaje aplicados al EC, para ello iremos a la llamada *leer_guarda_voltaje()*, que se muestra en el flujograma 9.

Llamada a la función leer_guarda_voltaje().



Flujograma 9. Flujograma función leer_guarda_voltaje()



En esta función se realizan tanto la lectura del voltaje aplicado como el almacenamiento de dicha lectura. La forma de leer los datos de voltaje, es por el Puerto 2 del micro, ya que el ADC envía 8 bits en paralelo.

Tendremos que realizar cálculos matemáticos, ya que se ha acondicionado la señal del voltaje para que el ADC pueda leerla.

Para iniciar los cálculos, copiamos lo que lee el micro del puerto 2 a una variable entera. Una vez que tenemos el dato, operamos con el fin de obtener el valor que se está aplicando al EC en ese preciso momento.

Las operaciones que debemos realizar son para deshacer el acondicionamiento de la señal triangular a la entrada del ADC, dichas operaciones son las siguientes;

$$\begin{aligned} V_{\text{valida}} &= P2; \\ Tension_2 &= 19.53 * V_{\text{valida}}; \\ Tension_1 &= 2500 - Tension_2; \\ Tension_2 &= Tension_1 / 625.0; \end{aligned}$$

Como las operaciones de multiplicación y división con números de coma flotante, desbordan la memoria del microprocesador, se tratan los datos para trabajar con unidades enteras. Las operaciones realizadas implican despejar la tensión de la fórmula del apartado 3.2.2.1 de este documento.

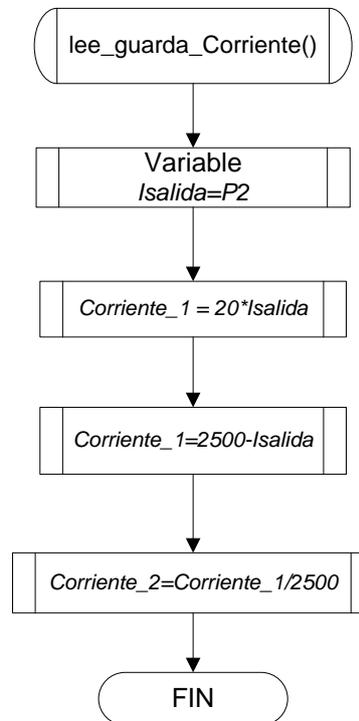
El dato correcto que mide el voltaje, se guarda en la variable *Tensión_2*, hasta que lo mostremos en pantalla, y cuando aparece en pantalla, se vuelve a obtener otra nueva medida de voltaje.

Cuando salimos de esta función, se deberá recoger el dato correspondiente a la corriente saliente del EC, para eso el micro actúa sobre el ADC, y cambia la entrada del convertidor.

Los pines que operan para el cambio de entrada en el ADC son el P3_4 y el P3_5, cambiando la entrada de la señal a convertir de AIN1 a AIN2.

A continuación, entramos en la función *leer_guarda_corriente()*.

Llamada a la función leer_guarda_corriente()



Flujograma 10. Flujograma función leer_guarda_corriente().

En la función que aparece en el flujograma 10, se realiza los mismos pasos que para leer y guardar los datos del voltaje.

Volvemos a leer del Puerto 2 los 8 bits de datos y lo copiamos a una variable que en este caso se llamará *Isalida*. Una vez que tenemos el valor entero, realizamos operaciones matemáticas para deshacer el acondicionamiento de la señal que ha sufrido antes de comenzar la conversión.

Las operaciones que realiza el micro para obtener el valor de la corriente son:

```
Isalida=P2;  
Corriente_2=19.53*Isalida;  
Corriente_1=(2500-Corriente_2);  
Corriente_2=(Corriente_1/2500.0);  
Corriente_2=(Corriente_2*10000)/68.0;
```



Estas operaciones han sido tratadas igual que en el caso de la tensión, para trabajar con valores enteros, y se persigue despejar el valor de la tensión a la entrada del ADC, como viene descrita en el apartado 3.2.2.2 de este documento, además la última operación es la que nos ofrece el valor de la corriente, que se ha despejado de la ley de Ohm.

El valor correcto de la corriente es almacenado en la variable *Corriente_2*, y salimos de la función.

Cuando hemos pasado por las dos funciones de leer y guardar los datos de tensión y la corriente. Se muestra por pantalla, los valores almacenados en las variables *Tensión_2* y *Corriente_2*.

Acto seguido se vuelve a empezar el bucle que lee y guardar datos, hasta que el usuario crea oportuno el fin de las medidas.

En este punto, el usuario sólo deberá pulsar cualquier botón del teclado para salir de este bucle, y por tanto salir del segundo bucle `while()`.

Antes de comenzar las medidas, se informaba al usuario que para terminar las medidas, existirán 2 formas de finalizar;

- “Pulsar SPACE para una nueva medida”
- “Pulsar ‘f’ para finalizar el programa”.

```
-->INTRODUZCA EL SCAN RATE DENTRO DEL INTERVALO [500uV/s-66mV/s]
50m
Introduzca el valor de salida del voltaje
----pulse 'a' para 0,5V
----pulse 'b' para 1V
----pulse 'c' para 1,5V
----pulse 'd' para 2V
----pulse 'e' para 2,5V
----pulse 'f' para 3V

e
Los Datos introducidos son:
    Scan_Rate      =====> 50mV/s
Tension de salida =====>  2.5V
Seguro que quiere aplicar estos datos: Si (s) o No (n)?
recuerde: * para una nueva medida pulse SPACE
          * para finalizar pulse 'f'
```

Figura 55. Menú nueva medida - fin del programa.

Para salvaguarda del programa, cuando el usuario pulse una tecla para salir del modo leer/guardar, mostrar los datos, volverá a aparecer el menú recordando al usuario las 2 opciones, como son realizar una nueva medida o finalizar el programa (figura 55).

Si el usuario presiona la tecla SPACE, el programa volverá a empezar y pedirá al usuario nuevamente que introduzca los valores que desea realizar.

Por último, si el usuario presiona la tecla 'f', el programa finaliza y no ejecuta ninguna acción, hasta que reciba un reseteo manual directamente sobre el micro.

Para recoger más detalles acerca del software, acudan al **Anexo I-H** donde se encuentra el código completo del programa.

5. RESULTADOS.

En este apartado se muestra los datos obtenidos al realizar las medidas a un electrocromico.

5.1 DESCRIPCIÓN DE UNA CALIBRACIÓN SOBRE UN MATERIAL.

Como ya se demostró anteriormente, el circuito es capaz de medir con valores aceptables tanto del voltaje aplicado al EC, como de la corriente que emana de éste.

El EC utilizado para la realización de las medidas finales, se trata de un dispositivo de prueba, cuyas dimensiones son 40x50 mm, posee un color amarillento y cuando el material se excita, se colorea a una tonalidad rosada. El EC presenta en su estado de reposo una opacidad, con lo que se debe considerar que no se partirá de una transparencia total. Este tipo de EC está fabricado con un material polimérico llamado PEDOT.



En primer lugar se debe conectar el dispositivo EC a las pinzas que estarán debidamente conectadas al sistema, y éste a un ordenador junto con su alimentación de red eléctrica.

Se comienza siempre estando el dispositivo EC en un estado de reposo, una vez que se tenga todo conectado, se puede comenzar el proceso de recogida de datos iniciando el sistema.

Lamentablemente no es posible realizar alguna medida, sin que esté exenta de errores. Existen varios tipos de errores, los más frecuentes son: sistemáticos, de precisión y accidentales.

El error de precisión es el debido a la resolución del aparato de medida, mientras que los errores sistemáticos suelen ser por un mal funcionamiento del aparato de medida. Su efecto suele ser incrementar o disminuir en una determinada cantidad el valor a medir. Por otra parte, los errores accidentales son fruto de causas incontrolables que desplazan de forma aleatoria el valor medido por encima o por debajo de su valor real.

Todos estos tipos de errores son evidentes cuando esperamos unos resultados lógicos y se conoce el tanto alcance del aparato de medida como de los conectantes a medir.

En este proyecto se esperan obtener unos valores acordes, a estudios previos que demuestran el comportamiento de los materiales electrocrómicos [Verg06].

5.2 RESULTADOS MEDIDOS.

A continuación se muestran los resultados medidos, tanto del prototipo como de la placa final.

Las medidas que se obtienen del prototipo conectado en una placa board, son de gran ayuda porque dejan ver si el circuito creado funciona correctamente, y la lectura de datos es la esperada.

Para no cometer errores de funcionamiento, se ha ido probando el prototipo en varias fases. Una de ellas es comprobar que es capaz de generar una señal triangular que excite al EC y que muestre los resultados que se les está aplicando de forma correcta.

Para demostrar el funcionamiento, se pinchó la sonda de un osciloscopio, en el electrodo de trabajo del electrocrómico, al igual que un polímetro en la misma posición.

Se comenzó a obtener datos, empezando por los puntos límites:

Valor límite requerido	Valor medido en el polímetro	Valor medido por el prototipo (PC)
+0,5V	+490 mV	+520 mV
-0,5V	-570 mV	-530 mV
+1V	+1,008 V	+1,00 V
-1V	-1,001 V	-1,02 V
+1,5V	+1,503 V	+1,48 V
-1,5V	-1,502 V	-1,48 V
+2v	+1,998 V	+1,98 V
-2V	-2,032 V	-2,04 V
+2,5V	+2,479 V	+2,43 V
-2,5V	-2,483V	-2,48V
+3V	+3,045V	+3,07V
-3V	-2,981 V	-2,96 V

Se observa que las medidas son bastante buenas, y que mantiene los valores suficientemente simétricos para darlos como aceptables.

Si durante la elección de la velocidad de barrido (scan-rate), se coloca una velocidad muy baja, se puede observar que el EC comienza a colorearse de una forma más intensa a la vez que aumenta el voltaje aplicado.

La siguiente fase del prototipo, es poder captar la corriente saliente del EC y mostrarla en la pantalla del PC.

Estas medidas que se exponen fueron realizadas sin conectar la placa board al Pc, con el fin de comprobar si el circuito es capaz de medir valores de corriente muy bajos.

Corriente Teórica	Voltaje salida V-I	Voltaje salida ADC	Corriente Medida (μA)
150 μA	0,9128 V	4,782 V	134,235 μA
90 μA	0,57748 V	3,9437 V	84,923 μA
50 μA	0,30548 V	3,2637 V	44,924 μA
25 μA	0,13548 V	2,8387 V	19,923 μA
10 μA	0,05716 V	2,6429 V	8,4058 μA
5 μA	0,03348 V	2,5837 V	4,923 μA
1 μA	0,00592 V	2,5148 V	0,870 μA
-1 μA	-0,00724 V	2,4819 V	-1,064 μA
-10 μA	-0,07452 V	2,3137 V	-10,958 μA
-25 μA	-0,16336 V	2,0916 V	-24,023 μA
-50 μA	-0,36248 V	1,5938 V	-53,305 μA
-90 μA	-0,5644 V	1,089 V	-83 μA
-150 μA	-0,9472 V	0,132 V	-139,294 μA

Simulando la entrada de una corriente específica, se observa que los valores obtenidos en la lectura son bastante buenos, y que el circuito es capaz de medir adecuadamente la corriente.

Una vez terminada la construcción externa, donde va a ir alojada la placa. Nos disponemos a realizar las medidas que servirán para dibujar las gráficas de Voltametría Cíclica del material electrocrómico.

Tomaremos 2 medidas, modificando el scan rate y el voltaje aplicado al EC. Se ha escogido valores de scan rate altos para así poder obtener las medidas rápidamente, en el caso de colocar scan rate bajos, el sistema se vuelve muy lento.

Las medidas que se han realizado son:

**Scan Rate $\geq 50\text{mV/s}$
Voltaje $\geq 0,5\text{V}$**

**Scan Rate $\geq 10\text{mV/s}$
Voltaje $\geq 1,5$**

El número de datos obtenidos de ambas medidas son muy grandes, debido a que el sistema muestra los valores cuando cambia tanto la corriente como el voltaje, tal y como se muestra en los ANEXO I-I e I-J. Llevando estas medidas a unos gráficos, vemos lo siguiente:

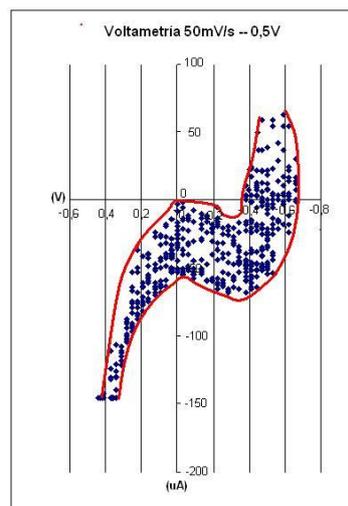


Figura 56. Voltamograma SR=50mV/s -- V=0,5V.

En la Figura 56 se representa el voltamograma con un SR=50mV/s y voltaje aplicado de 0,5V. Se aprecia claramente al principio de las medidas, que existe un salto de 0V al -0.34V. Esta prueba se mantuvo hasta alcanzar $\frac{3}{4}$ de un periodo. El gráfico se aproxima a la forma de un voltamograma cíclico. Hay que tener en cuenta que esta prueba es la más rápida que podemos realizar y el electrocrómico, es posible que no demuestre todas las características. Además es aconsejable mantener conectado el electrocrómico un mínimo de 3 periodos para estabilizarlo.

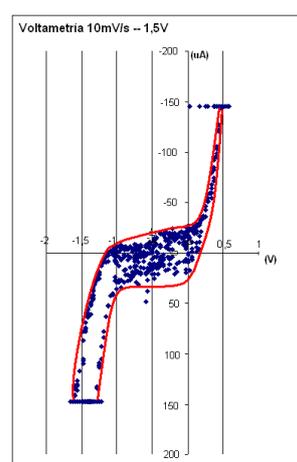


Figura 57. Voltamograma SR=10mV/s – V=1,5V.



El resultado de las medidas para un $SR=10\text{mV/s}$ y $V=1,5\text{V}$, se representa en la figura 57, donde se observa varias situaciones inesperadas.

La primera, de ellas es que se vuelve a apreciar otro salto brusco al comienzo de los datos, el cual hace revisar circuito de lectura y generación de la señal, realizando varias pruebas con diferentes componentes pasivos, dando resultados correctos, por lo que se concluye que es un efecto del EC.

En un segundo término se comprueba que a partir de un voltaje de -1.38V , la corriente llega a unos valores fuera de lo previsto, y al retornar la señal recuperamos los datos pero siguen siendo muy inesperados.

La tercera situación es observar que el sistema no es capaz de llegar al voltaje requerido quedando en un valor de $0,5\text{V}$, pero debido al estado del EC se puede llegar a afirmar que el EC no permita mayor voltaje.

Todas estas situaciones dan muchos datos nuevos e inesperados, pero no por ello se piensa que son datos erróneos. El porqué de estas medidas, pueden ser debidas varios aspectos desconocidos al realizar las pruebas:

- El electrocrómico utilizado se encontraba en el punto final de su vida útil.
- Debido al mal estado del electrocrómico, puede aportar alguna componente continua desestabilizando el sistema. (*estado de memoria*)
- Algunas características desconocidas de los materiales electrocrómicos, ya que estos dispositivos son nuevos y dependiendo de la composición química pueden originar comportamientos inesperados.



6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.

6.1 CONCLUSIONES.

En conclusión, podemos afirmar que existen algunas características desconocidas de estos materiales electrocrómicos que influyen en su comportamiento.

El sistema funciona correctamente, para valores muy bajos de barrido y para valores máximos de $\pm 2,5V$.

El siguiente punto a seguir en el estudio de estos materiales es comprobar y analizar el comportamiento de estos datos, para conocer y saber en detalle el comportamiento del electrocrómico.

El sistema de voltametría cíclica creado para medir EC, funciona correctamente, ofreciendo al usuario un medidor fácil de transportar, robusto y ampliable. Se cumple así con todos los requisitos impuestos en la realización de este proyecto.

Los datos que se obtienen quedan guardados en un archivo tipo texto, que es fácil de transportar o enviar a otro ordenador, con ello se tiene una mejor posibilidad de trabajar en equipo e incluso a distancia.

A continuación cedo el turno a compañeros interesados en seguir la línea de investigación, con el fin de investigar y comercializar estos materiales electrocrómicos, facilitando la vida cotidiana.

6.2 LÍNEAS ABIERTAS.

Este proyecto abre una línea directa al uso de los materiales EC, pero quedan puertas por abrir.

A continuación citaremos algunas de las posibles líneas que se deberá seguir para la continuación de este proyecto:

- Cambio del microcontrolador por FPGA's, para conseguir más rapidez y no depender del método secuencial de un microcontrolador.
- Modificar el modo de comunicación del sistema; intentar conseguir una comunicación inalámbrica, por algún sistema como el bluetooth, o comunicaciones de radio.
- Mejor aislamiento a la hora de medir la corriente que circula por el EC, por medio de alguna caja de faraday o similar.
- Uso de más potenciómetros digitales para obtener mayor definición en la generación de la señal triangular.
- Diseñar nuevos esquemas electrónicos donde se pueda elegir condensadores de mayor tamaño, para así incrementar los rangos de scan rate, y colocar algún multiplexor para leer corrientes más bajas.

Estas son algunas de las líneas que se pueden seguir tanto para mejorar el sistema como para facilitar el estudio de los materiales EC.



7. PRESUPUESTO Y ANEXOS.

Es el último punto, donde se explica el coste final del proyecto, así como los anexos correspondientes que harán entender o aclarar cualquier tipo de explicación anteriormente mencionada.

7.1 PRESUPUESTO.

En el presupuesto que se presenta a continuación, se observa de un modo estimativo, los costes de realización del Proyecto, incluyendo los costes dedicados al diseño, material y personal.

- **Coste de los materiales electrónicos utilizados:**

Los costes asociados al material utilizado para el desarrollo del proyecto se muestran en las siguientes tablas, donde se debe diferenciar los costes producidos por los ensayos y el del prototipo final.

Materiales de pruebas y estudio:

COMPONENTES	REFERENCIA	UNIDADES	COSTE UNIDAD	TOTAL
Regulador	LM7808	1	0,84 €	0,84 €
Regulador	LM7805	1	0,84 €	0,84 €
Regulador	LM7908	1	0,84 €	0,84 €
Regulador	LM7905	1	0,84 €	0,84 €
Condensador	1nF	8	0,78 €	6,26 €
Condensador	2200µF	2	0,72 €	1,44 €
Condensador	33 pF	2	0,10 €	0,20 €
Reloj de cuarzo	11,0592 MHz	1	0,28 €	0,28 €
Condensador	10 µF	1	0,15 €	0,15 €
Resistencia	4,7KΩ	3	0,15 €	0,45 €
Pulsador	???	1	0,65 €	0,65 €
Amplificador Operacional	TL082	3	0,47 €	1,41 €
Resistencia	10 KΩ	7	0,28 €	1,96 €
Resistencia	15 KΩ	2	0,28 €	0,56 €
Resistencia	1 MΩ	1	0,09 €	0,09 €
Potenciómetro Digital	AD5241	1	2,65 €	2,65 €
Condensador	10000µF	1	3,93 €	3,93 €
Microcontrolador	AT89S52	1	4,67 €	4,67 €
Resistencia	12 KΩ	1	0,16 €	0,16 €
Resistencia	1,6 KΩ	1	0,16 €	0,16 €
Resistencia	27 KΩ	1	0,16 €	0,16 €
Convertidor Analógico-Digital	AD7824	1	20,67 €	20,67 €
Condensador	4.7µF	6	0,16 €	0,96 €
Condensador	0.1µF	1	0,10 €	0,10 €
Conector Puerto RS-232	9 vias	2	0,54 €	1,08 €
Transceptor Serie	MAX-232	1	0,89 €	0,89 €
			TOTAL	52,23 €

Materiales Prototipo final:

COMPONENTES	REFERENCIA	UNIDADES	COSTE UNIDAD	TOTAL
-------------	------------	----------	--------------	-------



Medidor de voltimetría cíclica para dispositivos de transmitancia controlable

Transformador de toma intermedia	CROVISA	1	16,75 €	16,75 €
Puente rectificador		1	0,70 €	0,70 €
Regulador	LM7808	1	0,84 €	0,84 €
Regulador	LM7805	1	0,84 €	0,84 €
Regulador	LM7908	1	0,84 €	0,84 €
Regulador	LM7905	1	0,84 €	0,84 €
Condensador	1nF	8	0,78 €	6,26 €
Condensador	2200 μ F	2	0,72 €	1,44 €
Condensador	33 pF	2	0,10 €	0,20 €
Reloj de cuarzo	11,0592 MHz	1	0,28 €	0,28 €
Condensador	10 μ F	1	0,15 €	0,15 €
Resistencia	4,7K Ω	3	0,15 €	0,45 €
Pulsador	???	1	0,65 €	0,65 €
Amplificador Operacional	LM662	1	1,45 €	1,45 €
Amplificador Operacional	TL082	3	0,47 €	1,41 €
Resistencia	10 K Ω	7	0,28 €	1,96 €
Resistencia	15 K Ω	2	0,28 €	0,56 €
Resistencia	1 M Ω	1	0,09 €	0,09 €
Potenciómetro Digital	AD5241	1	2,65 €	2,65 €
Réle placas PCB	G6A-234P	2	4,68 €	9,36 €
Transistores	BD435	2	0,60 €	1,20 €
Condensador	10000 μ F	1	3,93 €	3,93 €
Resistencia	100 Ω	1	0,09 €	0,09 €
Resistencia	1 K Ω	2	0,15 €	0,30 €
Microcontrolador	AT89S52	1	4,67 €	4,67 €
Resistencia	25 K Ω	2	0,16 €	0,32 €
Resistencia	40 K Ω	1	0,16 €	0,16 €
Resistencia	12 K Ω	1	0,16 €	0,16 €
Resistencia	1,6 K Ω	1	0,16 €	0,16 €
Resistencia	27 K Ω	1	0,16 €	0,16 €
Convertidor Analógico-Digital	AD7824	1	20,67 €	20,67 €
Condensador	4.7 μ F	1	0,10 €	0,10 €
Condensador	0.1 μ F	1	0,10 €	0,10 €
Zócalos SMD/DIN	W9502 RC	3	3,39 €	10,18 €
Zócalos	40 pines	2	1,47 €	2,94 €
Zócalos	8 pines	6	0,28 €	1,68 €
Zócalos	16 pines	1	0,35 €	0,35 €
Zócalos	24 pines	2	0,85 €	1,70 €
Tira de pines	20 vías	3	0,97 €	2,92 €
Botón exterior RESET	Bóton Rojo	2	7,19 €	14,38 €
Módulo compacto de entrada	FN280	1	35,87 €	35,87 €
Conectores de color N/R Hembra	\varnothing 4 mm	4	0,64 €	2,57 €
Conector Puerto RS-232	9 vías	2	0,54 €	1,08 €
Transceptor Serie	MAX-232	1	0,89 €	0,89 €
Condensador	4,7 μ F	5	0,16 €	0,80 €
DB9 Aéreo	9 vías	1	0,74 €	0,74 €
			<i>TOTAL</i>	<i>155,83 €</i>

Materiales Mecánicos:

COMPONENTES	UNIDADES	COSTE UNIDAD	TOTAL
Caja de Plástico	1	17,80 €	17,80 €
Tornillos de sujeción	varios	0,84 €	0,84 €
<i>TOTAL</i>			<i>18,64€</i>

Los costes totales de material son:

<i>Coste Materiales de pruebas y estudio</i>	<i>52,23 €</i>
<i>Coste Material del prototipo final</i>	<i>155,83 €</i>
<i>Coste Materiales mecánicos</i>	<i>18,64 €</i>
TOTAL COSTE MATERIAL ELECTRÓNICO	226,70 €

- **Coste de personal:**

Este tipo de costes es el incurrido del trabajo realizado por las personas que han participado en el desarrollo del proyecto.

Para este proyecto han trabajado un Ing. Técnico Industrial. Esp. Electrónica y Técnico de electrónica, cuyos salarios brutos anuales se muestran en la siguiente tabla:

Ingeniero Técnico Industrial	27.000€
Técnico Electrónico	12.000€



Teniendo en cuenta que en un año se trabaja entorno a 1800 horas, estos salarios suponen un coste por hora del trabajador de:

Ingeniero Técnico Industrial	20.00 €/hora
Técnico Electrónico	8.58 €/hora

A partir de estos datos se establece los gastos producidos por el personal, describiendo el trabajo realizado y las horas que conlleva:

CONCEPTO	HORAS	COSTE/HORA	COSTE TOTAL
Desarrollo de las especificaciones	100	20.00€	2000€
Desarrollo del software	180	20.00€	3600€
Diseño del 1^{er} prototipo (P.Board)	180	20.00€	3600€
Pruebas	160	20.00€	3200€
Rediseño del Hardware	40	20.00€	800€
Montaje placa final	40	8.58€	343.2 €
Pruebas finales	120	20.00€	2400€
TOTAL			15,943.2 €

Considerando los costes de material y del personal, el Presupuesto Total del Proyecto es de:

TOTAL COSTE MATERIAL	<i>226,70 €</i>
COSTE TOTAL DE PERSONAL	15,943.2 €
TOTAL	16,169.9€

DIECISÉIS MIL CIENTO SESENTA Y NUEVE EUROS CON NOVENTA CÉNTIMOS.



7.2 BIBLIOGRAFÍA:

- [Alle01] Allen J. Bard, Larry R. Faulkner, *Electrochemical Methods: Fundamental and Applications*, 2nd ed., Wiley (2001).
- [Bam01] P. Bamfield, *Chromic Phenomena: Technological Applications of Colour Chemistry*, Royal Society of Chemistry, Cambridge, (2001).
- [Bar80] A.J. Bard, L.R. Faulkner, *“Electrochemical Methods. Fundamentals and Applications”*. Ed. Wiley. New York (1980).
- [Chr94] P.A. Christensen and A. Hamnett, *“Techniques and mechanisms in electrochemistry”*. Ed. Blackie Academic & professional. 1994. ISBN: 0751401293.
- [Col00] R.A. Colley, P.M. Budd, J.R. Owen, S. Balderson, Poly[oxyethylene-oligo(oxyethylene)] for use in subambient temperature electrochromic devices, *Polym. Int.* 49 (2000) 371-376.
- [Dit01] Ditlea, S. (2001). *The electronic paper chase*. *Scientific American*, 285, 50 - 55. Recuperado el 26 de mayo de 2005 de la base de datos de Academic Search Elite (EBSCO).
- [Gra02] Granqvist, C. G. and Hultaker, A., Transparent and conducting ITO films: new developments and applications. *Thin Solid Films*, (2002), 411, 1–5.
- [Gro93] David K. Grosser, Jr. *“Cyclic Voltammetry”*. Simulation and Analysis of Reaction Mechanisms. Ed. VCH. 1993. ISBN: 1560810262.
- [Hec97] E. Hecht, A. Zajack. *Optics*, 3rd edition. Addison-Wesley Pub. Co. ISBN: 0201838877 (1997).
- [Hib93] Hibbert, D. Brynn, *“Introduction to electrochemistry”*. Ed. Macmillan. (1993). ISBN: 0333589122.
- [Lev02] N. Leventis, Electrochromic devices, in *McGraw-Hill Encyclopedia of Science and Technology*, 9th Ed., McGraw-Hill, New York, 6 (2002) 254-257.
- [Max99] Max Born, Emil Wolf. *Principles of Optics. Electromagnetic Theory of propagation, interface and Diffraction of Light*. 7th Edition, ISBN: 0521642221. December (1999).
- [Rau99] R.D. Rauh, Electrochromic windows: an overview, *Electrochim. Acta* 44 (1999) 3165-3176.



[Ros01] D.R. Rosseinsky, R.J. Mortimer, Electrochromic systems and the prospects for devices, Adv. Mater. 13 (2001) 783-793.

[Gran06] E. Avendaño, L. Berggren, G.A. Niklasson, C.G. Granqvist and A. Azens "Thin Solid Films", Volumen 496, Pag:30-36, 1 Febrero 2006.

[Verg06] Vergaz, Ricardo; Pena, J. M. S.; Barrios, David; Vazquez, Carmen. *Electrical analysis of new all-plastic electrochromic devices* Optical Engineering Volume:45 Issue: 11 Article Number: 110501 NOV2006 SPIE-INT Society Optical Engineering, 1000 20TH ST, PO BOX 10, BELLINGHAM, WA 98225, USA ISSN: 0091-3286

GLOSARIO DE ACRÓNIMOS:

EC	Electrocromico
VC	Voltametría Cíclica
SR	Scan Rate (Velocidad de barrido)
A.O.	Amplificador Operacional
ADC	Conversor Analógico Digital
ACK	Acknowledgement
I²C	<i>Inter-Integrated Circuit</i> (Circuitos Inter-Integrados)
CLK	Clock (reloj)
R	Resistencia
HEX	Hexadecimal
LUT	Look Up Table (tabla de consulta)
MSB	Bit Más Significativo



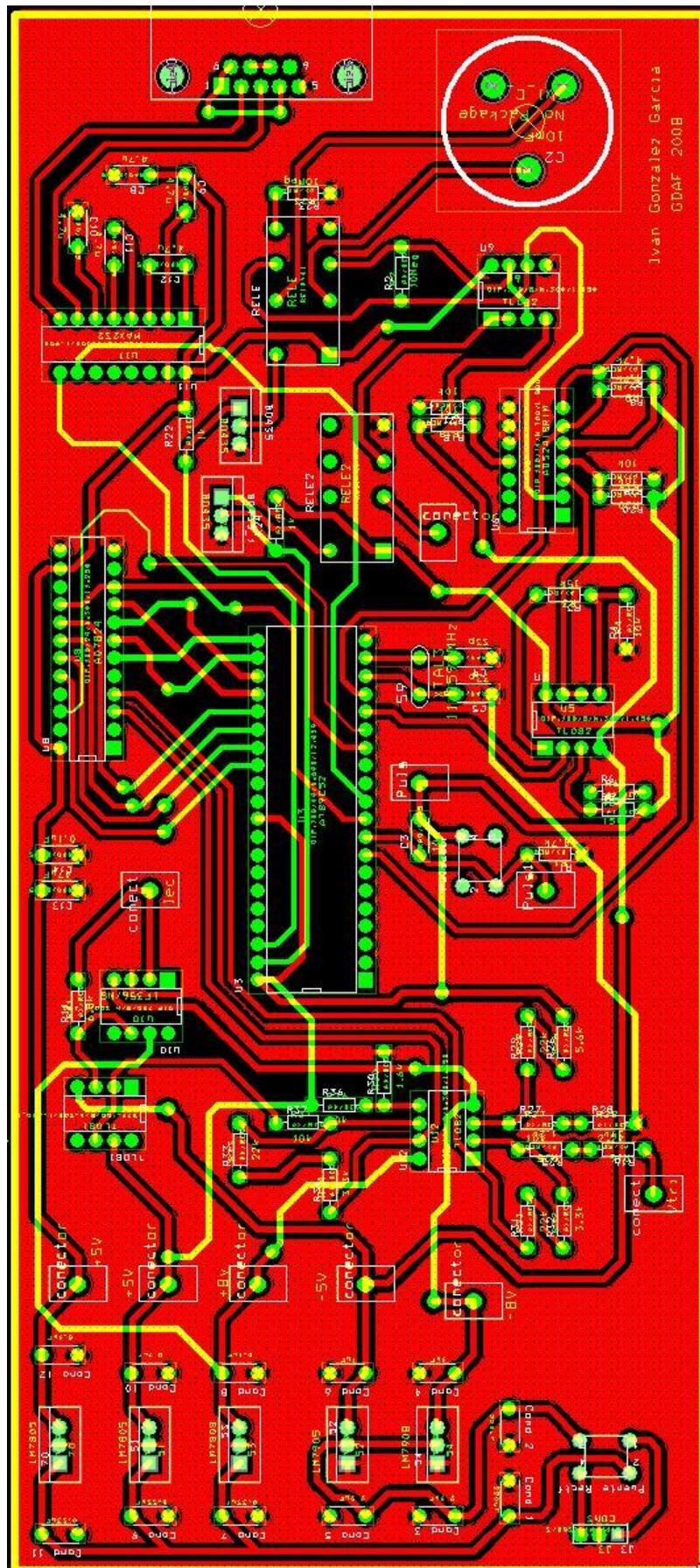
7.3 ANEXOS:

HOJA DE CARACTERÍSTICAS.



ANEXO I-A.

Fotolito placa final



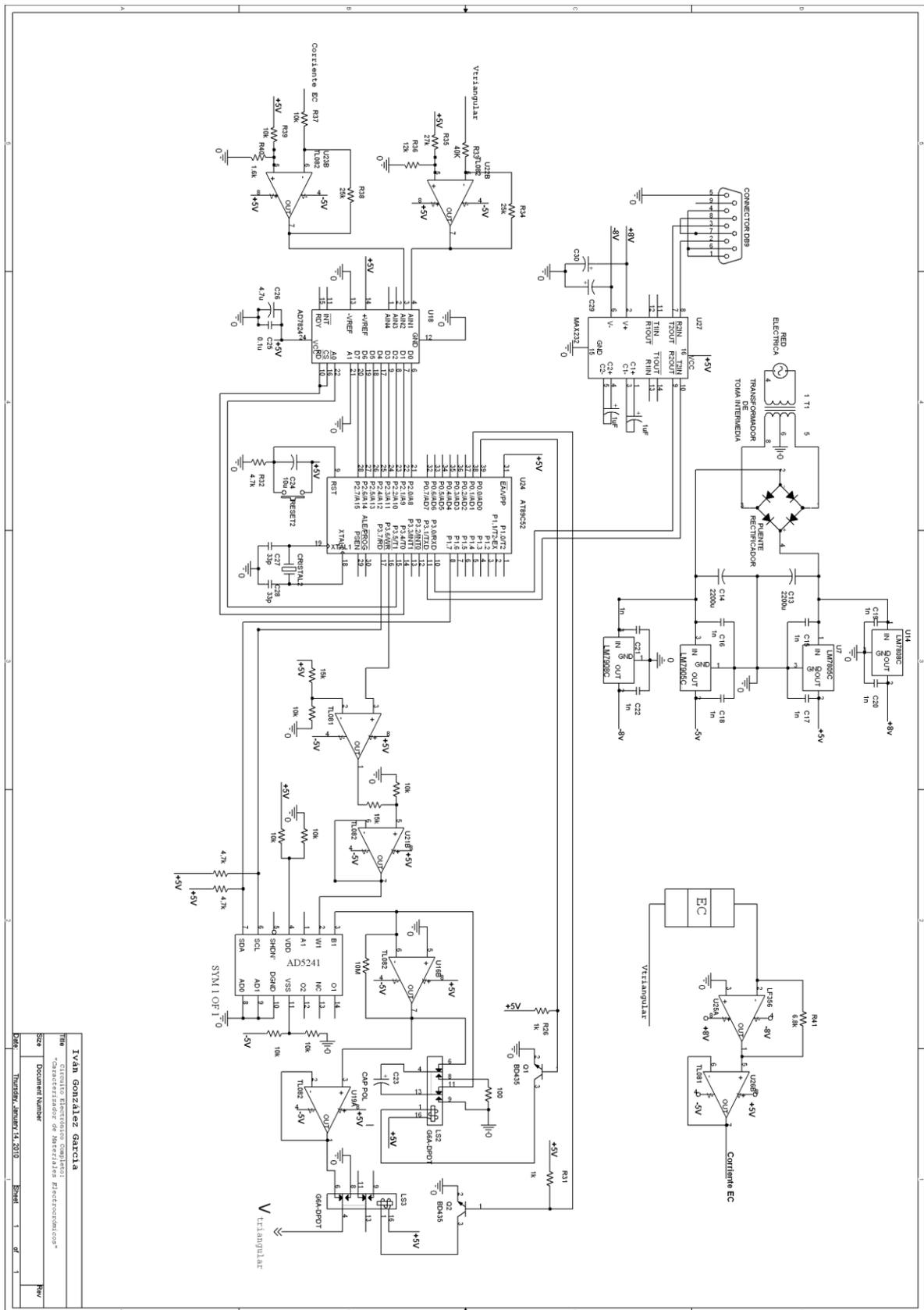
Autor: Iván Andrés González García
Tutor: Ricardo Vergaz Benito



ANEXO I-B.

Esquema eléctrico completo

Medidor de voltimetría cíclica para dispositivos de transmitancia controlable





ANEXO I-C.

Hoja característica AD7824

AD7824/AD7828

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS*

(T_A = 25°C, unless otherwise noted.)

V _{DD}	0 V, 7 V
Digital Input Voltage to GND (RD, CS, A0, A1, and A2)	-0.3 V, V _{DD} + 0.3 V
Digital Output Voltage to GND (DB0, DB7, RDY, and INT)	-0.3 V, V _{DD} + 0.3 V
V _{REF} (+) to GND	V _{REF} (-), V _{DD} + 0.3 V
V _{REF} (-) to GND	0 V, V _{REF} (+)
Analog Input (Any Channel)	-0.3 V, V _{DD} + 0.3 V

Operating Temperature Range

Commercial (K, L Versions)	0°C to 70°C
Industrial (B, C Versions)	-40°C to +85°C
Extended (T, U Versions)	-55°C to +125°C
Storage Temperature Range	-65°C to +150°C
Lead Temperature (Soldering, 10 secs)	300°C
Power Dissipation (Any Package) to 75°C	450 mW
Derates above 75°C by	6 mW/°C

*Stresses above those listed under Absolute Maximum Ratings may cause permanent damage to the device. This is a stress rating only; functional operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operational sections of this specification is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

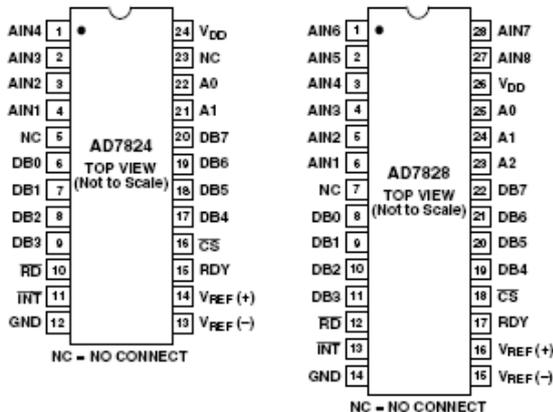
CAUTION

ESD (electrostatic discharge) sensitive device. Electrostatic charges as high as 4000 V readily accumulate on the human body and test equipment and can discharge without detection. Although AD7824/AD7828 feature proprietary ESD protection circuitry, permanent damage may occur on devices subjected to high energy electrostatic discharges. Therefore, proper ESD precautions are recommended to avoid performance degradation or loss of functionality.

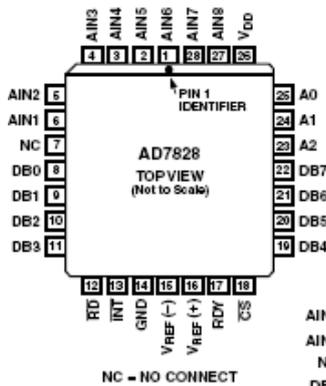


PIN CONFIGURATIONS

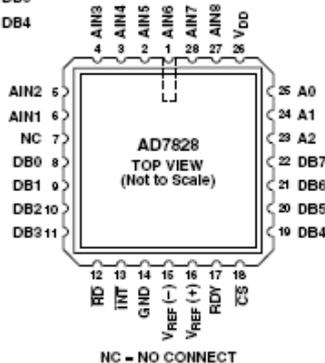
DIP/SOIC/SSOP



PLCC



LCCC



ORDERING GUIDE

Model	Temperature Range	Total Unadjusted Error (LSBs)	Package Option
AD7824KN	0°C to 70°C	±1	N-24
AD7824LN	0°C to 70°C	±1/2	N-24
AD7824KR	0°C to 70°C	±1	R-24
AD7824BQ	-40°C to +85°C	±1	Q-24
AD7824CQ	-40°C to +85°C	±1/2	Q-24
AD7824TQ*	-55°C to +125°C	±1	Q-24
AD7824UQ*	-55°C to +125°C	±1/2	Q-24
AD7828KN	0°C to 70°C	±1	N-28
AD7828LN	0°C to 70°C	±1/2	N-28
AD7828KP	0°C to 70°C	±1	P-28A
AD7828LP	0°C to 70°C	±1/2	P-28A
AD7828BQ	-40°C to +85°C	±1	Q-28
AD7828CQ	-40°C to +85°C	±1/2	Q-28
AD7828BR	-40°C to +85°C	+1	R-28
AD7828LRS	0°C to 70°C	±1/2	RS-28
AD7828TQ*	-55°C to +125°C	±1	Q-28
AD7828UQ*	-55°C to +125°C	±1/2	Q-28
AD7828TE*	-55°C to +125°C	±1	E-28A
AD7828UE*	-55°C to +125°C	±1/2	E-28A

* Available to /883B processing only. Contact our local sales office for military data sheet. For U.S. Standard Military Drawing (SMD) see DESC Drawing #5692-88764.

AD7824/AD7828

UNIPOLAR OPERATION

The analog input range for any channel of the AD7824/AD7828 is 0 V to 5 V as shown in the unipolar operational diagram of Figure 10. Figure 11 shows the designed code transitions that occur midway between successive integer LSB values (i.e., 1/2 LSB, 3/2 LSB, 5/2 LSB, FS 3/2 LSBs). The output code is natural binary with 1 LSB = FS/256 = (5/256) V = 19.5 mV.

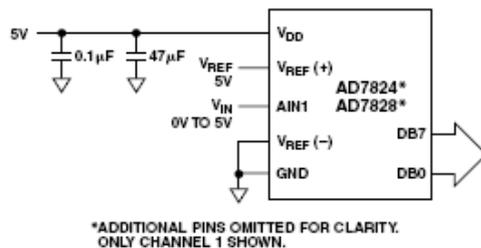


Figure 10. AD7824/AD7828 Unipolar 0 V to 5 V Operation

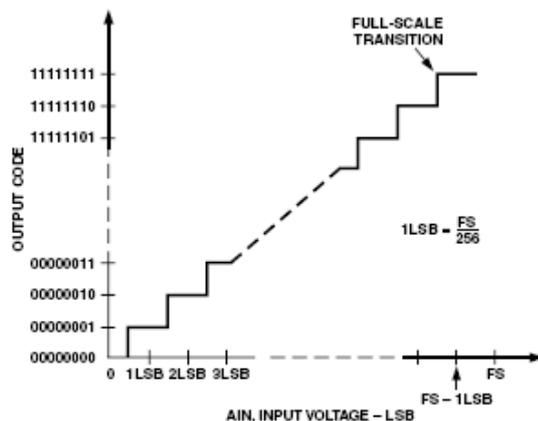


Figure 11. Ideal Input/Output Transfer Characteristic for Unipolar 0 V to 5 V Operation

BIPOLAR OPERATION

The circuit of Figure 12 is designed for bipolar operation. An AD544 op amp conditions the signal input (V_{IN}) so that only positive voltages appear at AIN1. The closed loop transfer function of the op amp for the resistor values shown is given below:

$$AIN1 = (2.5 - 0.625V_{IN}) \text{ Volts}$$

The analog input range is ± 4 V and the LSB size is 31.25 mV. The output code is complementary offset binary. The ideal input/output characteristic is shown in Figure 13.

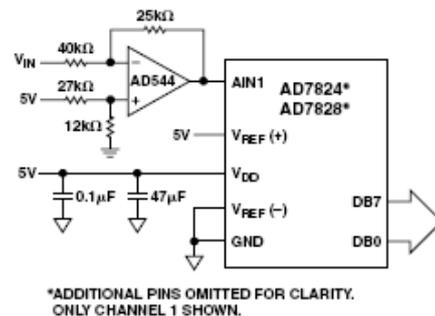


Figure 12. AD7824/AD7828 Bipolar ± 4 V Operation

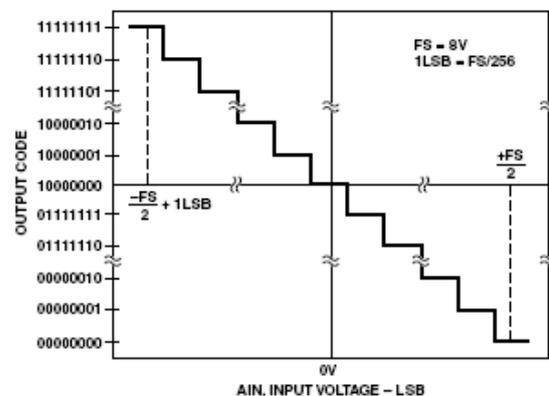


Figure 13. Ideal Input/Output Transfer Characteristic for ± 4 V Operation

TIMING AND CONTROL

The AD7824/AD7828 has two digital inputs for timing and control. These are Chip Select (\overline{CS}) and Read (\overline{RD}). A READ operation brings \overline{CS} and \overline{RD} low, which starts a conversion on the channel selected by the multiplexer address inputs (see Table I). There are two modes of operation as outlined by the timing diagrams of Figures 14 and 15. Mode 0 is designed for microprocessors that can be driven into a WAIT state. A READ operation (i.e., \overline{CS} and \overline{RD} are taken low) starts a conversion and data is read when conversion is complete. Mode 1 does not require microprocessor WAIT states. A READ operation initiates a conversion and reads the previous conversion results.

Table I. Truth Table for Input Channel Selection

AD7824		AD7828			Channel
A1	A0	A2	A1	A0	
0	0	0	0	0	AIN1
0	1	0	0	1	AIN2
1	0	0	1	0	AIN3
1	1	0	1	1	AIN4
		1	0	0	AIN5
		1	0	1	AIN6
		1	1	0	AIN7
		1	1	1	AIN8



ANEXO I-D.

Hoja características reguladores



www.fairchildsemi.com

MC78XX/LM78XX/MC78XXA

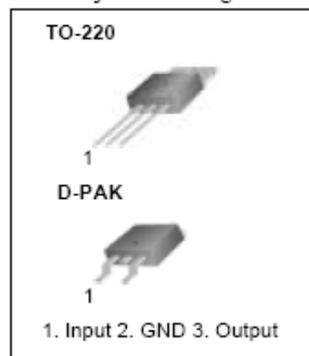
3-Terminal 1A Positive Voltage Regulator

Features

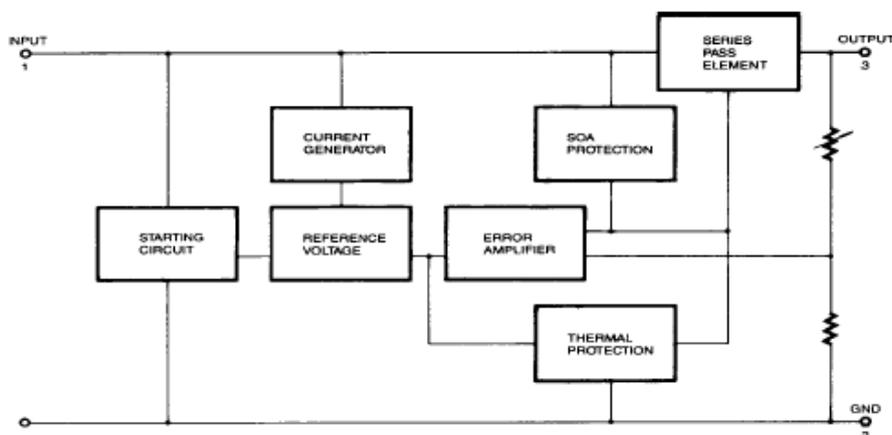
- Output Current up to 1A
- Output Voltages of 5, 6, 8, 9, 10, 12, 15, 18, 24V
- Thermal Overload Protection
- Short Circuit Protection
- Output Transistor Safe Operating Area Protection

Description

The MC78XX/LM78XX/MC78XXA series of three terminal positive regulators are available in the TO-220/D-PAK package and with several fixed output voltages, making them useful in a wide range of applications. Each type employs internal current limiting, thermal shut down and safe operating area protection, making it essentially indestructible. If adequate heat sinking is provided, they can deliver over 1A output current. Although designed primarily as fixed voltage regulators, these devices can be used with external components to obtain adjustable voltages and currents.



Internal Block Diagram



Rev. 1.0.1

©2001 Fairchild Semiconductor Corporation

MC78XX/LM78XX/MC78XXA

Absolute Maximum Ratings

Parameter	Symbol	Value	Unit
Input Voltage (for $V_O = 5V$ to $18V$) (for $V_O = 24V$)	V_I	35	V
	V_{I1}	40	V
Thermal Resistance Junction-Cases (TO-220)	$R_{\theta JC}$	5	$^{\circ}C/W$
Thermal Resistance Junction-Air (TO-220)	$R_{\theta JA}$	65	$^{\circ}C/W$
Operating Temperature Range	T_{OPR}	0 ~ +125	$^{\circ}C$
Storage Temperature Range	T_{STG}	-65 ~ +150	$^{\circ}C$

Electrical Characteristics (MC7805/LM7805)

(Refer to test circuit , $0^{\circ}C < T_J < 125^{\circ}C$, $I_O = 500mA$, $V_I = 10V$, $C_I = 0.33\mu F$, $C_O = 0.1\mu F$, unless otherwise specified)

Parameter	Symbol	Conditions	MC7805/LM7805			Unit	
			Min.	Typ.	Max.		
Output Voltage	V_O	$T_J = +25^{\circ}C$	4.8	5.0	5.2	V	
		$5.0mA \leq I_O \leq 1.0A$, $P_O \leq 15W$ $V_I = 7V$ to $20V$	4.75	5.0	5.25		
Line Regulation (Note1)	Regline	$T_J = +25^{\circ}C$	$V_O = 7V$ to $25V$	-	4.0	100	mV
			$V_I = 8V$ to $12V$	-	1.6	50	
Load Regulation (Note1)	Regload	$T_J = +25^{\circ}C$	$I_O = 5.0mA$ to $1.5A$	-	9	100	mV
			$I_O = 250mA$ to $750mA$	-	4	50	
Quiescent Current	I_Q	$T_J = +25^{\circ}C$	-	5.0	8.0	mA	
Quiescent Current Change	ΔI_Q	$I_O = 5mA$ to $1.0A$	-	0.03	0.5	mA	
		$V_I = 7V$ to $25V$	-	0.3	1.3		
Output Voltage Drift	$\Delta V_O / \Delta T$	$I_O = 5mA$	-	-0.8	-	mV/ $^{\circ}C$	
Output Noise Voltage	V_N	$f = 10Hz$ to $100KHz$, $T_A = +25^{\circ}C$	-	42	-	$\mu V/V_O$	
Ripple Rejection	RR	$f = 120Hz$ $V_O = 8V$ to $18V$	62	73	-	dB	
Dropout Voltage	V_{Drop}	$I_O = 1A$, $T_J = +25^{\circ}C$	-	2	-	V	
Output Resistance	r_O	$f = 1KHz$	-	15	-	$m\Omega$	
Short Circuit Current	I_{SC}	$V_I = 35V$, $T_A = +25^{\circ}C$	-	230	-	mA	
Peak Current	I_{PK}	$T_J = +25^{\circ}C$	-	2.2	-	A	

Note:

1. Load and line regulation are specified at constant junction temperature. Changes in V_O due to heating effects must be taken into account separately. Pulse testing with low duty is used.

Typical Applications

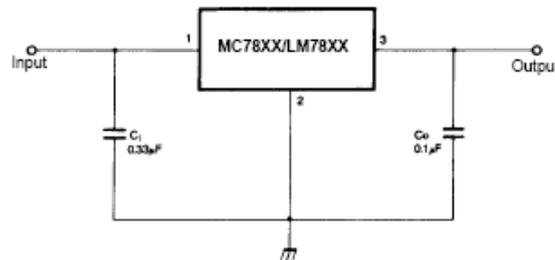


Figure 5. DC Parameters

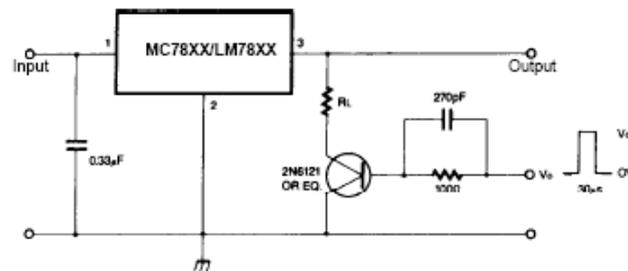


Figure 6. Load Regulation

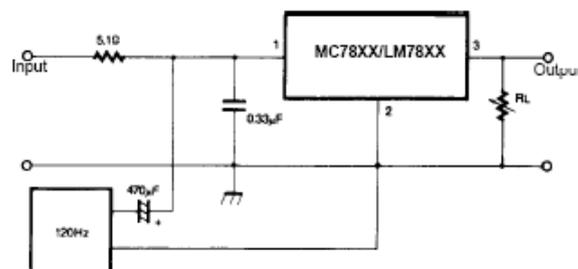


Figure 7. Ripple Rejection

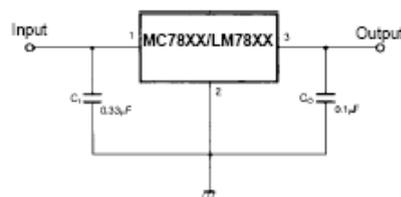


Figure 8. Fixed Output Regulator



ANEXO I-E.
Hoja características
Microcontrolador

Features

- Compatible with MCS-51® Products
- 8K Bytes of In-System Programmable (ISP) Flash Memory
 - Endurance: 1000 Write/Erase Cycles
- 4.0V to 5.5V Operating Range
- Fully Static Operation: 0 Hz to 33 MHz
- Three-level Program Memory Lock
- 256 x 8-bit Internal RAM
- 32 Programmable I/O Lines
- Three 16-bit Timer/Counters
- Eight Interrupt Sources
- Full Duplex UART Serial Channel
- Low-power Idle and Power-down Modes
- Interrupt Recovery from Power-down Mode
- Watchdog Timer
- Dual Data Pointer
- Power-off Flag

Description

The AT89S52 is a low-power, high-performance CMOS 8-bit microcontroller with 8K bytes of in-system programmable Flash memory. The device is manufactured using Atmel's high-density nonvolatile memory technology and is compatible with the industry-standard 80C51 instruction set and pinout. The on-chip Flash allows the program memory to be reprogrammed in-system or by a conventional nonvolatile memory programmer. By combining a versatile 8-bit CPU with in-system programmable Flash on a monolithic chip, the Atmel AT89S52 is a powerful microcontroller which provides a highly-flexible and cost-effective solution to many embedded control applications.

The AT89S52 provides the following standard features: 8K bytes of Flash, 256 bytes of RAM, 32 I/O lines, Watchdog timer, two data pointers, three 16-bit timer/counters, a six-vector two-level interrupt architecture, a full duplex serial port, on-chip oscillator, and clock circuitry. In addition, the AT89S52 is designed with static logic for operation down to zero frequency and supports two software selectable power saving modes. The Idle Mode stops the CPU while allowing the RAM, timer/counters, serial port, and interrupt system to continue functioning. The Power-down mode saves the RAM contents but freezes the oscillator, disabling all other chip functions until the next interrupt or hardware reset.



**8-bit
Microcontroller
with 8K Bytes
In-System
Programmable
Flash**

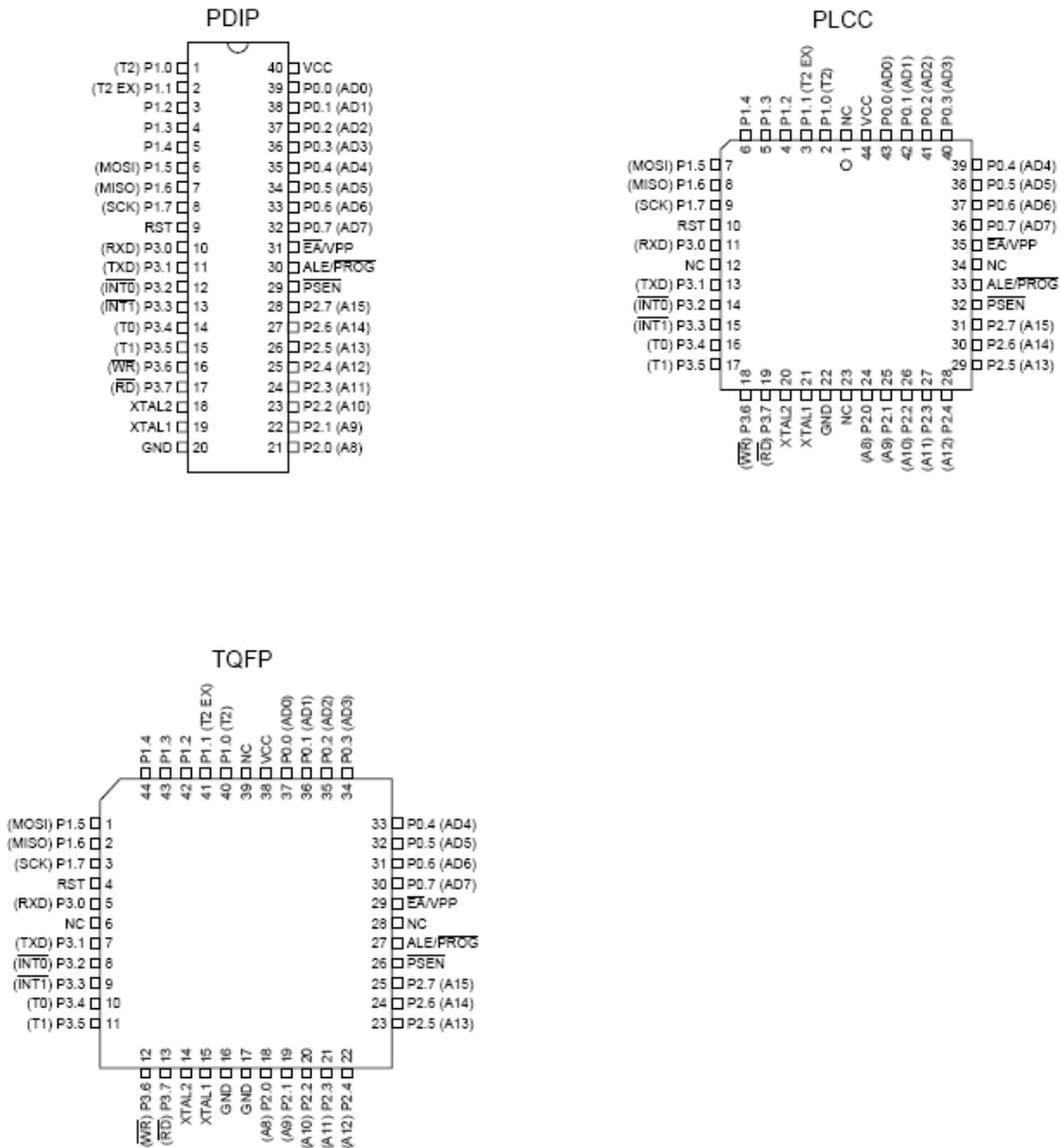
AT89S52

Rev. 1919A-07/01



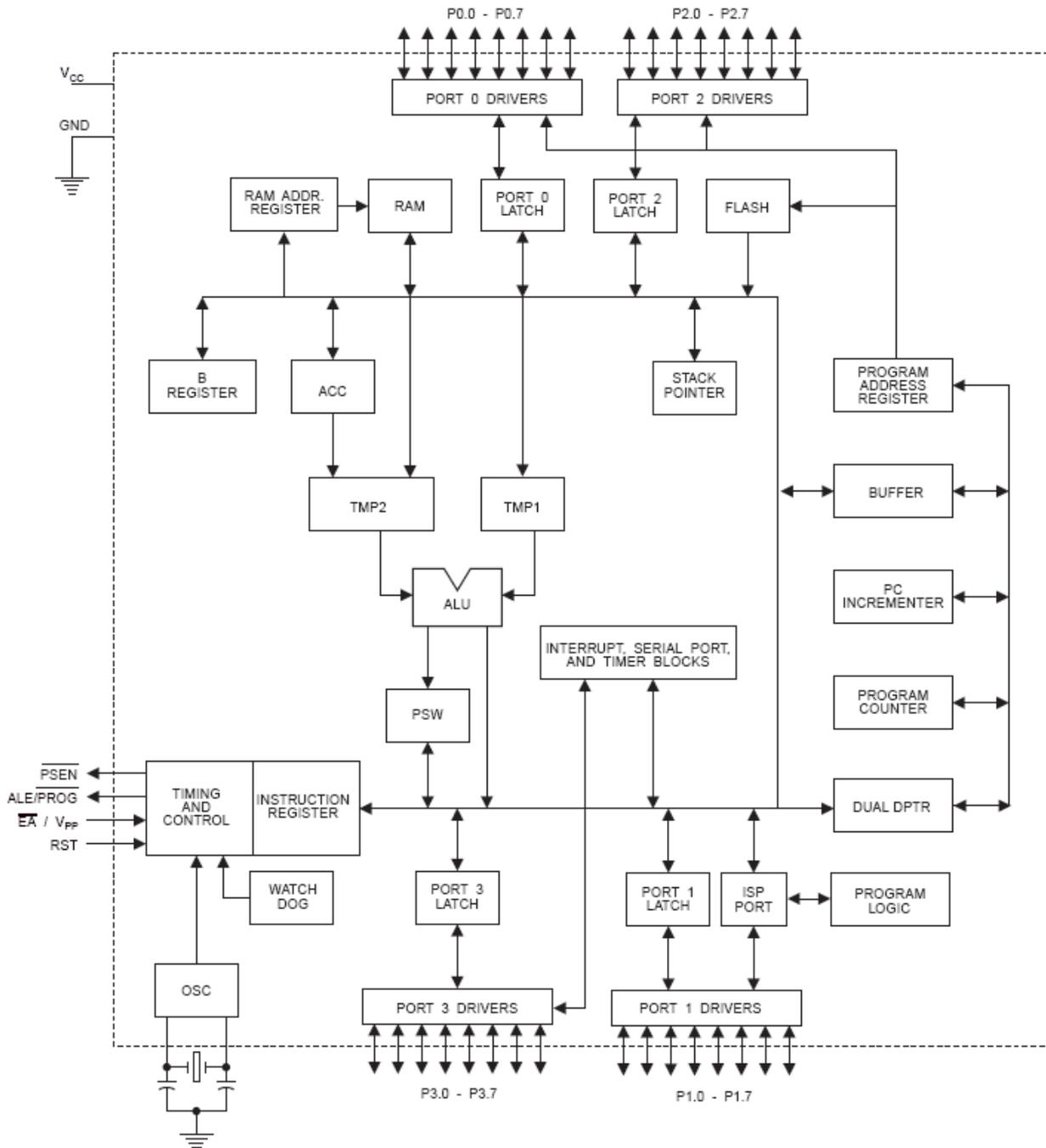


Pin Configurations



AT89S52

Block Diagram





ANEXO I-F.

Hoja de características MAX-232



+5V-Powered, Multichannel RS-232 Drivers/Receivers

MAX220-MAX249

General Description

The MAX220–MAX249 family of line drivers/receivers is intended for all EIA/TIA-232E and V.28/V.24 communications interfaces, particularly applications where $\pm 12V$ is not available.

These parts are especially useful in battery-powered systems, since their low-power shutdown mode reduces power dissipation to less than $5\mu W$. The MAX225, MAX233, MAX235, and MAX245/MAX246/MAX247 use no external components and are recommended for applications where printed circuit board space is critical.

Applications

- Portable Computers
- Low-Power Modems
- Interface Translation
- Battery-Powered RS-232 Systems
- Multidrop RS-232 Networks

Features

Superior to Bipolar

- ◆ Operate from Single +5V Power Supply (+5V and +12V—MAX231/MAX239)
- ◆ Low-Power Receive Mode in Shutdown (MAX223/MAX242)
- ◆ Meet All EIA/TIA-232E and V.28 Specifications
- ◆ Multiple Drivers and Receivers
- ◆ 3-State Driver and Receiver Outputs
- ◆ Open-Line Detection (MAX243)

Ordering Information

PART	TEMP RANGE	PIN-PACKAGE
MAX220CPE	0°C to +70°C	16 Plastic DIP
MAX220CSE	0°C to +70°C	16 Narrow SO
MAX220CWE	0°C to +70°C	16 Wide SO
MAX220C/D	0°C to +70°C	Dice*
MAX220EPE	-40°C to +85°C	16 Plastic DIP
MAX220ESE	-40°C to +85°C	16 Narrow SO
MAX220EWE	-40°C to +85°C	16 Wide SO
MAX220EJE	-40°C to +85°C	16 CERDIP
MAX220MJE	-55°C to +125°C	16 CERDIP

Ordering Information continued at end of data sheet.

*Contact factory for dice specifications.

Selection Table

Part Number	Power Supply (V)	No. of RS-232 Drivers/Rx	No. of Ext. Caps	Nominal Cap. Value (μF)	SHDN & Three-State	Rx Active in SHDN	Data Rate (kbps)	Features
MAX220	+5	2/2	4	0.1	No	—	120	Ultra-low-power, industry-standard pinout
MAX222	+5	2/2	4	0.1	Yes	—	200	Low-power shutdown
MAX223 (MAX213)	+5	4/5	4	1.0 (0.1)	Yes	✓	120	MAX241 and receivers active in shutdown
MAX225	+5	5/5	0	—	Yes	✓	120	Available in SO
MAX230 (MAX200)	+5	5/0	4	1.0 (0.1)	Yes	—	120	5 drivers with shutdown
MAX231 (MAX201)	+5 and +7.5 to +13.2	2/2	2	1.0 (0.1)	No	—	120	Standard +5/+12V or battery supplies; same functions as MAX232
MAX232 (MAX202)	+5	2/2	4	1.0 (0.1)	No	—	120 (64)	Industry standard
MAX232A	+5	2/2	4	0.1	No	—	200	Higher slew rate, small caps
MAX233 (MAX203)	+5	2/2	0	—	No	—	120	No external caps
MAX233A	+5	2/2	0	—	No	—	200	No external caps, high slew rate
MAX234 (MAX204)	+5	4/0	4	1.0 (0.1)	No	—	120	Replaces 1488
MAX235 (MAX205)	+5	5/5	0	—	Yes	—	120	No external caps
MAX236 (MAX206)	+5	4/3	4	1.0 (0.1)	Yes	—	120	Shutdown, three state
MAX237 (MAX207)	+5	5/3	4	1.0 (0.1)	No	—	120	Complements IBM PC serial port
MAX238 (MAX208)	+5	4/4	4	1.0 (0.1)	No	—	120	Replaces 1488 and 1489
MAX239 (MAX209)	+5 and +7.5 to +13.2	3/5	2	1.0 (0.1)	No	—	120	Standard +5/+12V or battery supplies; single-package solution for IBM PC serial port
MAX240	+5	5/5	4	1.0	Yes	—	120	DIP or flatpack package
MAX241 (MAX211)	+5	4/5	4	1.0 (0.1)	Yes	—	120	Complete IBM PC serial port
MAX242	+5	2/2	4	0.1	Yes	✓	200	Separate shutdown and enable
MAX243	+5	2/2	4	0.1	No	—	200	Open-line detection simplifies cabling
MAX244	+5	8/10	4	1.0	No	—	120	High slew rate
MAX245	+5	8/10	0	—	Yes	✓	120	High slew rate, int. caps, two shutdown modes
MAX246	+5	8/10	0	—	Yes	✓	120	High slew rate, int. caps, three shutdown modes
MAX247	+5	8/9	0	—	Yes	✓	120	High slew rate, int. caps, nine operating modes
MAX248	+5	8/8	4	1.0	Yes	✓	120	High slew rate, selective half-chip enables
MAX249	+5	6/10	4	1.0	Yes	✓	120	Available in quad flatpack package



For pricing, delivery, and ordering information, please contact Maxim/Dallas Direct! at 1-888-629-4642, or visit Maxim's website at www.maxim-ic.com.



+5V-Powered, Multichannel RS-232 Drivers/Receivers

MAX220-MAX249

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS—MAX220/222/232A/233A/242/243

Supply Voltage (V _{CC})	-0.3V to +6V	20-Pin Plastic DIP (derate 8.00mW/°C above +70°C)	..440mW
Input Voltages		16-Pin Narrow SO (derate 8.70mW/°C above +70°C)	...696mW
T _{IN}	-0.3V to (V _{CC} - 0.3V)	16-Pin Wide SO (derate 9.52mW/°C above +70°C)	.....762mW
R _{IN} (Except MAX220)	±30V	18-Pin Wide SO (derate 9.52mW/°C above +70°C)	.....762mW
R _{IN} (MAX220)	±25V	20-Pin Wide SO (derate 10.00mW/°C above +70°C)	....800mW
T _{OUT} (Except MAX220) (Note 1)	±15V	20-Pin SSOP (derate 8.00mW/°C above +70°C)	.....640mW
T _{OUT} (MAX220)	±13.2V	16-Pin CERDIP (derate 10.00mW/°C above +70°C)	....800mW
Output Voltages		18-Pin CERDIP (derate 10.53mW/°C above +70°C)	.....842mW
T _{OUT}	±15V	Operating Temperature Ranges	
R _{OUT}	-0.3V to (V _{CC} + 0.3V)	MAX2_AC_, MAX2_C_	.....0°C to +70°C
Driver/Receiver Output Short Circuited to GND	Continuous	MAX2_AE_, MAX2_E_	.....-40°C to +85°C
Continuous Power Dissipation (T _A = +70°C)		MAX2_AM_, MAX2_M_	.....-55°C to +125°C
16-Pin Plastic DIP (derate 10.53mW/°C above +70°C)	....842mW	Storage Temperature Range	.....-65°C to +160°C
18-Pin Plastic DIP (derate 11.11mW/°C above +70°C)	....889mW	Lead Temperature (soldering, 10s)	.....+300°C

Note 1: Input voltage measured with T_{OUT} in high-impedance state, $\overline{\text{SHDN}}$ or V_{CC} = 0V.

Note 2: For the MAX220, V₊ and V₋ can have a maximum magnitude of 7V, but their absolute difference cannot exceed 13V.

Stresses beyond those listed under "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated in the operational sections of the specifications is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS—MAX220/222/232A/233A/242/243

(V_{CC} = +5V ±10%, C₁-C₄ = 0.1μF, MAX220, C₁ = 0.047μF, C₂-C₄ = 0.33μF, T_A = T_{MIN} to T_{MAX}, unless otherwise noted.)

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS	
RS-232 TRANSMITTERS						
Output Voltage Swing	All transmitter outputs loaded with 3kΩ to GND	±5	±8		V	
Input Logic Threshold Low			1.4	0.8	V	
Input Logic Threshold High	All devices except MAX220	2	1.4		V	
	MAX220: V _{CC} = 5.0V	2.4				
Logic Pull-Up/Input Current	All except MAX220, normal operation		5	40	μA	
	$\overline{\text{SHDN}}$ = 0V, MAX222/242, shutdown, MAX220		±0.01	±1		
Output Leakage Current	V _{CC} = 5.5V, $\overline{\text{SHDN}}$ = 0V, V _{OUT} = ±15V, MAX222/242		±0.01	±10	μA	
	V _{CC} = $\overline{\text{SHDN}}$ = 0V, V _{OUT} = ±15V		±0.01	±10		
Data Rate			200	116	kbps	
Transmitter Output Resistance	V _{CC} = V ₊ = V ₋ = 0V, V _{OUT} = ±2V	300	10M		Ω	
Output Short-Circuit Current	V _{OUT} = 0V	±7	±22		mA	
RS-232 RECEIVERS						
RS-232 Input Voltage Operating Range				±30	V	
RS-232 Input Threshold Low	V _{CC} = 5V	All except MAX243 R _{2IN}	0.8	1.3	V	
		MAX243 R _{2IN} (Note 2)	-3			
RS-232 Input Threshold High	V _{CC} = 5V	All except MAX243 R _{2IN}		1.8	2.4	V
		MAX243 R _{2IN} (Note 2)		-0.5	-0.1	
RS-232 Input Hysteresis	All except MAX243, V _{CC} = 5V, no hysteresis in shdn. MAX243		0.2	0.5	1	V
				1		
RS-232 Input Resistance		3	5	7	kΩ	
TTL/CMOS Output Voltage Low	I _{OUT} = 3.2mA		0.2	0.4	V	
TTL/CMOS Output Voltage High	I _{OUT} = -1.0mA	3.5	V _{CC} - 0.2		V	
TTL/CMOS Output Short-Circuit Current	Sourcing V _{OUT} = GND	-2	-10		mA	
	Shrinking V _{OUT} = V _{CC}	10	30			



+5V-Powered, Multichannel RS-232 Drivers/Receivers

MAX220-MAX249

ELECTRICAL CHARACTERISTICS—MAX220/222/232A/233A/242/243 (continued)

(V_{CC} = +5V ±10%, C1-C4 = 0.1µF, MAX220, C1 = 0.047µF, C2-C4 = 0.33µF, T_A = T_{MIN} to T_{MAX}, unless otherwise noted.)

PARAMETER	CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNITS
TTL/CMOS Output Leakage Current	$\overline{\text{SHDN}} = V_{CC}$ or $\overline{\text{EN}} = V_{CC}$ ($\overline{\text{SHDN}} = 0V$ for MAX222), $0V \leq V_{OUT} \leq V_{CC}$			±0.05	±10	µA
$\overline{\text{EN}}$ Input Threshold Low	MAX242			1.4	0.8	V
$\overline{\text{EN}}$ Input Threshold High	MAX242		2.0	1.4		V
Operating Supply Voltage			4.5		5.5	V
V _{CC} Supply Current ($\overline{\text{SHDN}} = V_{CC}$), Figures 5, 6, 11, 19	No load	MAX220		0.5	2	mA
		MAX222/232A/233A/242/243		4	10	
	3kΩ load both inputs	MAX220		12		
		MAX222/232A/233A/242/243		15		
Shutdown Supply Current	MAX222/242	T _A = +25°C		0.1	10	µA
		T _A = 0°C to +70°C		2	50	
		T _A = -40°C to +85°C		2	50	
		T _A = -55°C to +125°C		35	100	
$\overline{\text{SHDN}}$ Input Leakage Current	MAX222/242				±1	µA
$\overline{\text{SHDN}}$ Threshold Low	MAX222/242			1.4	0.8	V
$\overline{\text{SHDN}}$ Threshold High	MAX222/242		2.0	1.4		V
Transition Slew Rate	C _L = 50pF to 2500pF, R _L = 3kΩ to 7kΩ, V _{CC} = 5V, T _A = +25°C, measured from +3V to -3V or -3V to +3V	MAX222/232A/233A/242/243	6	12	30	V/µs
		MAX220	1.5	3	30	
Transmitter Propagation Delay TLL to RS-232 (Normal Operation), Figure 1	t _{PHLT}	MAX222/232A/233A/242/243		1.3	3.5	µs
		MAX220		4	10	
	t _{PLHT}	MAX222/232A/233A/242/243		1.5	3.5	
		MAX220		5	10	
Receiver Propagation Delay RS-232 to TLL (Normal Operation), Figure 2	t _{PHLR}	MAX222/232A/233A/242/243		0.5	1	µs
		MAX220		0.6	3	
	t _{PLHR}	MAX222/232A/233A/242/243		0.6	1	
		MAX220		0.8	3	
Receiver Propagation Delay RS-232 to TLL (Shutdown), Figure 2	t _{PHLS}	MAX242		0.5	10	µs
	t _{PLHS}	MAX242		2.5	10	
Receiver-Output Enable Time, Figure 3	t _{ER}	MAX242		125	500	ns
Receiver-Output Disable Time, Figure 3	t _{DR}	MAX242		160	500	ns
Transmitter-Output Enable Time ($\overline{\text{SHDN}}$ Goes High), Figure 4	t _{ET}	MAX222/242, 0.1µF caps (includes charge-pump start-up)		250		µs
Transmitter-Output Disable Time ($\overline{\text{SHDN}}$ Goes Low), Figure 4	t _{DT}	MAX222/242, 0.1µF caps		600		ns
Transmitter + to - Propagation Delay Difference (Normal Operation)	t _{PHLT} - t _{PLHT}	MAX222/232A/233A/242/243		300		ns
		MAX220		2000		
Receiver + to - Propagation Delay Difference (Normal Operation)	t _{PHLR} - t _{PLHR}	MAX222/232A/233A/242/243		100		ns
		MAX220		225		

Note 3: MAX243 R_{2OUT} is guaranteed to be low when R_{2IN} is ≥ 0V or is floating.

+5V-Powered, Multichannel RS-232 Drivers/Receivers

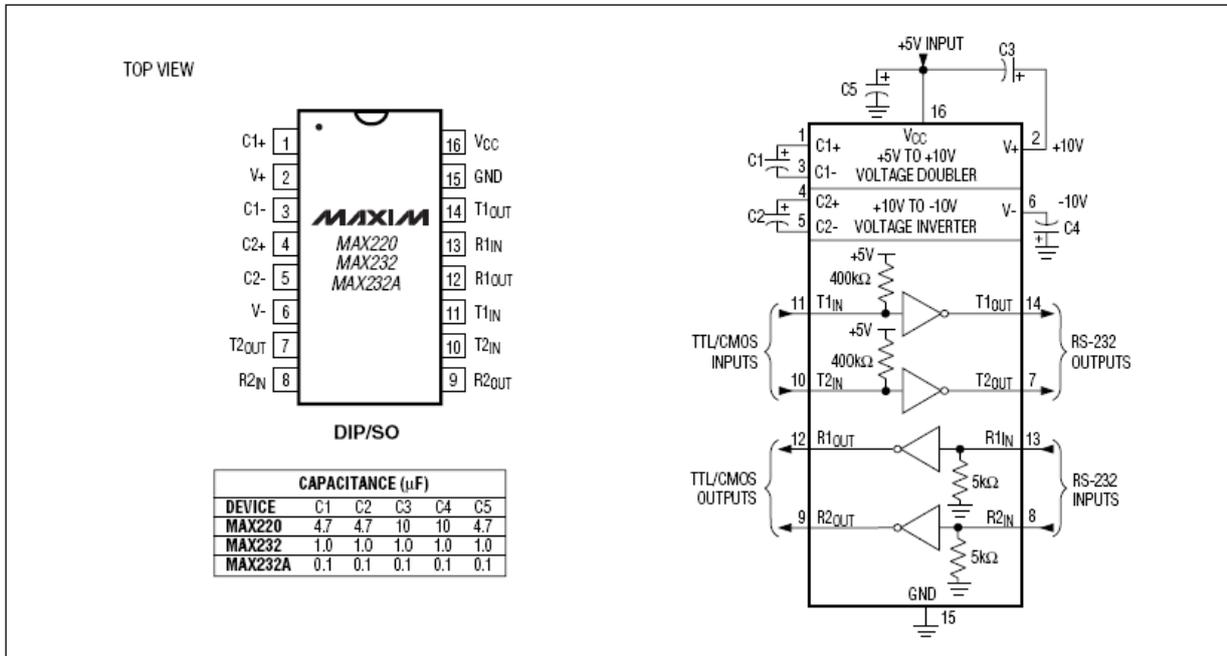


Figure 5. MAX220/MAX232/MAX232A Pin Configuration and Typical Operating Circuit

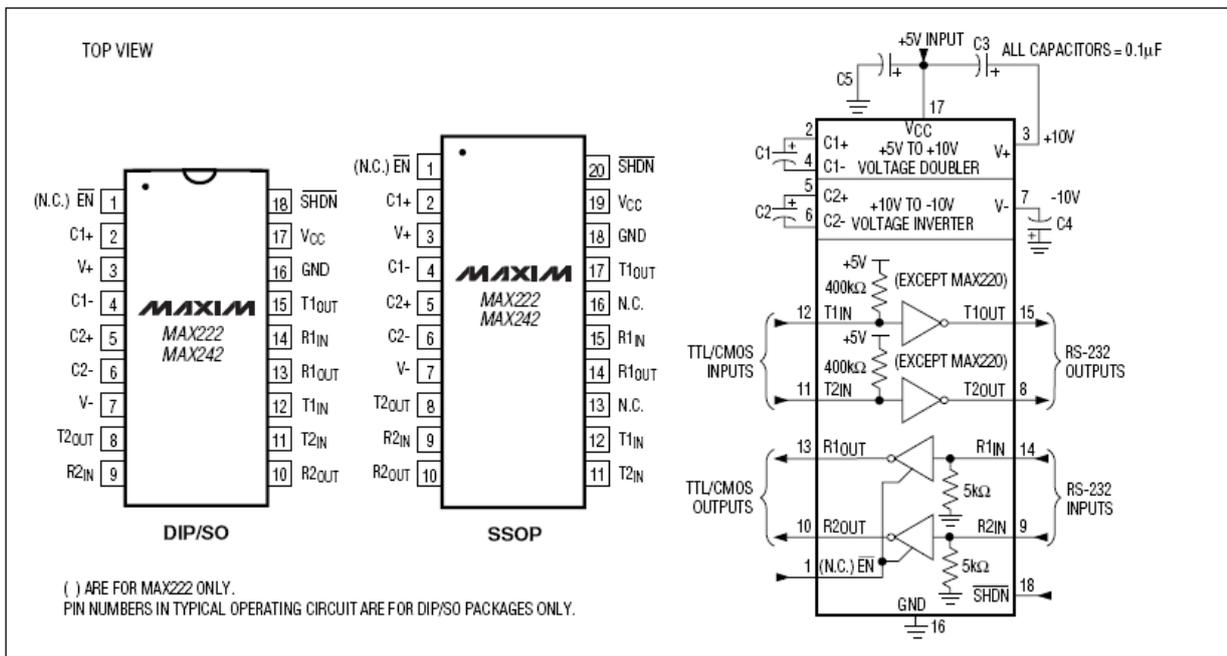


Figure 6. MAX222/MAX242 Pin Configurations and Typical Operating Circuit



ANEXO I-G.

Hoja de características

potenciómetro digital AD5241



I²C[®] Compatible 256-Position Digital Potentiometers

AD5241/AD5242

FEATURES

- 256 Positions
- 10 kΩ, 100 kΩ, 1 MΩ
- Low Tempco 30 ppm/°C
- Internal Power ON Midscale Preset
- Single-Supply 2.7 V to 5.5 V or
Dual-Supply ±2.7 V for AC or Bipolar Operation
- I²C Compatible Interface with Readback Capability
- Extra Programmable Logic Outputs
- Self-Contained Shutdown Feature
- Extended Temperature Range -40°C to +105°C

APPLICATIONS

- Multimedia, Video, and Audio
- Communications
- Mechanical Potentiometer Replacement
- Instrumentation: Gain, Offset Adjustment
- Programmable Voltage-to-Current Conversion
- Line Impedance Matching

GENERAL DESCRIPTION

The AD5241/AD5242 provide a single-/dual-channel, 256-position, digitally controlled variable resistor (VR) device. These devices perform the same electronic adjustment function as a potentiometer, trimmer, or variable resistor. Each VR offers a completely programmable value of resistance between the A Terminal and the wiper, or the B Terminal and the wiper. For AD5242, the fixed A-to-B terminal resistance of 10 kΩ, 100 kΩ, or 1 MΩ has a 1% channel-to-channel matching tolerance. The nominal temperature coefficient of both parts is 30 ppm/°C.

Wiper position programming defaults to midscale at system power ON. Once powered, the VR wiper position is programmed by an I²C compatible 2-wire serial data interface. Both parts have available two extra programmable logic outputs that enable users to drive digital loads, logic gates, LED drivers, and analog switches in their system.

The AD5241/AD5242 are available in surface-mount (SOIC-14/-16) packages and, for ultracompact solutions, TSSOP-14/-16 packages. All parts are guaranteed to operate over the extended temperature range of -40°C to +105°C. For 3-wire, SPI compatible interface applications, please refer to AD5200, AD5201, AD5203, AD5204, AD5206, AD5231*, AD5232*, AD5235*, AD7376, AD8400, AD8402, and AD8403 products.

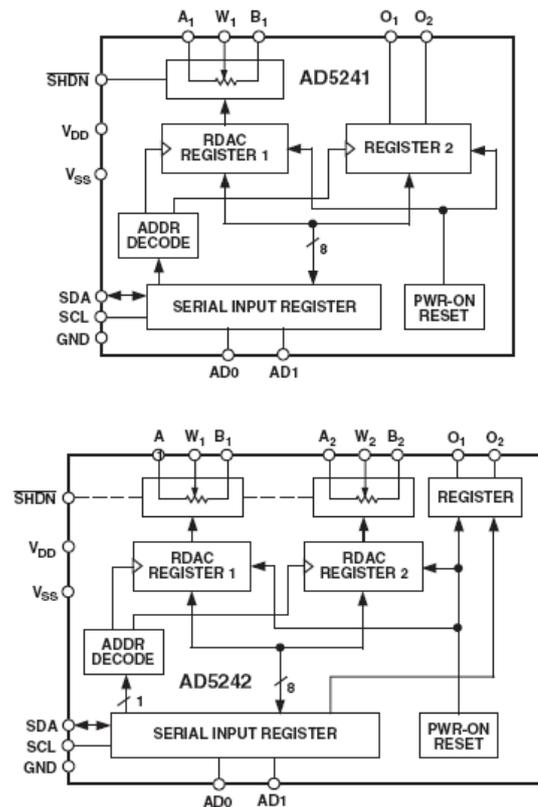
*Nonvolatile digital potentiometer

I²C is a registered trademark of Philips Corporation.

REV. B

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties that may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices.

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM





AD5241/AD5242—SPECIFICATIONS

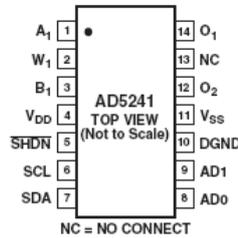
10 kΩ, 100 kΩ, 1 MΩ VERSION

($V_{DD} = 3\text{ V} \pm 10\%$ or $5\text{ V} \pm 10\%$, $V_A = +V_{DD}$, $V_B = 0\text{ V}$, $-40^\circ\text{C} < T_A < +105^\circ\text{C}$, unless otherwise noted.)

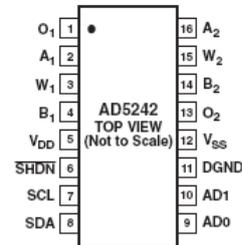
Parameter	Symbol	Conditions	Min	Typ ¹	Max	Unit
DC CHARACTERISTICS, RHEOSTAT MODE (Specifications apply to all VRs.)						
Resistor Differential Nonlinearity ²	R-DNL	R_{WB} , $V_A = \text{No Connect}$	-1	± 0.4	+1	LSB
Resistor Integral Nonlinearity ²	R-INL	R_{WB} , $V_A = \text{No Connect}$	-2	± 0.5	+2	LSB
Nominal Resistor Tolerance	DR	$T_A = 25^\circ\text{C}$, $R_{AB} = 10\text{ k}\Omega$	-30		+30	%
	DR	$T_A = 25^\circ\text{C}$, $R_{AB} = 100\text{ k}\Omega/1\text{ M}\Omega$	-30		+50	%
Resistance Temperature Coefficient	R_{AB}/DT	$V_{AB} = V_{DD}$, Wiper = No Connect		30		ppm/ $^\circ\text{C}$
Wiper Resistance	R_W	$I_W = V_{DD}/R$, $V_{DD} = 3\text{ V}$ or 5 V		60	120	Ω
DC CHARACTERISTICS, POTENTIOMETER DIVIDER MODE (Specifications apply to all VRs.)						
Resolution	N		8			Bits
Differential Nonlinearity ³	DNL		-1	± 0.4	+1	LSB
Integral Nonlinearity ³	INL		-2	± 0.5	+2	LSB
Voltage Divider Temperature Coefficient	DV_W/DT	Code = 80 _H		5		ppm/ $^\circ\text{C}$
Full-Scale Error	V_{WFSE}	Code = FF _H	-1	-0.5	0	LSB
Zero-Scale Error	V_{WZSE}	Code = 00 _H	0	0.5	1	LSB
RESISTOR TERMINALS						
Voltage Range ⁴	$V_{A,B,W}$		V_{SS}		V_{DD}	V
Capacitance ⁵ A, B	$C_{A,B}$	$f = 1\text{ MHz}$, Measured to GND, Code = 80 _H		45		pF
Capacitance ⁵ W	C_W	$f = 1\text{ MHz}$, Measured to GND, Code = 80 _H		60		pF
Common-Mode Leakage	I_{CM}	$V_A = V_B = V_W$		1		nA
DIGITAL INPUTS						
Input Logic High (SDA and SCL)	V_{IH}		$0.7 V_{DD}$		$V_{DD} + 0.5$	V
Input Logic Low (SDA and SCL)	V_{IL}		-0.5		$+0.3 V_{DD}$	V
Input Logic High (AD0 and AD1)	V_{IH}	$V_{DD} = 5\text{ V}$	2.4		V_{DD}	V
Input Logic Low (AD0 and AD1)	V_{IL}	$V_{DD} = 5\text{ V}$	0		0.8	V
Input Logic High	V_{IH}	$V_{DD} = 3\text{ V}$	2.1		V_{DD}	V
Input Logic Low	V_{IL}	$V_{DD} = 3\text{ V}$	0		0.6	V
Input Current	I_{IL}	$V_{IN} = 0\text{ V}$ or 5 V			1	μA
Input Capacitance ⁵	C_{IL}			3		pF
DIGITAL OUTPUT						
Output Logic Low (SDA)	V_{OL}	$I_{OL} = 3\text{ mA}$			0.4	V
Output Logic Low (O_1 and O_2)	V_{OL}	$I_{OL} = 6\text{ mA}$			0.6	V
Output Logic High (O_1 and O_2)	V_{OH}	$I_{SINK} = 1.6\text{ mA}$			0.4	V
Three-State Leakage Current (SDA)	I_{OZ}	$I_{SOURCE} = 40\text{ }\mu\text{A}$	4		± 1	μA
Output Capacitance ⁵	C_{OZ}	$V_{IN} = 0\text{ V}$ or 5 V		3	8	pF
POWER SUPPLIES						
Power Single-Supply Range	$V_{DD\text{ RANGE}}$	$V_{SS} = 0\text{ V}$	2.7		5.5	V
Power Dual-Supply Range	$V_{DD/SS\text{ RANGE}}$	± 2.3			± 2.7	V
Positive Supply Current	I_{DD}	$V_{IH} = 5\text{ V}$ or $V_{IL} = 0\text{ V}$		0.1	50	μA
Negative Supply Current	I_{SS}	$V_{SS} = -2.5\text{ V}$, $V_{DD} = +2.5\text{ V}$		+0.1	-50	μA
Power Dissipation ⁶	P_{DISS}	$V_{IH} = 5\text{ V}$ or $V_{IL} = 0\text{ V}$, $V_{DD} = 5\text{ V}$		0.5	250	μW
Power Supply Sensitivity	PSS		-0.01	$+0.002+0.01$		%/%
DYNAMIC CHARACTERISTICS^{5, 7, 8}						
Bandwidth -3 dB	BW_10 kΩ BW_100 kΩ BW_1 MΩ	$R_{AB} = 10\text{ k}\Omega$, Code = 80 _H $R_{AB} = 100\text{ k}\Omega$, Code = 80 _H $R_{AB} = 1\text{ M}\Omega$, Code = 80 _H		650 69 6		kHz kHz kHz
Total Harmonic Distortion	THD _W	$V_A = 1\text{ V rms} + 2\text{ V dc}$, $V_B = 2\text{ V dc}$, $f = 1\text{ kHz}$		0.005		%
V_W Settling Time	t_s	$V_A = V_{DD}$, $V_B = 0\text{ V}$, $\pm 1\text{ LSB Error Band}$, $R_{AB} = 10\text{ k}\Omega$		2		μs
Resistor Noise Voltage	e_{N_WB}	$R_{WB} = 5\text{ k}\Omega$, $f = 1\text{ kHz}$		14		$\text{nV}\sqrt{\text{Hz}}$

AD5241/AD5242

AD5241 PIN CONFIGURATION



AD5242 PIN CONFIGURATION



AD5241 PIN FUNCTION DESCRIPTIONS

Pin	Mnemonic	Description
1	A ₁	Resistor Terminal A ₁
2	W ₁	Wiper Terminal W ₁
3	B ₁	Resistor Terminal B ₁
4	V _{DD}	Positive power supply, specified for operation from 2.2 V to 5.5 V.
5	$\overline{\text{SHDN}}$	Active low, asynchronous connection of Wiper W to Terminal B, and open circuit of Terminal A. RDAC register contents unchanged. $\overline{\text{SHDN}}$ should tie to V _{DD} if not used.
6	SCL	Serial Clock Input
7	SDA	Serial Data Input/Output
8	AD0	Programmable address bit for multiple package decoding. Bits AD0 and AD1 provide four possible addresses.
9	AD1	Programmable address bit for multiple package decoding. Bits AD0 and AD1 provide four possible addresses.
10	DGND	Common Ground
11	V _{SS}	Negative power supply, specified for operation from 0 V to -2.7 V.
12	O ₂	Logic Output Terminal O ₂
13	NC	No Connect
14	O ₁	Logic Output Terminal O ₁

AD5242 PIN FUNCTION DESCRIPTIONS

Pin	Mnemonic	Description
1	O ₁	Logic Output Terminal O ₁
2	A ₁	Resistor Terminal A ₁
3	W ₁	Wiper Terminal W ₁
4	B ₁	Resistor Terminal B ₁
5	V _{DD}	Positive power supply, specified for operation from 2.2 V to 5.5 V.
6	$\overline{\text{SHDN}}$	Active low, asynchronous connection of Wiper W to Terminal B, and open circuit of Terminal A. RDAC register contents unchanged. $\overline{\text{SHDN}}$ should tie to V _{DD} if not used.
7	SCL	Serial Clock Input
8	SDA	Serial Data Input/Output
9	AD0	Programmable address bit for multiple package decoding. Bits AD0 and AD1 provide four possible addresses.
10	AD1	Programmable address bit for multiple package decoding. Bits AD0 and AD1 provide four possible addresses.
11	DGND	Common Ground
12	V _{SS}	Negative power supply, specified for operation from 0 V to -2.7 V.
13	O ₂	Logic Output Terminal O ₂
14	B ₂	Resistor Terminal B ₂
15	W ₂	Wiper Terminal W ₂
16	A ₂	Resistor Terminal A ₂

AD5241/AD5242

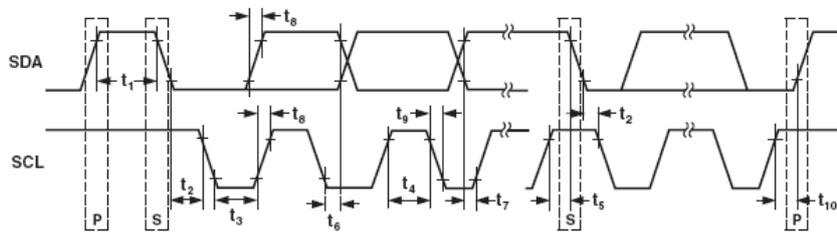


Figure 1. Detail Timing Diagram

Data of AD5241/AD5242 is accepted from the I²C bus in the following serial format:

S	0	1	0	1	1	AD1	AD0	R/W	A	\bar{A}/\bar{B}	RS	SD	O ₁	O ₂	X	X	X	A	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	A	P
SLAVE ADDRESS BYTE									INSTRUCTION BYTE									DATA BYTE										

where:

S = Start Condition

P = Stop Condition

A = Acknowledge

X = Don't Care

AD1, AD0 = Package pin programmable address bits. Must be matched with the logic states at Pins AD1 and AD0.

R/W = Read Enable at High and output to SDA. Write Enable at Low.

\bar{A}/\bar{B} = RDAC subaddress select. '0' for RDAC1 and '1' for RDAC2.

RS = Midscale reset, active high.

SD = Shutdown in active high. Same as $\overline{\text{SHDN}}$ except inverse logic.

O₁, O₂ = Output logic pin latched values.

D7, D6, D5, D4, D3, D2, D1, D0 = Data Bits.

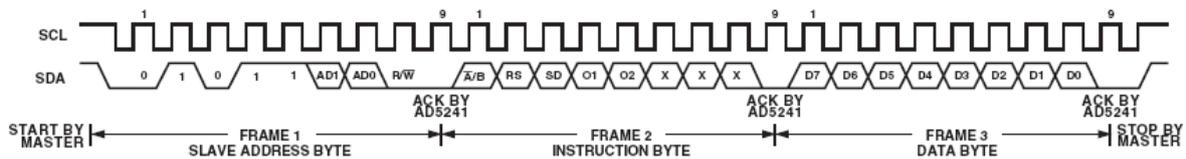


Figure 2. Writing to the RDAC Serial Register

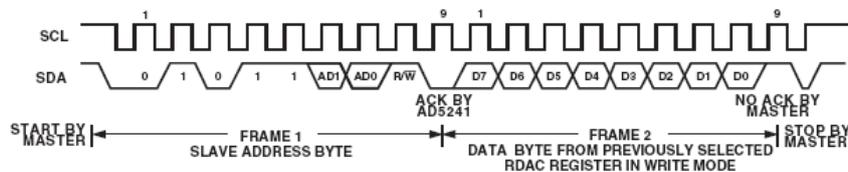


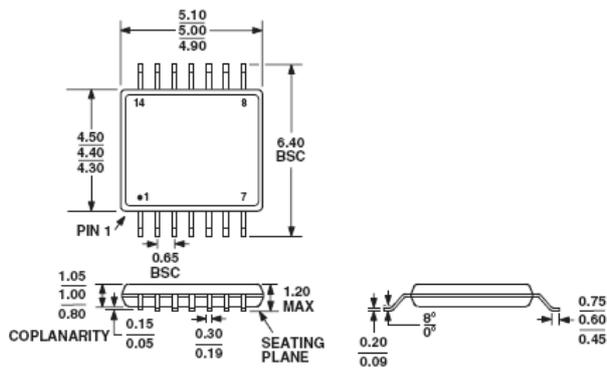
Figure 3. Reading Data from a Previously Selected RDAC Register in Write Mode

AD5241/AD5242

OUTLINE DIMENSIONS

**14-Lead Thin Shrink Small Outline Package [TSSOP]
(RU-14)**

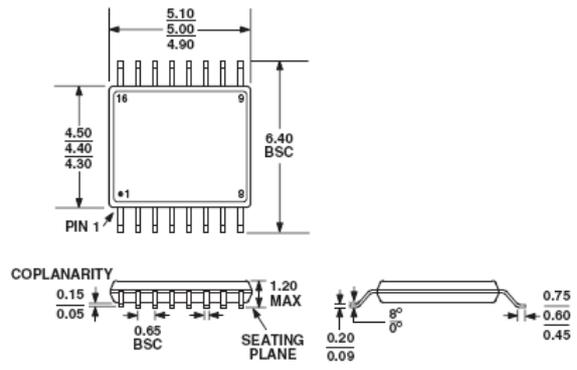
Dimensions shown in millimeters



COMPLIANT TO JEDEC STANDARDS MO-153AB-1

**16-Lead Thin Shrink Small Outline Package [TSSOP]
(RU-16)**

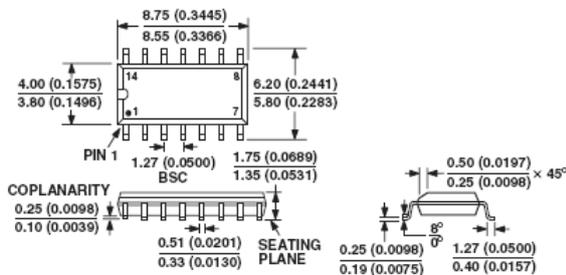
Dimensions shown in millimeters



COMPLIANT TO JEDEC STANDARDS MO-153AB

**14-Lead Standard Small Outline Package [SOIC]
Narrow Body
(R-14)**

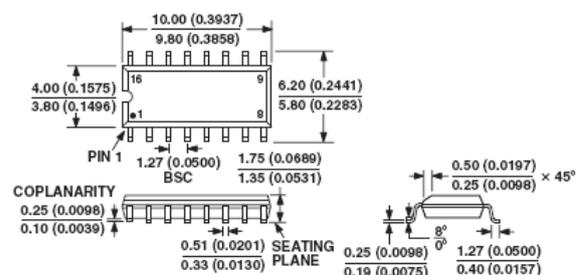
Dimensions shown in millimeters and (inches)



CONTROLLING DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS; INCH DIMENSIONS (IN PARENTHESES) ARE ROUNDED-OFF MILLIMETER EQUIVALENTS FOR REFERENCE ONLY AND ARE NOT APPROPRIATE FOR USE IN DESIGN
COMPLIANT TO JEDEC STANDARDS MS-012 AB

**16-Lead Standard Small Outline Package [SOIC]
Narrow Body
(R-16A)**

Dimensions shown in millimeters and (inches)



CONTROLLING DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS; INCH DIMENSIONS (IN PARENTHESES) ARE ROUNDED-OFF MILLIMETER EQUIVALENTS FOR REFERENCE ONLY AND ARE NOT APPROPRIATE FOR USE IN DESIGN
COMPLIANT TO JEDEC STANDARDS MS-012 AC



ANEXO I-H.

Código fuente (lenguaje C)



```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <at89x52.h>
#include <intrins.h>

unsigned char conta, tecla, tecla2, confirma;
bit flag, flag0, flag1, f4; //bits de apoyo en bucles
float Tension_2, Corriente_2, valor;
unsigned int scan_rate, barrido, k, j, Vvalida_positivo, Vvalida_negativo;
unsigned long Vo;
int contador;
char cadena [8]; // array que guarda los datos binarios que irán al AD5241
void config (void); //Prototipo de función
void datos_scan (void);
void espera (void);
void roto (unsigned int q);
void graba_poten (void);
void seleccion_voltaje (char p);
void calcula_resistencia_u (void);
void calcula_resistencia_m (void);
void leer_guardar_corriente (void);
void leer_guardar_voltaje (void);
int convert (char *string);

void int_timer_0 (void) interrupt 1
{
    TF0=0;
    P3_7=~P3_7;
    conta++;
    TR0=0;
    TH0=0xFF;
    TL0=0xFE;
    TR0=1;

    if (conta==2 || conta==6)
    {
        P1_7=1;
    }
    if (conta==4 || conta==10)
    {
        P1_7=0;
    }
    if (conta==35 || conta==16 || conta==54)
    {
        P1=0xFF;
    }
    if (conta==36 || conta==17 || conta==55)
    {
        f4=1;
    }
}
```



```
while (f4==1)
{
    TR0=0;
    if (P1_7==0)
    {
        TH0=0xFF;
        TL0=0xFE;
        TF0=0;
        TR0=1;
        P1=0x00;
        conta++;
        f4=0;
    }
}
switch (conta)
{
    case 38:    _nop_();
               P1_7=cadena[0]; //bit7 o flag7
               break;
    case 40:    _nop_();
               P1_7=cadena[1]; //bit6 o flag6
               break;
    case 42:    _nop_();
               P1_7=cadena[2]; //bit5 o flag5
               break;
    case 44:    _nop_();
               P1_7=cadena[3]; //bit4 o flag4
               break;
    case 46:    _nop_();
               P1_7=cadena[4]; //bit3 o flag3
               break;
    case 48:    _nop_();
               P1_7=cadena[5]; //bit2 o flag2
               break;
    case 50:    _nop_();
               P1_7=cadena[6]; //bit1 o flag1
               break;
    case 52:    _nop_();
               P1_7=cadena[7]; //bit0 o flag0
               break;

    case 58:
               conta=0;
               TR0=0;
               TH0=0xFF;
               TL0=0xFE;
               TF0=0;
               P3_7=1; // CONDICION DE STOP
               _nop_();
               _nop_();
               P1_7=1; // CONDICION DE STOP
               flag=1;
               break;

    default:    break;
}
}
```



```
void main (void)
{
  config();
  flag1=0; // configuramos todos los parámetros necesarios para la utilización
  del micro
  k=0; // variable del bucle FOR donde se repetirán las pruebas
  P3_7=0; // Reloj del AD5241
  f4=0; // bit inicializado

  for(k=0;k<10000;k++) // bucle de repetición de la prueba
  {
    bit f7,f8; //config();
    P0_0=1; // No permite el paso de la señal al EC P0_0 por P3_2
    f7=0;
    f8=0;
    j=0;

    puts("\n\b\b\b\b ** BIENVENIDO AL SOFTWARE IVI 1.0 **");
    puts(" CARACTERIZADOR DE MATERIALES DE TRANSMITANCIA
  CONTROLABLE\n");

    while(f7==0) // 1º parte (bucle) selección del Scan Rate y
    paso de datos al AD5241
    {
      flag0=0;
      f8=0;

      puts("\n\n-->INTRODUZCA EL SCAN RATE DENTRO DEL INTERVALO [500uV/s-
  660mV/s]");
      puts(" (escala de mV o uV: ejemplo 680m (0,68V)--
  850u)");

      /***** INTRODUCIMOS EL VALOR POR TECLADO DEL SCAN RATE *****/

      datos_scan (); // Llamada a la función datos_scan
      barrido=scan_rate;

      if((scan_rate>9) && (tecla=='m'))
      {
        flag0=1;
      }
      if((scan_rate>4) && (tecla=='m') && (scan_rate<10))
      {
        scan_rate=scan_rate*100;
        tecla='u';
        flag0=0;
      }
      if(flag0==1)
      {
        scan_rate=scan_rate/10;
      }
    }
  }
}
```



```
switch(tecla)
{

case 'u':          calcula_resistencia_u ();
                   break;

case 'm':          calcula_resistencia_m ();
                   break;

default:           break;
}

/*SELECCIÓN DEL SCAN RATE  mV ó uV  POR TECLADO Y CALCULO DE LA RESISTENCIA*/

contador=0; // contador a cero para saber los ciclos de los 8 bits
roto(j);    // Función donde se rota bits y se almacenan en un array
conta=0;    // Variable que cuenta niveles altos y bajos de la señal reloj
graba_poten();
f7=1;       // Flag de salida del 1º bucle while
if(flag1==1)
{
    f7=0;
    flag1=0;
}
// Fin del WHILE f7

/////////*****
// 2º bucle WHILE, carga el valor de la tensión de salida de la triangular
/////////*****

while (f8==0)
{
    int c;
    char tecla1;
    bit f1;
    puts("\nIntroduzca el valor de salida del voltaje\n
    ----pulse 'a' para 0,5V\n----pulse 'b' para 1V\n
    ----pulse 'c' para 1,5V\n----pulse 'd' para 2V\n
    ----pulse 'e' para 2,5V\n----pulse 'f' para 3V\n");

    f1=0;
    tecla1=getchar();
    seleccion_voltaje(tecla1);

while (f1==0)
{
    char confirma;
    puts("\nLos Datos introducidos son:\n");
    printf("\t\t Scan_Rate\t\t\t\t\t====> %d%cV/s\n",barrido,tecla2);
    printf("\n Tension de salida====> %5.1fV\n",valor);
    puts("\n Seguro que quiere aplicar estos datos: Si (s) o No
(n) ?");
    puts("\nrecuerde para una nueva medida pulse SPACE\n");
    confirma=getchar();
```



```
switch (confirma)
{
    case 'N', 'n':          f8=1;
                          f7=0;
                          RI=1;
                          f1=1;
                          break;

    case 'S', 's':          f8=1;
                          f1=1;
                          break;

    default:                f1=0;
                          break;
}

P3_6=1;          // cambio porque no conmuta
P3_4=1;          //ATLA IMPEDANCIA DEL ADC.
c=1;
espera();       // Función que activa un tiempo de espera
P0_0=0;         //PERMITE EL PASO DE LA SEÑAL AL EC. Cambio P3_2 por P0_0
P0_1=0;

while (RI!=1)
{float compara;

    if((P3_4==1) && (compara!=Tension_2))
    {
        printf("\t %5.2f \t %5.2f \n",Tension_2,Corriente_2);
    }
    compara=Tension_2;
    P3_5=0;      // MODO ADC Leer Tensiones
    _nop_();
    _nop_();
    P3_4=0;      //Leer datos del ADC
    _nop_();
    _nop_();

    if(((P2<=Vvalida_positivo) && ((c%2)!=0)) || ((P2>=Vvalida_negativo)
    && ((c%2)==0)))
    {
        P3_6=~P3_6;
        c++;
    }
    leer_guardar_voltaje();
    P3_4=1;      //Alta impedancia ADC
    P3_5=1;      // MODO ADC Leer Corrientes
    _nop_();
    _nop_();
    P3_4=0;
    _nop_();
    _nop_();
    leer_guardar_corriente();
    P3_4=1;      //Alta impedancia nuevos datos
}}
}}
```



```
    _nop_ ();
    _nop_ ();

    tecla2=getchar ();
        switch (tecla2)
        {
            case ' ':    k++;
                        f7=0;
                        f8=0;
                        break;
            case 'f':    k=101;
                        break;

            default:     break;
        }
    }}

//FUNCION=> CONFIGURACION DE LOS PUERTOS,TEMPORIZADORES Y VARIABLES//

void config (void)
{

    SCON=0x40;
    TMOD=0x20;
    TH1=0xFD;
    TL1=0xFD;
    EA=1;
    TR1=1;
    TI=1;
    REN=1;
    PCON=0x80;
    TMOD |=0x01
    ET0=1;
    TH0=0xFF;    // TH0=0xFE
    TL0=0xFE;    // TL0=0x2A
    TR0=0;
    TF0=0;
    P3_7=0;    // PIN DE SEÑAL DE RELOJ AD5241
    P3_6=1;    //PIN DE LA SEÑAL CUADRADA
    P0_0=1;    //PIN pponemos MUX-DEMUX al aire y masa.
    P0_1=1;    //PIN QUE PERMITE INTEGRAR LA SEÑAL (=1) O NO (P3_3=0)
    P1=0x00;
    flag=0;
    P2=0xFF;

}
```



```
// FUNCION=> ROTAR UN BIT EN UN PIN DEL PUERTO //

void roto (unsigned int q)

{
    int g;
    g=0;
    while (g<8)
    {
        P1=q;
        cadena[g]=P1_7;
        q=_irol_(q,1);
        g++;
    }
}

// FUNCION=> ESCRIBIMOS LOS VALORES AL POTENCIOMETRO DIGITAL //

void graba_poten(void)
{
    ///***** CONDICION DE INICO START *****///

        P3_7=1;
        P1_7=1;
        P1_7=0;
        P3_7=0;

        TR0=1;        // ARRANCO EL TIMER 0, SE INICIA LA SEÑAL DE RELOJ POR "IT0"

while (flag==0) // BUCLE QUE ESPERA A PASAR LOS DATOS AL POTENCIOMETRO
{
}

flag=0;
}

// FUNCION=> LEER TENSION APLICADA AL EC //

void leer_guardar_voltaje(void)
{
    signed int Tension_1;
    unsigned int Vvalida;

    Vvalida=P2;
    Tension_2=19.53*Vvalida;
    Tension_1=2500-Tension_2;
    Tension_2=Tension_1/625.0;
    Tension_2=Tension_2-0.5;

}

```



```
// FUNCION=> LEER_CORRIENTE DEL EC //

void leer_guardar_corriente(void)
{
    signed int Corriente_1;
    signed int Isalida;

    Isalida=P2;
    Corriente_2=19.53*Isalida;
    Corriente_1=(2500-Corriente_2);
    Corriente_2=(Corriente_1/2500.0);
    Corriente_2=(Corriente_2*10000)/68.0;
}

// FUNCION=> ENTRADA DE VALORES SCAN RATE //

void datos_scan (void)
{
    unsigned int i,z;
    z=0;
    for(i=0;i<9;i++)
    {
        cadena[i]=getchar();
        if((cadena[i]=='.')||(cadena[i]==','))
        {
            j=i;
            i++;
            cadena[i]=getchar();
            if((cadena[1+j]=='5') || (cadena[1+j]=='6') ||
(cadena[1+j]=='7') || (cadena[1+j]=='8') || (cadena[1+j]=='9'))
            {
                z=1;
            }
        }
        if((cadena[i]=='\n') || (cadena[i]=='m') || (cadena[i]=='u'))
        {
            scan_rate=convert(cadena);
            scan_rate=scan_rate+z;
            tecla=cadena[i];
            tecla2=tecla;
            i=10;
        }
    }
}

// FUNCION=> CONVIERTE EL ARRAY DE VALORES EN ENTERO //

int convert(char *string) {
    return atoi(string);
}
```



Medidor de voltametría cíclica para dispositivos de transmitancia controlable

```
// FUNCION=> CALCULA EL VALOR DEL POTENCIOMETRO DIGITAL PARA EL CASO  
DE uV //
```

```
void calcula_resistencia_u (void)  
{  
    int R;  
    if(scan_rate<500)    // BUCLE DE RANGO NO VALIDO  
    {  
        puts("\n*****RANGO NO VALIDO*****\n");  
        flag1=1;  
    }  
    else {  
        scan_rate=scan_rate/10;  
        R=((2*10000)/scan_rate);  
    }  
    while(R>(2+(3.913*j))) // Bucle que calcula el Decimal de la  
resistencia (LUT)  
    {  
        j++;  
    }  
    if(j==256)  
    {  
        j=255;}  
  
    if(((51<=j) && (j<=65)) || ((69<=j) && (j<=74)) || (j==84) || (j==95))  
    {  
        j=j+1;  
    }  
    else{  
  
        if(((66<=j) && (j<=68)) || ((75<=j) && (j<=82)) || ((85<=j) && (j<=93)) || (  
(96<=j) && (j<=100)))  
        {  
            j=j+2;  
        }  
    }  
    if(j==102)  
    {  
        j=j+3;  
    }  
  
    P1=j;  
}
```



```
// FUNCION=> CALCULA EL VALOR DEL POTENCIOMETRO DIGITAL PARA EL CASO DE mV //
```

```
void calcula_resistencia_m (void)
{
    int R;

    if(scan_rate>=67)
    {
        puts("\n*****RANGO NO VALIDO*****\n");
        flag1=1;
    }
    else
    {
        R=((2*100)/scan_rate);

        while(R>(2+(3.913*j)))
        {
            j++;
        }
        if(((51<=j) && (j<=65)) ||
((69<=j) && (j<=74)) || (j==84) || (j==95))
        {
            j=j+1;
        }
        else{
            if(((66<=j) && (j<=68)) || ((75<=j) && (j<=82)) || ((85<=j) && (j<=93)) || (
(96<=j) && (j<=100)))
            {
                j=j+2;
            }
        }
        if(j==102)
        {
            j=j+3;
        }
        P1=j;
    }
}
```



Medidor de voltametría cíclica para dispositivos de transmitancia controlable

```
// FUNCION=> SELECCIONA EL VALOR MÁXIMO DE TENSION APLICADO AL EC //
```

```
void seleccion_voltaje(char p)
{
    switch(p)
    {
        case 'a':      valor=0.5;
                      Vsalida_positivo=96;
                      Vsalida_negativo=128;
                      break;
        case 'b':      valor=1.0;
                      Vsalida_positivo=80;
                      Vsalida_negativo=144;
                      break;
        case 'c':      valor=1.5;
                      Vsalida_positivo=64;
                      Vsalida_negativo=160;
                      break;
        case 'd':      valor=2.0;
                      Vsalida_positivo=48;
                      Vsalida_negativo=176;
                      break;
        case 'e':      valor=2.5;
                      Vsalida_positivo=31;
                      Vsalida_negativo=192;
                      break;
        case 'f':      valor=3.0;
                      Vsalida_positivo=16;
                      Vsalida_negativo=208;
                      break;
        default:
                      break;
    }
}
```

```
// FUNCION QUE DURA UN TIEMPO DE 277,7 µs //
```

```
void espera (void)
{
    ET0=0;
    TR0=0;
    TH0=0xFF;
    TL0=0x00;
    TR0=1;

    while (TF0==0)
    {
    }

    TR0=0;
    TF0=0;
}
```



ANEXO I-I.

Tabla de resultado

SR=50mV/s – V₀=0,5V

V_{EC} (V)	I_{EC} (μA)
0	0
-0,34	6,88
-0,34	6,88
-0,38	3,41
-0,34	6,88
-0,38	2,29
-0,41	3,41
-0,44	2,29
-0,47	3,41
-0,47	12,59
-0,5	21,82
-0,53	8
-0,53	5,71
-0,5	12,59
-0,53	4,59
-0,59	10,29
-0,59	17,24
-0,59	24,12
-0,62	0
-0,59	3,41
-0,62	24,12
-0,66	13,76
-0,62	16,06
-0,66	0
-0,62	54
-0,66	11,47
-0,62	2,29
-0,66	-1,12
-0,66	14,94
-0,66	-19,47
-0,69	18,35
-0,72	17,24
-0,69	-2,24
-0,5	-71,18
-0,53	-104,53
-0,5	-73,47
-0,53	-101,06
-0,5	-64,29
-0,53	-101,06
-0,41	-94,18
-0,44	-51,65
-0,41	-89,59
-0,44	-64,29
-0,41	-73,47
-0,44	-18,35
-0,41	-65,47
-0,38	-87,29
-0,41	-47,06
-0,38	-86,12

-0,41	-47,06
-0,38	-87,29
-0,41	-45,94
-0,41	-48,24
-0,31	-58,53
-0,34	-36,71
-0,31	-57,41
-0,34	-24,06
-0,31	-56,24
-0,34	-52,82
-0,31	-58,53
-0,28	-67,76
-0,31	-32,12
-0,28	-67,76
-0,25	-20,65
-0,22	-62
-0,25	-32,12
-0,22	-65,47
-0,25	-42,47
-0,22	-36,71
-0,25	-39
-0,22	-43,59
-0,19	-57,41
-0,22	-18,35
-0,19	-58,53
-0,22	-13,76
-0,16	-58,53
-0,19	-21,76
-0,16	-58,53
-0,19	-20,65
-0,16	-59,71
-0,19	-24,06
-0,16	-59,71
-0,19	-20,65
-0,16	-47,06
-0,13	-50,53
-0,16	-24,06
-0,09	-53,94
-0,13	-10,29
-0,09	-52,82
-0,13	-13,76
-0,09	-55,12
-0,13	-28,71
-0,09	-57,41
-0,13	-29,82
-0,09	-44,76
-0,06	-51,65
-0,09	-8
-0,06	-48,24
-0,09	-16,06

-0,06	-50,53
-0,03	-55,12
-0,06	-32,12
-0,03	-36,71
-0,06	-33,29
-0,03	-5,71
0	-51,65
-0,03	-14,88
0	-50,53
0,03	-39
0	-32,12
0,03	-40,18
0	-33,29
0,06	-39
0,09	-67,76
0,06	-39
0,09	-64,29
0,06	-41,29
0,09	-42,47
0,09	-33,29
0,12	-70,06
0,09	-49,35
0,12	-47,06
0,16	-67,76
0,12	-24,06
0,16	-72,35
0,12	-27,53
0,16	-74,65
0,12	-47,06
0,16	-59,71
0,12	-50,53
0,22	-83,82
0,19	-60,82
0,22	-87,29
0,19	-63,12
0,22	-85
0,19	-64,29
0,22	-52,82
0,25	-66,59
0,28	-104,53
0,25	-75,76
0,28	-102,24
0,31	-114,82
0,31	-118,29
0,34	-130,94
0,37	-132,06
0,34	-126,35
0,37	-111,41
0,34	-140,12
0,37	-124,06



ANEXO I-J.

Tabla de resultados

SR=10mV/s $V_0=1,5V$



Medidor de voltametría cíclica para dispositivos de transmitancia controlable

V_{EC} (V)	I_{EC} (μA)	-0,84	21,82	-1,28	147,06	-1,47	147,06	-1,56	130,94	-1,25	20,65
0	0	-0,87	16,06	-1,31	147,06	-1,47	147,06	-1,53	117,18	-1,25	21,82
-0,38	5,71	-0,9	28,71	-1,34	147,06	-1,47	147,06	-1,47	110,29	-1,28	25,24
-0,34	6,88	-0,94	34,47	-1,31	147,06	-1,37	147,06	-1,47	106,82	-1,22	11,47
-0,38	5,71	-0,9	17,24	-1,28	147,06	-1,41	147,06	-1,47	110,29	-1,22	11,47
-0,34	6,88	-0,94	26,41	-1,31	147,06	-1,37	147,06	-1,47	105,65	-1,22	12,59
-0,41	13,76	-0,97	28,71	-1,34	147,06	-1,34	147,06	-1,47	87,29	-1,25	19,53
-0,38	3,41	-0,97	26,41	-1,31	147,06	-1,37	147,06	-1,44	75,82	-1,25	25,24
-0,41	12,59	-1	35,59	-1,12	147,06	-1,31	147,06	-1,44	78,12	-1,22	12,59
-0,38	6,88	-1	28,71	-1,28	147,06	-1,34	147,06	-1,47	78,12	-1,19	6,88
-0,41	14,94	-1,03	27,53	-1,25	147,06	-1,31	147,06	-1,41	64,29	-1,19	5,71
-0,44	3,41	-1,03	24,12	-1,31	147,06	-1,34	147,06	-1,44	74,65	-1,19	9,18
-0,44	14,94	-1,06	40,18	-1,34	147,06	-1,31	147,06	-1,41	63,18	-1,15	1,12
-0,47	3,41	-1,06	41,35	-1	147,06	-1,34	147,06	-1,44	68,88	-1,15	1,12
-0,47	12,59	-1,09	42,47	-1,34	147,06	-1,31	147,06	-1,41	62	-1,15	3,41
-0,47	13,76	-1,09	42,47	-1,28	147,06	-1,28	147,06	-1,44	74,65	-1,12	1,12
-0,5	11,47	-1,12	51,71	-1,31	147,06	-1,31	147,06	-1,41	59,71	-1,12	0
-0,47	25,24	-1,15	63,18	-1	147,06	-1,28	147,06	-1,37	51,71	-1,15	9,18
-0,5	16,06	-1,12	52,82	-1,31	147,06	-1,31	147,06	-1,37	51,71	-1,12	8
-0,5	20,65	-1,19	78,12	-1,22	147,06	-1,28	147,06	-1,37	49,35	-1,12	2,29
-0,53	13,76	-1,15	63,18	-1,22	147,06	-1,41	147,06	-1,41	59,71	-1,09	-2,24
-0,56	37,88	-1,22	93,06	-1	147,06	-1,28	147,06	-1,41	56,29	-1,06	-3,41
-0,56	18,35	-1,19	83,82	-1,03	147,06	-1,28	147,06	-1,37	49,35	-1,06	-1,12
-0,53	17,24	-1,25	111,41	-1,09	147,06	-1,28	147,06	-1,41	56,29	-1,06	-1,12
-0,53	11,47	-1,25	109,12	-1,03	147,06	-1,34	147,06	-1,37	60,88	-1,03	-4,53
-0,53	11,47	-1,22	105,65	-1,06	147,06	-1,25	147,06	-1,41	55,12	-1,03	-2,24
-0,56	18,35	-1,25	113,71	-1,03	147,06	-1,41	147,06	-1,37	50,53	-1,03	-4,53
-0,53	10,29	-1,25	112,59	-1,09	147,06	-1,53	147,06	-1,34	44,76	-1,03	-3,41
-0,59	20,65	-1,28	133,24	-1,28	147,06	-1,25	147,06	-1,37	49,35	-1,06	1,12
-0,56	26,41	-1,28	147,06	-1,31	147,06	-1,28	147,06	-1,37	43,65	-1,03	-5,71
-0,59	48,24	-1,28	134,41	-1,28	147,06	-1,53	147,06	-1,31	29,82	-0,97	-1,12
-0,62	8	-1,28	147,06	-1,37	147,06	-1,25	147,06	-1,34	42,47	-1,03	3,41
-0,66	13,76	-1,31	147,06	-1,41	147,06	-1,53	147,06	-1,31	28,71	-1	-6,88
-0,62	8	-1,22	147,06	-1,37	147,06	-1,28	147,06	-1,34	42,47	-1,03	8
-0,66	20,65	-1,31	147,06	-1,47	147,06	-1,56	147,06	-1,34	36,76	-1	-2,24
-0,69	18,35	-1,28	147,06	-1,44	147,06	-1,56	147,06	-1,34	41,35	-1,03	2,29
-0,69	19,53	-1,31	147,06	-1,47	147,06	-1,47	147,06	-1,31	29,82	-0,97	-6,88
-0,72	28,71	-1,31	147,06	-1,62	147,06	-1,31	147,06	-1,34	45,94	-1,03	6,88
-0,75	18,35	-1,12	147,06	-1,66	147,06	-1,59	147,06	-1,31	31	-1	2,29
-0,75	20,65	-1,31	147,06	-1,62	147,06	-1,59	147,06	-1,34	37,88	-1	9,18
-0,78	24,12	-1,28	147,06	-1,56	147,06	-1,62	147,06	-1,34	34,47	-0,97	12,59
-0,75	13,76	-1,31	147,06	-1,59	147,06	-1,62	147,06	-1,28	25,24	-1	10,29
-0,78	20,65	-1,25	147,06	-1,53	147,06	-1,56	136,71	-1,31	31	-0,94	-8
-0,78	18,35	-1,31	147,06	-1,5	147,06	-1,59	141,29	-1,28	24,12	-0,97	3,41
-0,81	26,41	-1,28	147,06	-1,53	147,06	-1,56	132,12	-1,31	31	-0,94	-3,41
-0,81	22,94	-1,31	147,06	-1,47	147,06	-1,59	135,53	-1,25	18,35	-0,9	-5,71
-0,84	27,53	-1,34	147,06	-1,5	147,06	-1,59	132,12	-1,28	25,24	-0,94	6,88



Medidor de voltametría cíclica para dispositivos de transmitancia controlable

-0,94	5,71	-0,69	31	-0,47	12,59	-0,22	-17,18	0	1,12	0,25	-45,94
-0,9	2,29	-0,72	12,59	-0,44	-14,88	-0,25	11,47	0,03	-14,88	0,28	-53,94
-0,9	-3,41	-0,66	-5,71	-0,47	20,65	-0,22	-3,41	0	9,18	0,28	-50,53
-0,87	-3,41	-0,69	2,29	-0,44	-9,18	-0,19	-19,47	0,03	-24,06	0,31	-59,71
-0,9	2,29	-0,66	-6,88	-0,47	-8	-0,22	3,41	0	6,88	0,28	-58,53
-0,87	-4,53	-0,69	3,41	-0,41	20,65	-0,19	-12,59	0,03	17,24	0,34	-64,29
-0,9	1,12	-0,66	-8	-0,44	-1,12	-0,19	-16,06	0,06	-24,06	0,34	-53,94
-0,87	-6,88	-0,66	19,53	-0,41	0	-0,16	-16,06	0,06	-21,76	0,31	-58,53
-0,9	3,41	-0,69	9,18	-0,38	-18,35	-0,19	14,94	0,09	-26,41	0,34	-67,76
-0,84	2,29	-0,66	-5,71	-0,41	14,94	-0,16	-17,18	0,06	-4,53	0,37	-91,88
-0,87	-3,41	-0,69	1,12	-0,38	-19,47	-0,16	-14,88	0,09	-25,24	0,34	-79,24
-0,84	-3,41	-0,66	3,41	-0,41	10,29	-0,19	20,65	0,06	5,71	0,37	-82,71
-0,81	-6,88	-0,62	14,94	-0,38	-8	-0,13	-19,47	0,09	-25,24	0,34	-59,71
-0,84	6,88	-0,66	-1,12	-0,34	5,71	-0,16	10,29	0,06	6,88	0,37	-85
-0,78	-1,12	-0,62	-1,12	-0,38	-6,88	-0,13	-10,29	0,09	-20,65	0,34	-79,24
-0,81	4,59	-0,66	2,29	-0,34	4,59	-0,16	18,35	0,06	-11,47	0,37	-71,18
-0,78	-4,53	-0,62	1,12	-0,38	-5,71	-0,13	-16,06	0,09	-22,94	0,41	-105,65
-0,78	-3,41	-0,59	-6,88	-0,34	-18,35	-0,09	-20,65	0,06	-1,12	0,37	-74,65
-0,81	13,76	-0,62	1,12	-0,38	12,59	-0,13	9,18	0,09	-24,06	0,41	-98,76
-0,78	-3,41	-0,59	-8	-0,38	9,18	-0,09	-14,88	0,06	3,41	0,37	-94,18
-0,81	3,41	-0,62	3,41	-0,34	-17,18	-0,06	-18,35	0,12	-25,24	0,41	-103,35
-0,75	-5,71	-0,59	-8	-0,38	5,71	-0,03	-16,06	0,12	-26,41	0,44	-122,88
-0,78	-1,12	-0,62	3,41	-0,34	1,12	-0,06	8	0,12	-27,53	0,41	-96,47
-0,75	-9,18	-0,59	-5,71	-0,31	-19,47	-0,03	-25,24	0,12	-25,24	0,44	-127,47
-0,72	-4,53	-0,59	19,53	-0,34	11,47	-0,06	-9,18	0,12	-10,29	0,41	-95,29
-0,75	4,59	-0,56	-8	-0,31	-13,76	-0,03	-18,35	0,09	-19,47	0,44	-120,59
-0,72	-8	-0,59	1,12	-0,34	12,59	-0,06	-8	0,12	-20,65	0,47	-145,88
-0,75	8	-0,56	-9,18	-0,31	-20,65	-0,03	-5,71	0,09	-18,35	0,5	-144,71
-0,72	-3,41	-0,59	-5,71	-0,34	1,12	-0,06	-8	0,12	-19,47	0,47	-145,88
-0,75	5,71	-0,56	14,94	-0,31	-12,59	-0,03	-6,88	0,16	-29,82	0,5	-145,88
-0,72	-5,71	-0,59	2,29	-0,31	17,24	-0,06	-19,47	0,12	-1,12	0,47	-143,59
-0,72	-2,24	-0,56	-6,88	-0,28	-18,35	-0,03	-19,47	0,16	-28,71	0,44	-145,88
-0,75	2,29	-0,53	-11,47	-0,28	-4,53	-0,06	-14,88	0,12	-5,71	0,53	-145,88
-0,72	-6,88	-0,56	19,53	-0,31	-5,71	-0,03	-20,65	0,16	-3,41	0,5	-145,88
-0,75	8	-0,53	-4,53	-0,28	-12,59	-0,06	-11,47	0,12	-21,76	0,53	-145,88
-0,72	-3,41	-0,56	0	-0,31	-5,71	-0,03	-11,47	0,16	-16,06	0,16	-145,88
-0,75	12,59	-0,53	-8	-0,28	3,41	-0,06	-10,29	0,19	-33,29	0,03	-145,88
-0,72	17,24	-0,56	0	-0,25	-19,47	-0,03	-4,53	0,16	-11,47	0,53	-145,88
-0,69	-3,41	-0,5	-4,53	-0,28	16,06	0	-21,76	0,19	-34,41	0,5	-145,88
-0,72	3,41	-0,53	0	-0,25	-17,18	-0,03	5,71	0,16	-27,53	0,28	-145,88
-0,69	1,12	-0,5	5,71	-0,28	-8	0	-17,18	0,16	-28,71	0,53	-145,88
-0,72	3,41	-0,47	-11,47	-0,25	5,71	-0,03	19,53	0,19	-20,65	-1,31	-145,88
-0,69	-5,71	-0,5	0	-0,22	-14,88	0	-26,41	0,19	-32,12	0,56	-145,88
-0,72	3,41	-0,47	-13,76	-0,25	-11,47	-0,03	-9,18	0,22	-34,41	0,41	-145,88
-0,69	-6,88	-0,47	-6,88	-0,22	-24,06	0	-22,94	0,25	-35,59	-1,81	-145,88
-0,72	5,71	-0,5	-4,53	-0,25	-14,88	-0,03	16,06	0,22	-36,71	-1,28	-145,88
-0,69	-4,53	-0,47	25,24	-0,22	-24,06	0	-20,65	0,25	-45,94	0,37	-145,88
-0,72	3,41	-0,5	-1,12	-0,25	-10,29	-0,03	8	0,22	-35,59	0,56	-145,88
-0,69	-5,71	-0,47	10,29	-0,22	-18,35	0	-14,88	0,25	-42,47	-0,78	-145,88
-0,72	2,29	-0,5	-3,41	-0,25	-3,41	0,03	-24,06	0,28	-51,65	0,37	-145,88

